

Федеральное государственное унитарное предприятие
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е. Жуковского»
(ФГУП «ЦАГИ»)

На правах рукописи



СВИРИДОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА АВИАЦИОННОЙ
КОНСТРУКЦИИ**

Специальность 05.07.03
«Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Андрей Вячеславович Панков
кандидат технических наук

Жуковский 2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Разработка методик испытаний для получения механических свойств авиационных материалов	15
1.1. Расчетные характеристики общие сведения	15
1.2. Испытания на растяжения.....	25
1.3. Испытания на сжатие.....	27
1.4. Разработка методики испытания на сдвиг ПКМ	36
1.5. Определение предела прочности на сдвиг тонких алюминиевых листов. Проект методики.	47
1.5.1. Метод испытаний на сдвиг тонких алюминиевых листов.....	47
1.5.2. Область применения и суть метода.....	47
1.5.3. Образец для испытаний на срез.....	49
1.5.4. Ориентация вырезки образца и направление оси нагружения.....	50
1.5.5. Процедура испытаний.....	51
1.5.6. Вычисления.....	51
1.5.7. Протокол	51
1.5.8. Проведение испытаний на сдвиг	52
1.5.9. Объект испытаний.....	52
1.5.10. Испытательное оборудование и оснастка	53
1.5.11. Проведение испытаний.....	53
1.5.12. Выводы	54
Выводы к главе 1	55

2. Зависимость усталостных характеристик алюминиевых полуфабрикатов от частоты нагружения образца в эксперименте и способа производства отверстия в образце.....	56
2.1. Введение.....	56
2.2. Методика ЦАГИ.....	57
2.3. Постановка задачи.....	60
2.4. Сравнение способов сверления отверстий.....	61
2.5. Подтверждение влияния частоты нагружения на получаемые усталостные характеристики.....	67
2.5.1. Обзор.....	67
2.5.2. Постановка задачи.....	77
2.5.3. Проведение эксперимента.....	77
2.5.4. Обработка результатов.....	78
2.6. Выводы к главе 2.....	85
3. Влияние различных способов сверления на получаемые усталостные характеристики для ПКМ.....	87
3.1. Изготовление образцов.....	89
3.2. Проведение экспериментальных исследований.....	101
3.1. Объект испытаний.....	101
3.2. Методика испытаний.....	103
3.3. Обработка результатов.....	105
3.4. Выводы к главе 3.....	108
4. Разработка методики испытаний для определения овализации отверстия...	108
4.1. Введение.....	108
4.2. Общие сведения о методике испытаний.....	111
4.3. Статические испытания образцов.....	113
4.4. Усталостные испытания образцов.....	117

4.5. Конечно элементный расчет	119
4.6. Рекомендации по совершенствованию методики.....	124
Выводы к главе 4	124
Заключение	126
Список литературы	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Каждый экземпляр воздушного судна (ВС), находящийся в эксплуатации, должен всегда обладать лётной годностью, несмотря на то что конструкция его сложна, имеет эксплуатационную наработку, в течение которой она подвергалась воздействию энергий разного рода и окружающей среды. В результате этого в конструкции развиваются процессы повреждения от коррозии, усталости, износа, старения и др. механизмов или их сочетания. При этом возможный отказ конструкции в результате повреждения, способного привести к сложной или катастрофической ситуации, не должен возникать за весь период эксплуатации. В этой связи одним из основных требований социального аспекта работы воздушного транспорта является безопасность полётов.

Практика эксплуатации ВС различных типов и экономические показатели эксплуатации показали, что для обеспечения безопасности полётов при длительной наработке конструкция ВС должна обладать эксплуатационной живучестью.

Данная диссертационная работа включает в себя четыре главы, темы которых на первый взгляд не связаны между собой. Объединяет их то, что решения задач, описанных в данных главах, направлены на совершенствование методов обоснования статической прочности и ресурса конструкций. Кроме того, все представленные главы объединяет проведение достаточно большого объёма экспериментальных исследований, в которых автор принимал непосредственное участие.

Актуальность работы

Современные процедуры сертификации авиационной техники предполагают подтверждение соответствия конструкции воздушного судна (ВС) требованиям Федеральных Авиационных правил, в частности ФАП-21, ФАП 25, ФАП 23, ФАП 27, ФАП 29 которые регламентируют общий порядок проведения сертификации ВС, а также представляют нормы лётной годности для самолетов и вертолетов различной категории. В каждом из этих документов содержится п. 613

(«Прочностные характеристики материалов и их расчетные значения»), который предполагает получение разработчиком ВС расчетных характеристик, применяемых в конструкции материалов и полуфабрикатов. Расчетные характеристики, как правило, включают в себя данные по механическим свойствам, усталости, трещиностойкости и определяются путем статистической обработки экспериментальных данных. В связи с большим количеством регламентируемых нормами испытаний, актуальным являются задачи сокращения времени и трудоемкости проведения испытаний и изготовления образцов. В тоже время необходимо обеспечить необходимый уровень точности получаемых результатов. Для обеспечения последнего необходимо проводить исследования с целью недопущения увеличения рассеяния экспериментальных данных, получения необоснованно завышенных значений расчетных характеристик, а также оценки возможности использования экспериментальных данных полученных по измененным и исходным процедурам.

В связи с массовым применением полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции воздушного судна, особенно для изготовления основных и особо ответственных элементов, а также созданием и развитием методик расчета статической и усталостной прочности для таких элементов, стала особенно актуальной задача разработки и совершенствования методов получения расчетных характеристик для ПКМ, для которых номенклатура расчетных характеристик намного шире, чем для металлов. Остро стоит проблема уменьшения рассеяния экспериментальных данных и минимизация влияния на рассеяние процедур их получения, поскольку изначально у характеристик ПКМ рассеяние выше чем у металлов, что приводит к повышенным коэффициентам надежности и необходимостикратно увеличивать количество циклов нагружения натурной конструкции для подтверждения проектного ресурса.

В целом, результаты специальной квалификации, в частности полученные расчетные характеристики и их рассеяния, непосредственно влияют на все аспекты, связанные с обеспечением статической и усталостной прочности авиационной

конструкции. В этой связи тема диссертационной работы является актуальной и практически важной.

Степень разработанности темы.

Первоначально, до унификации отечественной системы сертификации ВС с западными нормами прочности, расчетные характеристики металлических материалов и полуфабрикатов приводились централизованно в справочниках ВИАМ, ВИЛС и ЦАГИ, в которых приводятся данные по различным РХ от механических свойств до различных узконаправленных характеристик, включая коррозионную стойкость, усталость и трещиностойкость.

В настоящее время выпущен справочник ОАК «Расчетные характеристики авиационных металлических конструкционных материалов», в котором приводятся РХ и методологические рекомендации по их получению.

Методологией определения соответствия конструкции ВС требованиям п. 613 ФАП – 25, 23, 29 и 27, посвящены работы Е.Б. Качанова, В.В. Коновалова, В.Я. Сеника, Ю.П. Трунина, А.В. Панкова и др.

Разработкой стандартов (ГОСТ, ОСТ, СТО, СТП) испытаний для определения расчетных характеристик ПКМ занимались и занимаются научные коллективы ВИАМ, ЦАГИ, СибНИА, АпАТЭК.

Активное внедрение цифровых технологий в процесс прогнозирования прочности ВС, позволяет получать механические свойства ПКМ с различными укладками расчетом с применением различных критериев разрушения, работы по данному направлению ведутся В.Л. Ломакиным, Б.Н. Федуловым, Ю.П. Труниным.

В последние годы особое внимание при производстве элементов ВС из ПКМ уделяется повышению качества обрабатываемых поверхностей, включая поверхности кромок и отверстий, варианты усовершенствования технологии представлены в работах В.Д. Вермея, С.А. Титова, Ф.М. Макарова и других. В работах проводится исследование влияния качества обработки на прочностные

характеристики, а также рассмотрены возможные производственные дефекты при воздействии вращающегося инструмента.

Несмотря на то, что объем выполненных работ по указанным направлениям более чем значительный, в процессе совершенствования технологий производства конструкции, внедрения новых типов материалов и полуфабрикатов, возникает целый перечень задач, которые требуют решения и актуализации ранее полученных экспериментальных данных. В последние годы практически отсутствуют данные по влиянию частоты нагружения на усталостные характеристики материалов, не проводились исследования влияния технологии производства отверстия на уровень получаемой долговечности, а результаты, полученные 20-30 лет назад являются не актуальными, в силу измененных технологических процессов и появления новых классов материалов и обрабатываемого оборудования.

В отечественной научной периодике практически отсутствуют работы по совершенствованию и обобщению опыта применения существующих методов проведения испытаний. Зарубежный опыт представлен либо готовыми стандартами испытаний с обрывочными данными о результатах их отработки, которые в основном предназначены для организации технологического процесса производства, а не для определения РХ, либо внутренними стандартами авиационных корпораций (Boeing, Airbus) недоступные для широкого использования.

Цель диссертационной работы – Обеспечения необходимых уровней статической прочности и ресурса летательных аппаратов за счет повышения точности определения расчетных характеристик авиационных конструкционных материалов.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Разработаны методики для определения прочности при сдвиге полуфабрикатов металлических сплавов и ПКМ.

2. Разработана методика определения статических и усталостных характеристик для соединений из ПКМ.

3. Разработаны методические рекомендации по производству отверстий в образцах из металлических сплавов и ПКМ для определения усталостных характеристик.

4. Подтверждены существующие закономерности по влиянию частоты нагружения на получаемую долговечность для современных алюминиевых сплавов.

Объектом исследования являются конструкционные авиационные материалы, их прочностные характеристики, конструкция воздушного судна;

Область исследования – технологические процессы, связанные с производством авиационных конструкций из металлических и композиционных материалов, сертификационные процедуры, применяемые методики испытаний для получения расчетных характеристик материалов, численные модели процессов разрушения.

Методологической основой является нормативная документация, регламентирующая процедуры подтверждения соответствия конструкции ВС нормам лётной годности по критериям прочности. Принятые в авиационной отрасли методики проведения испытаний элементарных образцов (ГОСТы, ОСТы, ASTM, EN и др.) из ПКМ и металлов. Работы отечественных и зарубежных ученых по прогнозированию долговечности авиационных конструкций из металлических и композиционных материалов.

Методы исследования базируются на научных положениях сопротивления материалов, механики разрушения твёрдых тел, механики ортотропных пластин и оболочек, методах и инструментах исследования поведения материалов в процессе прочностных испытаний. Экспериментальные исследования проводились в Лаборатории Прочности ФГУП «ЦАГИ» на электрогидравлических машинах с усилием от 10 до 50 Тс. Применялись системы тензометрии для фиксации процесса

деформирования образцов, ультразвуковые приборы неразрушающего контроля. Моделирование процесса испытаний.

Научная новизна

1. Разработаны методики определения механических свойств авиационных материалов, позволяющие увеличить точность экспериментальных данных и повысить определяемые запасы по статической прочности;
2. Обоснован более эффективный способ сверления отверстий в элементах конструкции из ПКМ, позволяющий снизить коэффициенты надежности и повысить ресурсные характеристики конструкции за счет снижения рассеяния получаемых характеристик прочности;
3. Подтвержден рекомендованный диапазон частот нагружения при определении усталостных характеристик современных металлических материалов;
4. Разработана методика определения статических и усталостных характеристик по критерию овализации отверстия для соединений из ПКМ, позволяющая значительно повысить уровень получаемых допустимых контактных напряжений в конструкции.

Теоретическая значимость состоит в определении степени влияния используемых методов и условий испытаний на получаемые расчетные характеристики, выявление возможности прямого моделирования процессов разрушения ПКМ с помощью МКЭ для получения прочностных свойств различных типовых укладок ПКМ.

Практическая значимость

1. Результаты диссертационной работы используются при проведении специальной квалификации современных металлических и композиционных материалов в обеспечение требований МОС к п. 613;
2. Предложен новый способ сверления отверстий в образцах при получении усталостных характеристик для полимерных композиционных материалов, что позволяет уменьшить рассеяние характеристик и снизить соответствующий коэффициент надежности;

3. Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, позволили производить образцы для специальной квалификации на авиационном заводе, что существенно сократило срок изготовления.

4. Расширены возможности применения стандарта ASTM B831 для испытаний авиационных материалов и разработаны требования по изготовлению образцов, обеспечивающие рассеяние характеристик материала на приемлемом уровне;

5. Результаты диссертационной работы использованы при выпуске СТО по испытаниям ФГУП «ЦАГИ», ПАО «Корпорация «Иркут»;

6. Рекомендации, представленные в работе, применялись в ПАО «Ил» при формировании программ испытаний по обеспечению прочности для самолетов Ил-112, Ил-114;

7. Полученные результаты применялись при экспертизе документов по обеспечению прочности и ресурса изделий, разрабатываемых в ПАО «Туполев», МВЗ им. М. Л. Миля, АО «Кронштадт», Honda Aircraft, Epic Aircraft.

На защиту выносятся следующие результаты:

Проекты методик:

«Методика испытаний образцов на прочность при сдвиге в плоскости слоев»;

«Методика испытаний на сдвиг тонких алюминиевых листов»

«Методика испытаний для определения овализации при статическом и циклическом нагружении»

Рекомендации по технологии производства отверстий в элементах авиационной конструкции изготовленных из металлических сплавов и ПКМ

Личный вклад автора заключается в:

1. Постановке задач и выборе методов исследования представленных в диссертационной работе;

2. Личном участии при проведении большого количества экспериментальных исследований в обеспечение выполнения специальной квалификации материалов, на основании которого были разработаны новые редакции методик;

Достоверность определяется большим количеством экспериментальных данных на основании которых были верифицированы результаты работы, использованием аттестованного испытательного оборудования, применением коммерческого программного обеспечения с открытыми теоретическими моделями деформирования композитных материалов и критериев разрушения, достаточным количеством экспериментальных данных для формирования обоснованных заключений.

Внедрение результатов работы

Разработанные методики и рекомендации применяются в рамках исследовательских и текущих работ по определению расчетных характеристик материалов в Лаборатории прочности ФГУП «ЦАГИ». Результаты работы легли в основу СТП по испытаниям ПАО «Корпорация «Иркут» и использовались при проведении специальной квалификации материалов и полуфабрикатов планера самолета МС-21-300 (ПАО «Корпорация «Иркут»), а также вертолетов Ми-38 и Ми-171А2 (АО «МВЗ им. М.Л. Миля»). Получено 3 акта о внедрении результатов: от ПАО «Корпорация «Иркут»; ПАО «Ил»; ФГУП «ЦАГИ».

Соответствие паспорту специальности. Выполненная научно-исследовательская работа соответствует паспорту специальности 05.07.03:

2. Методы обеспечения статической прочности, включая: разработку методов лабораторных испытаний по определению механических характеристик неметаллических материалов и деталей из композиционных материалов, в том числе деталей теплозащиты в условиях нормальных, повышенных и пониженных температур.

4. Методы и средства повышения ресурса и долговечности ЛА и его элементов, включая:

- разработку методов расчетной оценки ресурса и долговечности;
- создание методов ускоренных испытаний;

- разработку технических средств задания, измерения и обработки результатов нагружения ЛА и его элементов, включая элементы из композиционных материалов.

Апробация работы

Результаты работы были апробированы при подготовке доказательной документации по сертификации самолета МС-21-300 по п.613

Результаты работы были представлены на конференциях «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ИМАШ РАН), молодежной конференции ЦАГИ-DLR, ICAS 2016, 2014, Юбилейная конференция СибНИА (2021 г.), 64-я международная конференции МФТИ, Начно-технической конференции комплекса прочности ФГУП «ЦАГИ».

По данному направлению автором было выпущено более 50 научно-технических отчетов. Результаты работы применялись при выполнении международных контрактов.

Дополнительно следует отметить что автор диссертационной работы возглавлял экспертные группы, которые проводили аудит по заказу ПАО «Корпорация «Иркут» испытательных лабораторий в г. Рига и г. Новосибирск.

По результатам работы опубликовано 9 статей из них 3 в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Свиридов А.А., «Развитие методов получения механических свойств полимерных композиционных материалов», журнал «Научный вестник ГосНИИ ГА», №37, 2021 г. С.53-64;
2. В.Н. Басов, А.В. Панков, А.А., Свиридов, В.Я. Сенник, «Некоторые вопросы получения усталостных характеристик современных металлических материалов», журнал «Ученые записки ЦАГИ» принята к публикации.
3. «Моделирование напряженно-деформированного состояния гермофюзеляжа при усталостных испытаниях криволинейных панелей», Борисов М.П., Жаренов И.А., Желонкин С.В., Ковалев Н.И., Свиридов А.А., Фамин К.Ю., Федотов М.А., Щербань К.С., Прочность конструкций летательных аппаратов. Сборник статей

научно-технической конференции. Сер. "Труды ЦАГИ" Под редакцией М.Ч. Зиченкова. 2018. С. 123-125;

4. «Расчётно-экспериментальное исследование овализации зенкованного отверстия в механическом соединении из ПКМ при статическом и циклическом нагружении», Королёва Ю.В., Свиридов А.А., Севастьянов Ф.С., Прочность конструкций летательных аппаратов. Сборник статей научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов». 2017. С. 251.

5. «Prediction of WFD occurrence in longitudinal joints of a fuselage for commercial airplane», Sviridov A.A., Khlebnikova I.G., 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2016. 30. 2016.

6. «Small crack in aluminium structures under static and cyclic loading», Konovalov V.V., Sviridov A.A., 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014. ICAS 2014 CD-ROM PROCEEDINGS. 2014.

7. «Исследование особенностей развития малых усталостных трещин в образцах из алюминиевого сплава 2524-T3», Ботвина Л.Р., Нестеренко Г.И., Солдатенков А.П., Демина Ю.А., Свиридов А.А., Деформация и разрушение материалов. 2016. № 7. С. 39-46.

8. .V. Kulemin, A.S. Kim, A.A. Sviridov, Computational and Experimental Research of Residual Strength by Using R-curve of Material, 11th ONERA-TsAGI Seminar. «Advanced Research in Aeronautics», St. Peterburg, October 9-12, 2012.

9. Ботвина Л.Р., Солдатенков А.П., Демина Ю.А., Нестеренко Г.И., Свиридов А.А., Развитие малых усталостных трещин в образцах из сплава 2524-T3, в сборнике: Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения. Москва, 2016. С. 312-323.

1. Разработка методик испытаний для получения механических свойств авиационных материалов

В данной главе приводится обобщение опыта применения стандартных методик испытаний элементарных образцов (ГОСТы, ОСТы, ASTM, EN и т.д.), которые использовались для получения расчетных характеристик металлических и композитных материалов, применяемых в конструкции планера различных воздушных судов.

Приводятся разработанные проекты методик испытаний для получения механических свойств авиационных материалов, которые позволили увеличить точность и повысить уровень определяемых характеристик

1.1. Расчетные характеристики общие сведения

Обеспечение прочности авиационной конструкции в современной отечественной и зарубежной промышленности базируется на выполнении расчетно-экспериментальных исследований, которые были обобщены в «Building Block» (Пирамида испытаний, рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Пирамида испытаний

На нижнем уровне пирамиды находятся испытания элементарных образцов, результаты которых используются для отработки технологии производства, получения экспериментальных данных для определения расчетных характеристик. Получаемые данные применяются для последующих оценок прочности и ресурса натурной конструкции.

Для металлических материалов данный подход можно сказать, что полностью отработан, так как уже существует стандартный перечень методик расчета и фактически выполнение пирамиды испытаний каждый раз фиксирует возможность их применения для вновь разрабатываемой конструкции, возможно с применением дополнительных поправочных коэффициентов, которые учитывают новые технологические процессы.

Для композиционных материалов ситуация несколько иная. Опыт отечественной авиационной промышленности по внедрению полимерных композитных материалов в силовые элементы авиационной конструкции (лонжероны крыла, центроплан, панели крыла и т.д.) по сравнению с зарубежными партнерами очень невелик. Согласно работе [1.1], применение композитных материалов в конструкциях самолетов транспортной категории в мире началось в 70-х годах. Первым советским самолетом, в котором применялись композитные материалы, стал Ан-72. Композитные материалы преимущественно использовались для обтекателей. Конструкторское бюро Антонова до начала 90-х было лидером по внедрению композитных материалов. На рисунке 1.2 представлен процент применения композитных материалов в самолетах марки Ан.

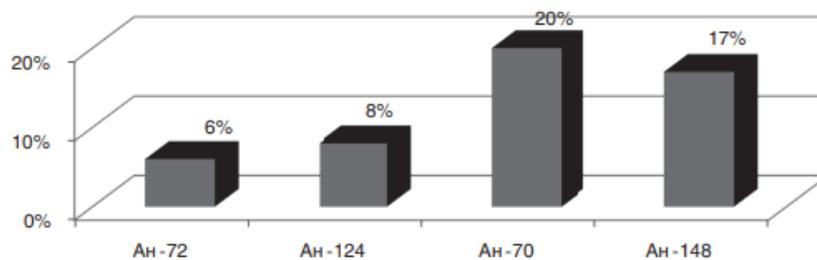


Рисунок 1.2 – Процент применения композитных материалов в самолетах марки Ан

В той же работе [1.1] приводится график увеличения доли композитных материалов с течением времени для зарубежных самолетов (рисунок 1.3), а также таблица с градацией самолетов зарубежного и отечественного производства по процентному содержанию композитных материалов в конструкции (таблица 1.1).

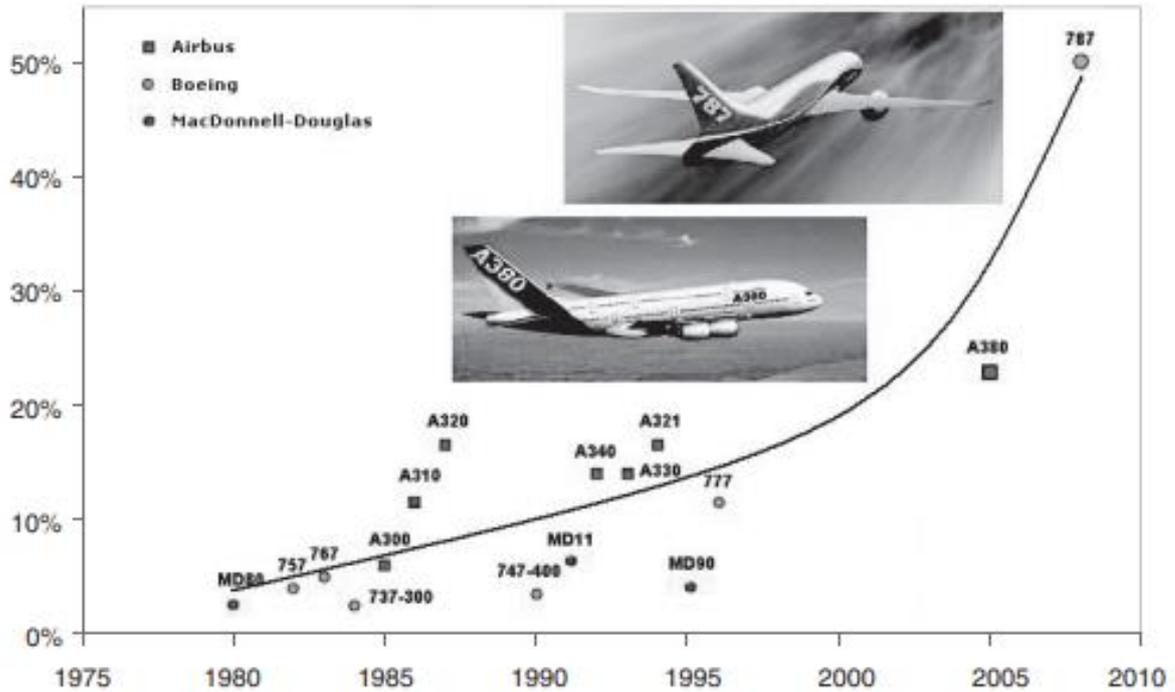


Рисунок 1.3 – Увеличение доли композитных материалов в конструкции зарубежных самолетов

Таблица 1.1 – Градация самолетов по доле композитных материалов в конструкции самолетов

Период эксплуатации	Процентное содержание КМ в конструкции	Тип ВС
1970–1985 гг.	<10	Ан-26, Ан-72, Ан-124, Ил-96, Boeing 747, MD-80, Boeing 767, Boeing 757, Airbus 310, Boeing 737 Classic
1985–2000 гг.	10–25	Ту-204, Ил-114, Ан-70, Ту-334, Ан-148, Airbus 320, ATR 72, Airbus 330/340, Airbus 321, Boeing 737 (NG), Boeing 777, Boeing 747-8, SSJ-100
2000–2014 гг.	25–55	Airbus 380, Boeing 787, Airbus A-350XWB

По представленным данным на рисунке 1.3 и в таблице 1.1 можно сделать вывод, что до определенного момента отечественная и зарубежная авиационная промышленность внедряла композиты одинаковыми темпами, однако в 90-00х

годах за рубежом резко начали активное применение. Указанные в таблице отечественные самолеты с долей композитов 10-25%, за исключением SSJ-100 и Ту-204, в расчет можно не брать, так как машины были произведены мелкой серией. Следует так же отметить, что активному началу увеличения доли композитов в конструкции зарубежных воздушных судов предшествовали десятилетия предварительных исследований.

В работе [1.2] приведено процентное содержание материалов в конструкции самолетов Ту-204/Ту-204СМ, А-350, Boeing 787 (рисунок 1.4).

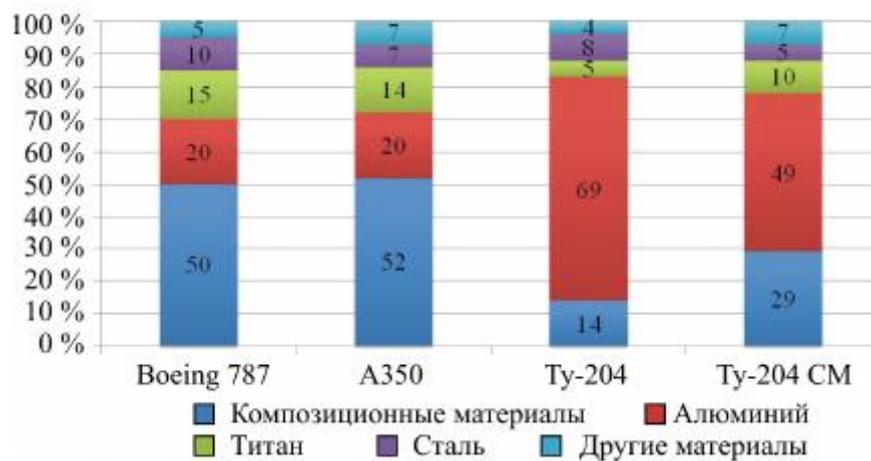


Рисунок 1.4 – Процентное содержание материалов в конструкции

Как видно на рисунке 3, отечественная авиационная отрасль существенно отстает от зарубежных коллег. Согласно [1.2] первым отечественным самолетом, который должен составить конкуренцию зарубежным аналогам должен стать самолет ПАО «Корпорации «Иркут» МС-21-300, доля композитных материалов в которых доведена до 40%, в частности МС-21-300 имеет композитное крыло, которое производится по инфузионной технологии.

Очевидно, что с увеличением доли композитных материалов в конструкции воздушных судов активно развивались методики обеспечения оценки статической и усталостной прочности, которые требуют определенного набора расчетных характеристик. Начальный опыт получения расчетных характеристик показал, что данный класс материалов имеет повышенное рассеяние усталостных характеристик. Повышенное рассеяние приводит к увеличению соответствующего

коэффициента надежности. На рисунке 1.5 приведена зависимость коэффициента надежности от величины рассеяния усталостных характеристик для различного количества испытанных натуральных конструкций.

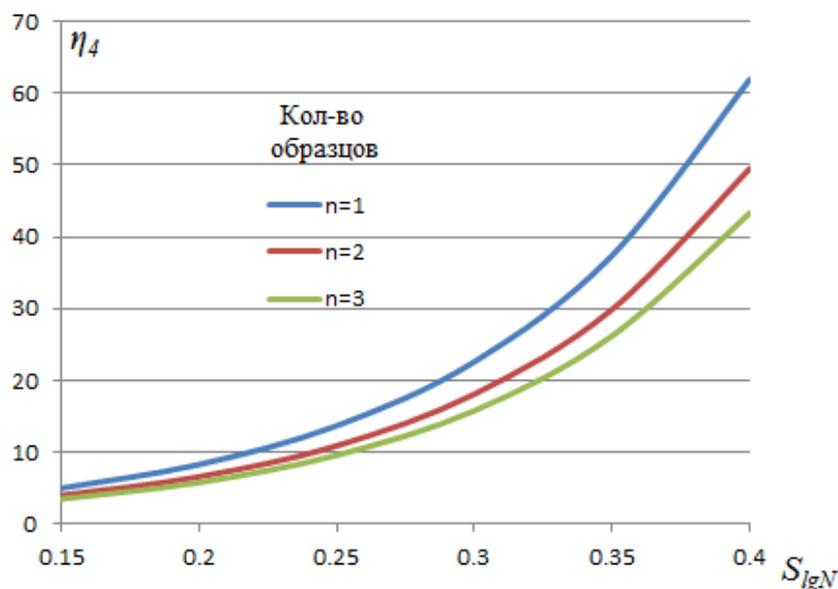


Рисунок 1.5 – Зависимость коэффициента надежности от рассеяния

Рассеяние равное 0,15 принято базовым для металлов и при единичном испытанном экземпляре воздушного судна, рассматриваемый коэффициент надежности равен 4-5. Для конструкций из композиционных материалов рассеяние получается на уровне 0,35-0,4, что приводит к значению коэффициента надежности на уровне 40-60. Учитывая, что ресурс конструкции определяется по формуле:

$$T = \frac{D_{пол}}{\eta_{\Sigma}}$$

где $D_{пол}$ – кол-во циклов до разрушения конструкции; η_{Σ} – суммарный коэффициент надежности, который равен произведению коэффициентов, учитывающих различные факторы, в том числе и рассеяние усталостных характеристик.

Таким образом, имея рассеяние для композитных материалов на уровне 0,35-0,4, происходит занижение ресурса более чем на порядок.

Частью работы было повышение качества проводимых экспериментальных работ по определению расчетных характеристик усталости углепластиков с целью снижения коэффициента надежности и повышению ресурса.

Процесс получения расчетных характеристик называется специальной квалификацией материала.

Требования к расчетным характеристикам содержатся в пункте 613 «Прочностные характеристики материалов и их расчетные значения» авиационных правил, причем, поскольку отечественные нормы (АП-23, 25, 27,29) максимально гармонизированы с нормами прочности США (FAR-23,25,27,29) и Европы (CS-23,25,27,29), 613 пункт является одинаковым по выдвигаемым требованиям в каждом из указанных документов.

Следует так же отметить, что изначально при разработке авиационных правил, поскольку все основные элементы авиационных конструкций были произведены из металлов, выполнение п. 613 глубоко не прорабатывалось для композитных материалов.

В данной работе основными Авиационными правилами были выбраны АП-25, так как все результаты диссертации получены в рамках работ по исследованию свойств металлических и композиционных материалов, применяемых в самолетах транспортной категории.

Требования п.613 по расчетным характеристикам в АП-25 представлены в таблице 1.2. В рамках работ по выполнению данных требований были сформированы цели и задачи диссертации.

Таблица 1.2 – Требования п.613 АП-25

АП-25, п.613 «Прочностные характеристики материалов и их расчетные значения»
(а) Прочностные характеристики материалов должны определяться на основании достаточного количества испытаний с тем, чтобы расчетные значения можно было устанавливать на основе статистики.

(b) Расчетные значения характеристик материала следует выбирать таким образом, чтобы уменьшить вероятность разрушений конструкции из-за непостоянства свойств материалов. За исключением требований, приведенных в пунктах (e) и (f) настоящего параграфа, соответствие должно быть показано путем выбора расчетных значений, которые обеспечивают прочность материала со следующей вероятностью:

(1) 99% - с 95%-ным доверительным интервалом, когда приложенные нагрузки передаются через единичный элемент агрегата, разрушение которого приводит к потере конструктивной целостности агрегата.

(2) 90% - с 95%-ным доверительным интервалом для статически неопределимой конструкции, в которой разрушение любого отдельного элемента приводит к тому, что приложенные нагрузки безопасно распределяются по другим несущим элементам.

(c) Должно учитываться влияние условий окружающей среды, таких как температура и влажность, на расчетные значения, применяемых в ответственных элементах или узлах конструкции материалов, если в диапазоне условий эксплуатации самолета это влияние является существенным.

(d) Для обеспечения возможности выполнения расчетных оценок в соответствии с требованиями параграфа 25.571 (Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции) должны быть определены номенклатура и статистически обоснованные уровни расчетных характеристик усталости и трещиностойкости материалов конструкции.

(e) Могут быть использованы более высокие расчетные значения характеристик материала, если производится «дополнительный отбор» материала, при котором подвергается испытаниям образец-свидетель каждого отдельного элемента перед его использованием, в целях подтверждения, что фактические прочностные свойства этого конкретного элемента будут равны или больше тех, которые использованы в расчете.

(f) Могут быть использованы другие расчетные значения характеристик материала, если они одобрены Компетентным органом.

Для выполнения требований п. 613 АП-25 разработан метод обеспечения соответствия (МОС) конструкции требованиям данного параграфа (МОС 25.613). Данный документ был разработан для композитных материалов, процедуры выполнения специальной квалификации для металлических материалов изложены в Справочнике ОАК по расчетным характеристикам металлических материалов [1.3].

В качестве аналогичного документа отечественному МОСу для ПКМ можно привести зарубежный документ СМН-17 [1.4], в котором глобально описаны процедуры, относящиеся к специальной квалификации, более детально данные процедуры описаны в документе FAA [1.5]. Например, в [1.5] приведены требования по выбору панелей заготовок, рекомендуемый перечень расчетных характеристик и стандарты для их получения. В таблице 1.4 приведен общий объем образцов, который необходимо испытать для получения механических свойств композита, как монослоя, так и типовых укладок, согласно МОС к п.613.

Таблица 1.4 – Перечень образцов для получения механических характеристик

№ пор	Вид нагружения Методика испытания	Тип укладки слоёв	Условия среды и число испытаний на партию препрега				Число испытаний
			STD ¹	RTD ²	ETW ³	ETD ⁴	
1	Растяжение вдоль 0° ГОСТ 25.601	[0]	5×6	5×6	5×6	5×6	120
3	Растяжение вдоль 90° ГОСТ 25.601	[90]	5×6	5×6	5×6	5×6	120
5	Сжатие вдоль 0° ГОСТ 25.602	[0]	5×6	5×6	5×6	5×6	120
7	Сжатие вдоль 90° ГОСТ 25.602	[0]	5×6	5×6	5×6	5×6	120
9	Сдвиг в плоскости слоёв ГОСТ 24778	[0]	5×6	5×6	5×6	5×6	120
10	Сдвиг короткой балки* ОСТ190199	[0/90]		5×6			30

STD¹ – температура испытаний равна минимальной эксплуатационной температуре, содержание влаги в образце – в состоянии поставки, т.е. кондиционированные в лабораторных условиях не менее 120 часов (лабораторная атмосфера 23/50 по ГОСТ 12423).

RTD² – условия соответствующие лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423 (температура 23°C), содержание влаги в образце – в состоянии поставки.

ETW³– температура испытаний равна максимальной эксплуатационной температуре, содержание влаги в образце – максимальное эксплуатационное.

ETD⁴ – температура испытаний равна максимальной эксплуатационной температуре, содержание влаги в образце – в состоянии поставки.

Как можно понять из таблицы 1.4, для полного получения механических свойств монослоя с учетом влияния климатических факторов, необходимо провести испытания 630 образцов, что в свою очередь является очень затратной процедурой.

В таблице 1.5 приведен перечень отечественных и зарубежных стандартов для определения механических свойств из таблицы 4.

Таблица 1.5 – Отечественные и зарубежные стандарты для получения механических свойств

№	Метод испытаний	Метод определения	
		Россия	Аналог
1	Прочность и модуль упругости при растяжение	ГОСТ 25.601, ГОСТ 11262	ASTM D 3039/D3039M, ASTM D 4018, CEN EN 2561, JIS K7073, SACMA SRM 9
2	Прочность и модуль упругости при сжатии	ГОСТ 25.602, ГОСТ 9550	SACMA SRM 1 ASTM D 6641
3	Прочность и модуль упругости при сдвиге в плоскости	ГОСТ Р 50578 ГОСТ 24778	ASTM D5379
8	Прочность при межслоевом сдвиге методом короткой балки	ОСТ190199	ASTM D 2344 SACMA SRM 8

Следует отметить следующий факт, что приведенные в таблице 1.5 методики не ограничены в применении по отраслям промышленности и не учитывают

специфики композитных материалов и полуфабрикатов, применяемых в авиационной промышленности. Основной особенностью получения расчетных характеристик для авиационных конструкций является статистическая обработка экспериментальных данных и наличие высоких требований по уровню достоверности расчетных значений. Следовательно, методики испытаний должны давать возможность материалу реализовать максимально свои свойства и обеспечить минимальное влияние методов проведения испытаний на результат (уменьшить рассеяние).

В таблице 1.6 приведена общая ситуация с методиками получения расчетных характеристик для металлических материалов и композиционных, которые могут применяться для получения расчетных характеристик в отечественной авиастроительной отрасли (данные приведены из личной практики).

Таблица 1.6 – Обобщенная ситуация с нормативными документами по испытаниям

	Расчетные характеристики	Стандарты		Кол-во образцов
		Надо	Есть	
Металлы	25	10+	10	7 000-8000
ПКМ	47	35	5	≥20000

Для металлических материалов в таблице 1.6 указано необходимость 10+ стандартов, это подразумевает, что некоторые методики испытаний не охватывают всю номенклатуру металлических полуфабрикатов. Например, ОСТ1 90148-74 не позволяет испытывать на срез алюминиевые полуфабрикаты с толщиной менее 3 мм. В рамках данной работы был разработан проект соответствующей методики, который указанный пробел закрывает.

Следует заметить, что для металлических материалов существуют готовые справочники по расчетным характеристикам, в то время как для композитных материалов аналогичных справочников нет.

Для зарубежных металлических материалов существует MMPDS (Metallic Materials Properties Development Standardization) Handbook [1.6], в котором

приведены статистически обоснованные расчетные характеристики для аэрокосмических материалов, а отечественным аналогом данного документа является Справочник ОАК [1.5].

Отсутствие справочников для композитов, обусловлено большой вариативностью материалов, различными методиками прогнозирования прочности конструкции, которые требуют большой спектр расчетных характеристик. Дополнительно следует отметить, что методики по композитам не имеют такой общемировой унификации в части теоретических основ, как методики по металлическим элементам воздушного судна.

Основываясь на приведенных данных в данном разделе, можно сделать вывод, что опыт применения композитов, в частности углепластиков, не большой, количество различных характеристик необходимых для определения достаточно существенно. В следующих разделах главы приводятся этапы разработки новых проектов методик и рекомендации по проведению испытаний, которые являются результатом проведения специальной квалификации материалов планера МС-21.

1.2. Испытания на растяжения

Испытания на растяжения являются одними из основных в процессе определения механических свойств композиционных материалов. В процессе проведения испытаний определяется предел прочности на растяжение и модуль упругости.

Стандартными методиками для проведения испытаний на растяжение являются соответствующая методика ФГУП «ЦАГИ», ASTM 3039 и ГОСТ Р 56785-2015, который в свою очередь является адаптацией ASTM 3039. Основными различиями данных методик является геометрия образца. На рисунках 1.5 и 1.6 представлена геометрия образца для методики ФГУП «ЦАГИ» и ASTM 3039/ГОСТ Р 56785-2015.

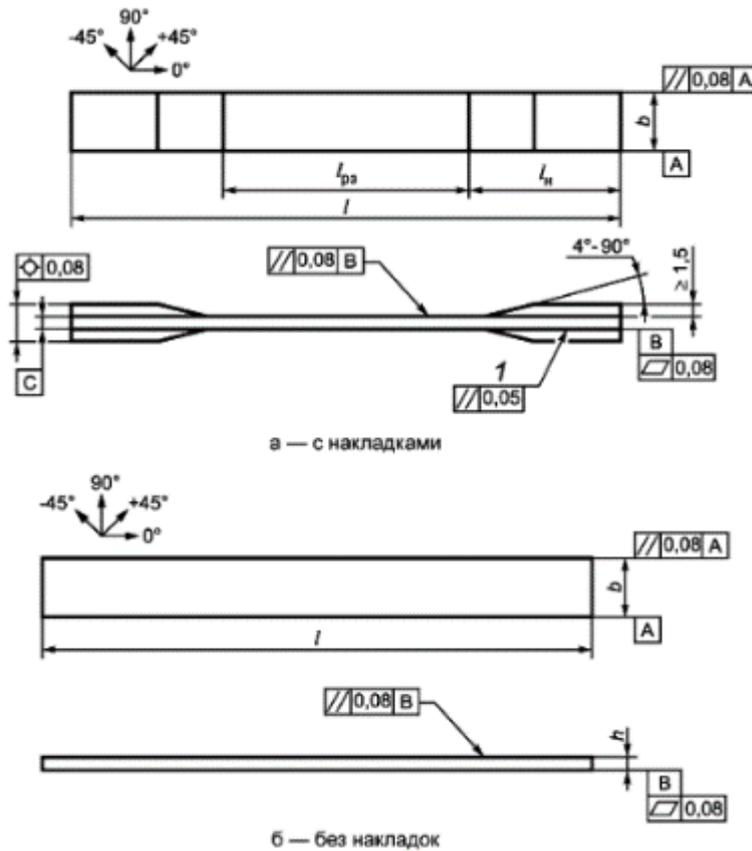


Рисунок 1.5 – Геометрия образца согласно ASTM 3039/ ГОСТ Р 56785-2015

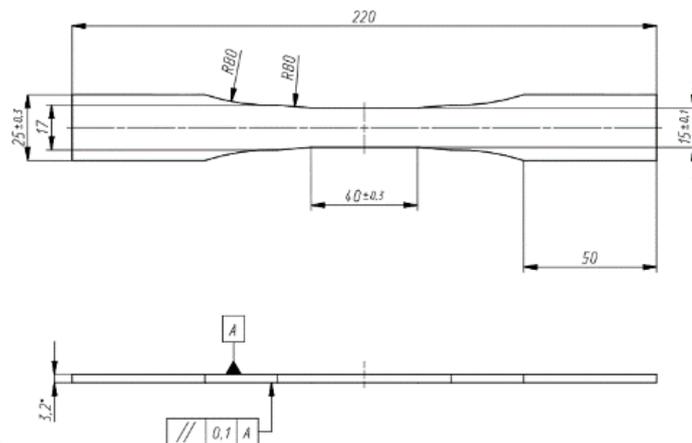


Рисунок 1.6 – Геометрия образца согласно методике ФГУП «ЦАГИ»

Как можно понять из рисунков 1.5 и 1.6, геометрия образцов существенно отличается. Образец «ЦАГИ» является универсальным для испытаний на сжатие и растяжение. Единственным ограничением его применения является укладка однонаправленная вдоль 0° , поскольку в данном случае сдвиговые напряжения в

зоне захватов будут приводить к незачетному разрушению. Разрушение происходит по сечениям, изображенным на рисунке 1.7.

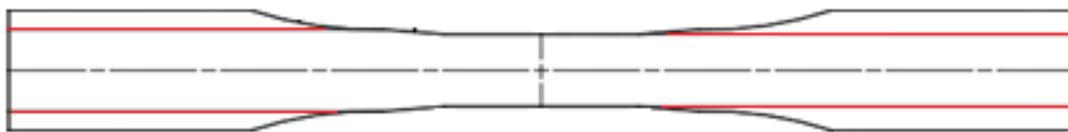


Рисунок 1.7 – Сечения, в которых происходит преждевременное разрушение по моде «сдвиг»

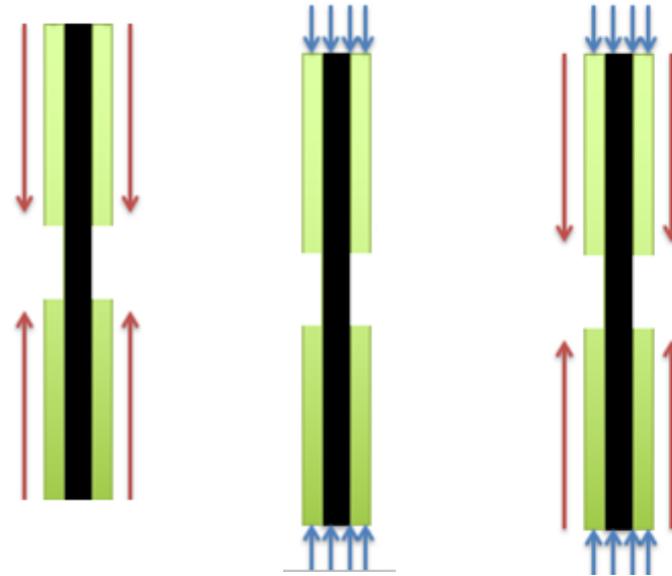
Соответственно после разрушения образец приобретает форму прямоугольника, поэтому в стандарте «ЦАГИ» для нулевой однонаправленной укладки рекомендуется образец эквивалентный ASTM.

Равнозначность данных методик и соответственно геометрий образцов была подтверждена автором диссертации более чем на 300 образцах. Результаты испытаний, полученные по данной методике, сравнивались с результатами производителя испытываемого материала [1.7]. Различие было в пределах 1-2 %, что соответствовало коэффициенту вариации экспериментальных данных.

Основным направлением доработки данных методик – направление организации и проведения испытаний образцов с толщиной более 2,5 мм, так как в приведенных методиках максимальная указанная величина толщины равнялась 2,5 мм.

1.3. Испытания на сжатие

Для определения предела прочности при сжатии и модуля упругости композитных материалов существует методика ФГУП «ЦАГИ», ГОСТ 33519-2015, ASTM D3410, ASTM D695, ASTM D6641. Фактически ГОСТ 33519-2015 является адаптацией сразу трех указанных ASTM, в которых применяется различный метод приложения нагрузки к образцу, а также используются различные приспособления для нагружения. На рисунке 1.8 изображено различие в приложении нагрузки по трем ASTM.



ASTM D3410

ASTM D695

ASTM D6641

Рисунок 1.8 – Приложение нагрузки на образец согласно ASTM D3410,695,6641

В методике ЦАГИ используется метод передачи нагрузки сдвигом.

Геометрия образцов для методики ЦАГИ различается существенно по сравнению с приведенными зарубежными стандартами, а также ГОСТ 33519-2015, однако это не является основной особенностью данных методик. Основные усилия исследователей были приложены к изготовлению противоизгибных приспособлений.

Первый стандарт ASTM D3410 появился в 1971 году и был выпущен Celanese Corporation (США) [1.7]. На рисунке 1.9 представлено предложенное противоизгибное приспособление.

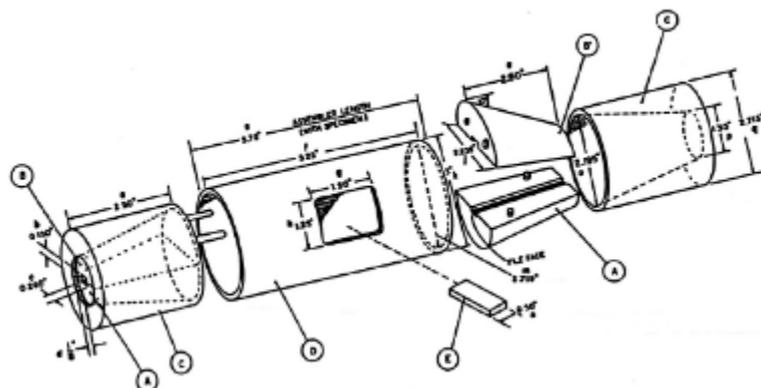


Рисунок 1.9 – Первое противоизгибное приспособление

Представленное на рисунке 1.9 противоизгибное приспособление было достаточно массивным, требовало большой точности при производстве образца и самого приспособления.

В 1977 году специалисты исследовательского института ПТРИ (США) доработали приспособление [1.8] и в 1987 году им удалось получить одобрение ASTM для включения своего приспособления в ASTM D3410 как метод Б. На рисунке 1.10 представлено предложенное ПТРИ и носящее соответствующее название противоизгибное приспособление.

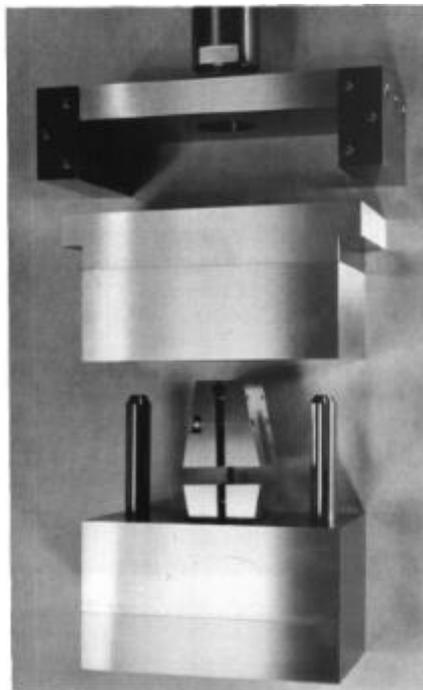


Рисунок 1.10 – Противоизгибное приспособление ПТРИ

Приспособление ПТРИ дает хорошие результаты, однако очень массивно (вес около 40 кг), дорогое при производстве (в виду массивных нижнего и верхнего блоков), а также требует очень высокотехнологичного производства, так как проблематично выдержать угол в 10° для клиновидных захватов и клиновидных вставок [1.9]. Дополнительным недостатком является то, что данное приспособление может быть использовано только при комнатной температуре, так как очень много времени необходимо, чтобы образец и приспособление пришли в температурное равновесие.

Альтернативный метод испытаний на сжатие был предложен в ASTM D695 [1.10], [1.11], где нагрузка на образец передавалась через нагружение торца. Данный метод имеет свое противоизгибное приспособление (рисунок 1.11).

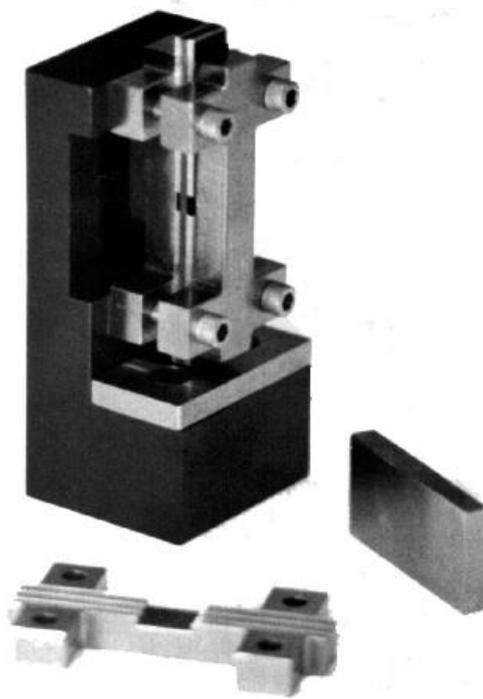


Рисунок 1.11 – Противоизгибное приспособление ASTM D695

Основными недостатками данного метода являются: необходимость двух изолированных образцов для определения предела прочности при сжатии и модуля упругости и возможность передачи части нагрузки за счет трения на приспособлении. Соответственно данный метод не желателен для применения при получении расчетных характеристик [1.12], [1.13], [1.14].

Самым последним методом проведения испытаний на сжатие был принят ASTM 6641 [1.15], [1.16]. Метод заключается в передаче нагрузки через торец образца и сдвигом, а также использует новое противоизгибное приспособление. Разработан проект ASTM D6641 был в университете Вайоминга (University of Wyoming). В данном стандарте авторы постарались учесть весь предыдущий опыт испытаний по имеющимся стандартам. На рисунке 1.12 представлено противоизгибное приспособление согласно ASTM D 6641.

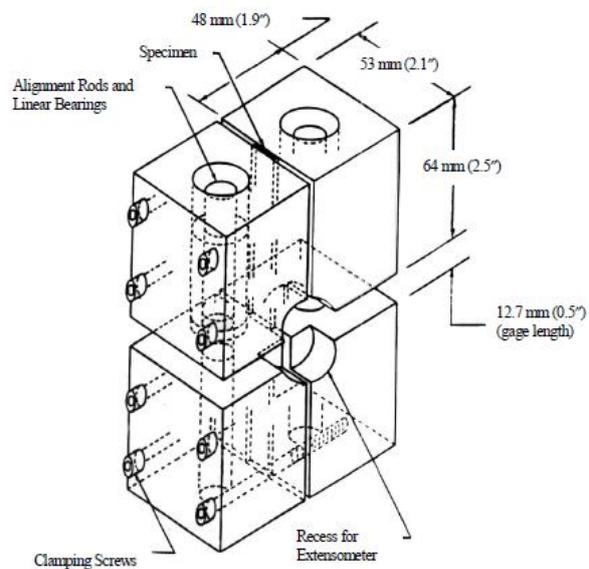


Рисунок 1.12 – Приспособление ASTM 6641

Данный метод отличается более низким коэффициентом вариации экспериментальных данных, более простым изготовлением противоизгибного приспособления. Для углепластика AS4/3501-6 были представлены результаты по используемому при испытаниях моменту затяжки болтов и получаемых характеристиках [1.15]. Данные представлены на рисунке 1.13.

Configuration	Bolt Torque	Strength
	[N-m]	[MPa]
Special Laminates		
$[90_4/0/90_4]_s$	11.3	2909
$[90_4/0/90_4]_s$	1.7	2827
$[(\pm 60)_2/0/(\pm 60)_2]_s$	1.7	2758
$[90_2/0_2/90_4]_s$	2.8	2482
$[90_2/0_2/90_4]_s$	5.7	2268
General Laminates		
$[(\pm 30)_2/0_3/(90)_2]_s$	1.7	1027
$[(\pm 45/0_2)/90]_s$	4.5	1924
$[\pm 45/0/90]_{2s}$	2.8	2151
$[(\pm 45)_2/0_3/\pm 45]_s$	2.3	1820
$[(\pm 45)_2/0_3/90_2]_s$	2.3	1607
$[(\pm 45)_2/90/0]_{2s}$	2.8	1896
$[(\pm 45)_2/90_3/0_2]_s$	2.3	1634
Cross-Ply		
$[90/0]_{3s}$	1.7	1427
$[90/0]_{3s}$	1.7	1731
$[90/0]_{5s}$	2.8	1965
$[90/0]_{5s}$	4.0	1993
$[0/90]_{3s}$	2.3	1620
$[0/90]_{3s}$	2.8	1696
$[0/90]_{3s}$	4.6-13.6	1627
$[0/90]_{5s}$	3.4	1710

Рисунок 1.13 – Момент затяжки болтов в приспособлении ASTM 6641 и получаемые результаты

Данные представленные на рисунке 1.13 имеют большую практическую значимость, так как в ASTM 6641 предлагается подбирать момент затяжки болтов в процессе подготовки к испытаниям. Используя представленные данные можно предварительно оценить необходимый момент. Дополнительно следует отметить, что образцы для испытаний должны быть изготовлены с большой степенью точности, та как в противном случае будет постоянно происходить смятие торцов, что является не зачетным разрушением.

Отечественная нормативная документация по испытаниям на сжатие представлена методикой «ЦАГИ» и ГОСТ 33519-2015, который как уже было сказано является адаптацией всех ASTM по данному направлению и интеграцией их в один документ.

Методика ЦАГИ подразумевает испытания по методу передачи нагрузки сдвигом и рекомендует противоизгибное приспособление, представленное на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Противоизгибное приспособление в соответствии с методикой «ЦАГИ»

В приспособлении сделана свободная зона шириной равной четырем толщинам образца и овальное отверстие для установки экстензометра для измерения относительных деформаций. Представленное приспособление является простым в изготовлении, очень быстро монтируется на образец и на практике подтвердило возможность получения экспериментальных данных с минимальным рассеянием и достаточно высокими значениями получаемых пределов прочности относительно прогнозируемых значений. Основными моментами, которым необходимо уделить повышенное внимание при проведении экспериментов с помощью приспособления «ЦАГИ» являются момент затяжки болтов (как правило, находится на уровне 1-2 Nm) и жесткость самого приспособления, перед проведением испытаний необходимо убедиться, что не происходит общей потери устойчивости образца с приспособлением. В рамках работ по специальной квалификации материала фирмы Hexcel, с помощью методики «ЦАГИ» были получены экспериментальные результаты с коэффициентом вариации около 2%, которые хорошо согласовывались с данными производителя материала, который в свою очередь проводил экспериментальные исследования

согласно ASTM D3410. Соответственно было подтверждена эквивалентность данных методик.

На рисунке 1.15 представлены эскизы образцов, рекомендуемые согласно методике «ЦАГИ» и ASTM.

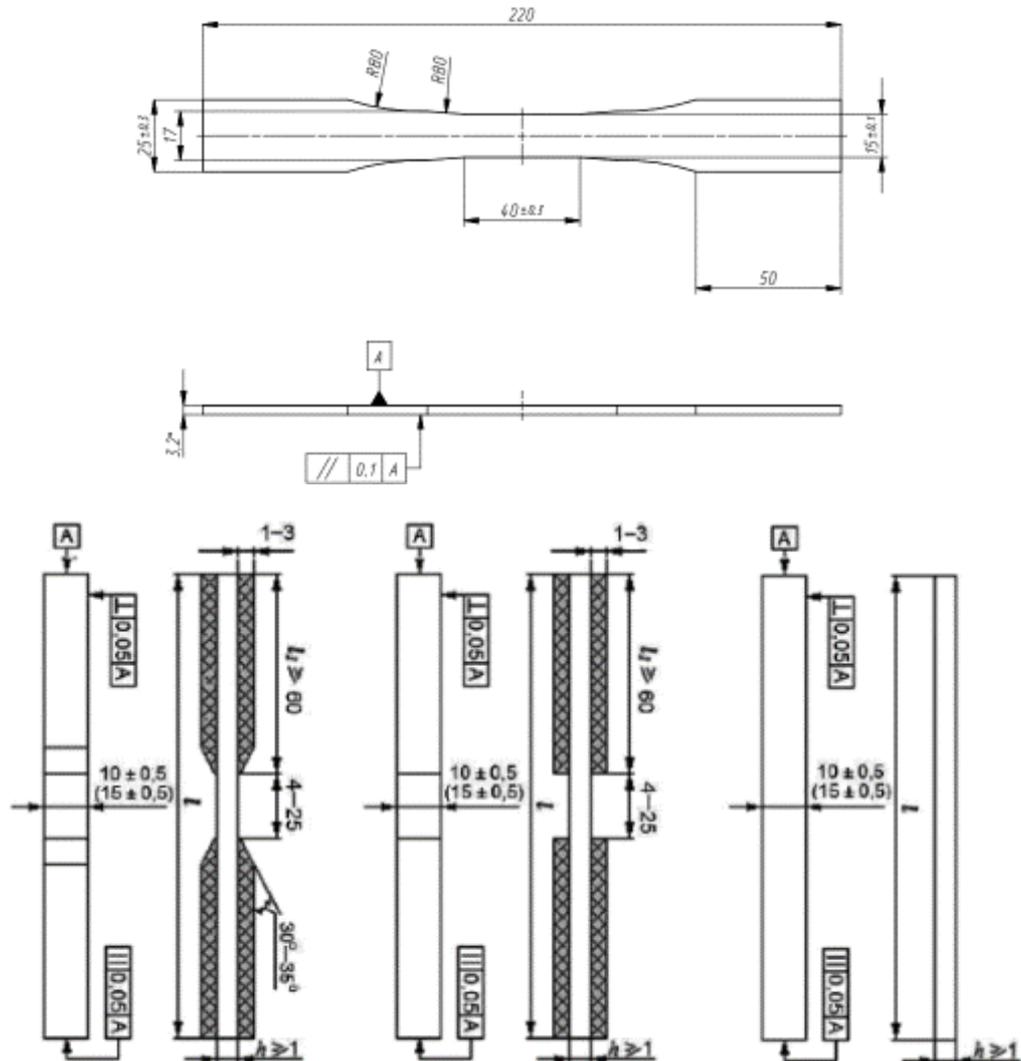


Рисунок 1.15 – Образцы применяемые по методике «ЦАГИ» и ASTM

В соответствии с рисунком 1.15 для методики «ЦАГИ» используется образец аналогичный методике на растяжение. Основным достоинством данного образца является его универсальность и отсутствие необходимости наклеивать дополнительные накладки, что существенно снижает трудоемкость проведения испытаний.

В представленных методиках, как и в методиках на сжатие, строго не регламентируется толщина образца, а весь имеющийся опыт их применения

базируется преимущественно на толщинах образцов 2-4 мм. Соответственно остро стоит задача подтверждения работоспособности существующих методик или их доработка для образцов с большой толщиной.

В дополнение к вышесказанному в данном разделе, хочется отметить, что широко распространено мнение, что композиты, как и металлы должны иметь сопоставимые механические свойства при сжатии и растяжении, однако для композитов, характеристики при сжатии существенно ниже. Как правило, при получении заниженных по отношению к растяжению характеристик, технологи производства грешат на методы испытаний, а экспериментаторы стараются максимально доработать приспособления для устранения так называемой Эйлеровой потери устойчивости. Несмотря на большее количество различных приспособлений и методов испытаний, характеристики при сжатии и сегодня существенно ниже характеристик при растяжении.

Согласно работе [1.17], данный эффект может быть связан с тем, что поскольку матрица и наполнитель имеют сильно отличающиеся значения коэффициента теплового расширения, в процессе производства волокно в пакете становится не идеально ровным, а волнистым с определенным преднапряжённым состоянием, что при ярко выраженном эффекте называется «свилеватостью» и требует доработки технологического процесса. Данное преднапряженное состояние при растяжении увеличивает значение предела прочности, а при сжатии уменьшает, поскольку реализуются разные моды разрушения. При растяжении происходит перегруз волокна и его растяжение, а при сжатии микропотеря устойчивости каждого слоя. Данный эффект не связан с Эйлеровской потерей устойчивости. На рисунке 1.16 представлена мода разрушения при сжатии с микропотерей устойчивости.

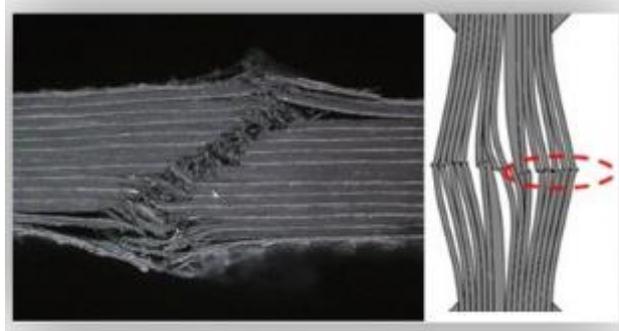


Рисунок 1.16 – Мода разрушения при сжатии

Изображенная на рисунке 15 мода разрушения требует дальнейшего более детального изучения, так как это оказывает существенное влияние на получаемые расчетные характеристики при сжатии.

1.4. Разработка методики испытания на сдвиг ПКМ

При проведении испытаний по специальной квалификации необходимо определять предел прочности на сдвиг (τ_{12}) в плоскости листа. В отечественной нормативной базе для данного вида испытаний был предусмотрен ГОСТ 24778-83. На рисунке 1.17 представлены эскизы образцов, которые рекомендованы в соответствии с данным стандартом.

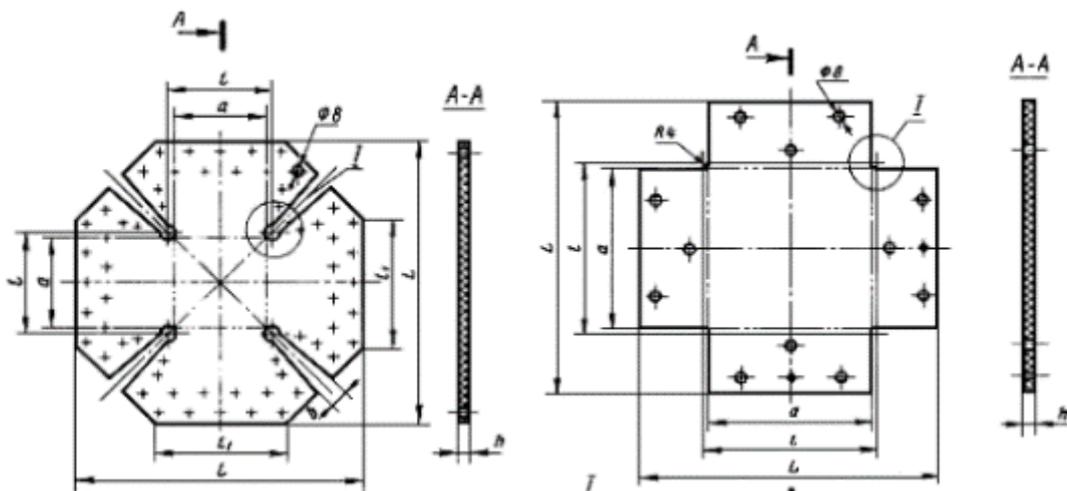


Рисунок 1.17 – Эскизы образцов в соответствии с ГОСТ 24778-83

На рисунке 1.18 представлен образец в составе оснастки для проведения испытаний.

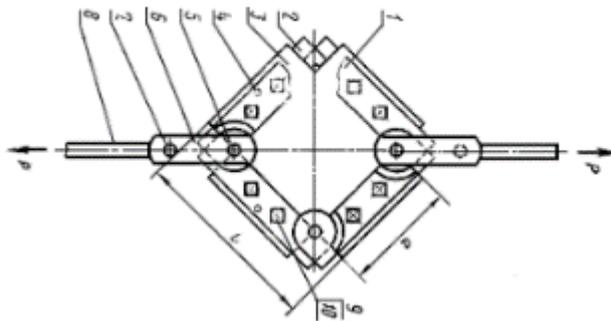


Рисунок 1.18 – Образец по ГОСТ 24778-83 в составе испытательной оснастки

Опыт применения данного ГОСТа на более чем 60 образцах показал, что в части получения сдвигового модуля, данный стандарт позволяет получить корректные результаты, а в части получения предела прочности на сдвиг не позволяет материалу реализовать максимально свои свойства из-за получения разрушения в незачетной зоне. Значения предела прочности на сдвиг было получено существенно заниженное, более чем в 2 раза. На рисунке 1.19 представлено типовое незачетное разрушение.



Рисунок 1.19 – Типовое незачетное разрушение по ГОСТ 24778-83

Данный ГОСТ 24778-83 возможно был разработан преимущественно для стеклопластиков и углепластиков с небольшим пределом прочности на сдвиг. У исследуемого материала предел прочности на сдвиг был около 50 кгс/мм^2 в соответствии с паспортными данными. Такой уровень характеристик характерный

для углепластиков, которые применяются в силовых элементах авиационной конструкции.

Зарубежным аналогом ГОСТ 24778-83 является DIN SPEC 4885, стандарт, разработанный в Германии. На рисунке 1.20 представлен образец с приспособлением для испытания в составе испытательной машины.

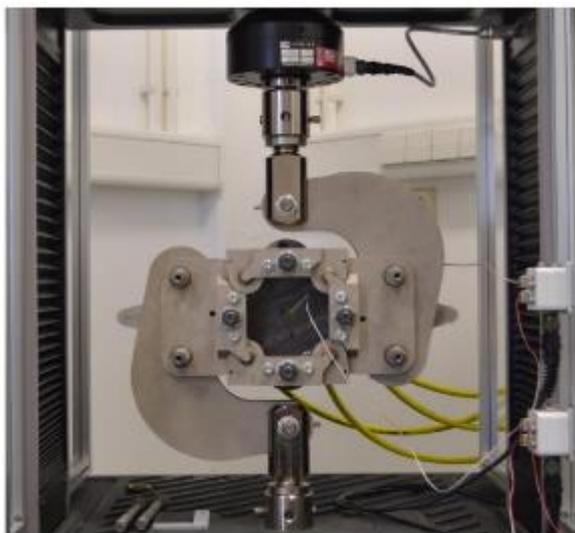


Рисунок 1.20 – Образец в соответствии с DIN SPEC 4885 в составе испытательной машины

Оба указанных стандарта проблематично использовать в массовом эксперименте, в первых из-за очень сложного приспособления для проведения испытаний, не каждая лаборатория сможет его спроектировать и изготовить, во-вторых из-за большой трудоемкости по монтажу образца в приспособление и испытательную машину. Дополнительно следует отметить достаточно большое количество материала необходимое для производства образцов, а также повышенная трудоемкость их изготовления [1.18].

Основываясь на вышесказанном, а также принимая во внимание, что, используя образцы в соответствии с ГОСТ 24778-83 не удалось получить необходимый уровень характеристик на сдвиг, было принято решение разработать проект стандарта для испытания на сдвиг.

Поскольку существовало большое количество зарубежных стандартов для получения предела прочности на сдвиг, в литературе было найдена сравнительная

таблица основных стандартов [1.19]. На рисунке 1.21 представлена таблица сравнения типовых стандартов для определения предела прочности на сдвиг.

Test Method (with ASTM Std. No., if applicable)	Uniform Shear Stress State	Shear Strength Obtained	Shear Stiffness Obtained
Short Beam Shear (D 2344)			
Iosipescu Shear (D 5379)			
$\pm 45^\circ$ Tensile Shear (D 3518)			
Two-Rail Shear (D 4255)			
Three-Rail Shear (D 4255)			
Double-Notched Shear (D 3846)			
Torsion of a Thin Tube (D 5448)			
Cross-Beam Sandwich			
Torsion of a Solid Rod			
Four-Point Shear			
Picture Frame Shear			
Plate Twist			
10° Off-Axis (Tensile)			
V-Notched Rail Shear (D 7078)			

Рисунок 1.21 – Сравнение основных стандартов для определения предела прочности на сдвиг.

Как можно увидеть на рисунке 1.21, существует три стандарта для получения сдвигового модуля и предела прочности на сдвиг – это ASTM D 5379 (Iosipescu Shear), ASTM D 5448 (Torsion of a Thin Tube), ASTM D 7078 (V-Notched Rail Shear). ASTM D5448 не рассматривался в качестве базового стандарта для проекта методики, поскольку образцы трудноизготавливаемые и не могут быть произведены в рамках типового производства авиационного завода. Намного проще производить плоские образцы из типовых композитных панелей. Образцы такого типа используются в оставшихся двух стандартах. На рисунке 1.22 представлены образцы и приспособления для испытаний согласно ASTM D 5379 и D 7078.

ASTM D 5379



ASTM D 7078

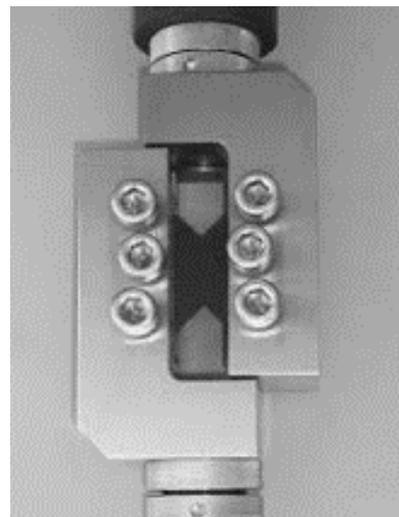


Рисунок 1.22 – Приспособления и образцы в соответствии со стандартами ASTM D 5379 и D 7078

Дополнительно следует упомянуть метод испытания Two Rail Shear Method (ASTM D 4255). Приспособление для данного метода испытаний представлено на рисунке 1.23.



Рисунок 1.23 – Приспособление для испытания Two Rail Shear

Фактически получается, что ASTM D7078 является комбинацией двух методов испытаний ASTM D5379 и Two Rail Shear, с устранением слабой стороны каждого из них. Слабыми сторонами ASTM D5379 являются: малая площадь зоны, где реализуется равномерный сдвиг; нагружение через торец образца, что может привести к преждевременному разрушению в торце, а не в зачетной зоне; невозможность зачетно разрушить материалы с высоким модулем сдвига. Для метода Two Rail Shear основным опасным моментом является захватная часть

образца, поскольку образец закрепляется болтами, что создает дополнительную концентрацию напряжений [1.20], [1.21].

Основным слабым местом для ASTM D 7078 является момент затяжки болтов, поскольку образцы фиксируются в приспособлении сжимающими усилиями от болтов, по типу захватов испытательной машины, однако момент затяжки болтов регулирует специалист, проводящий испытания. Согласно ASTM D7078 рекомендуется момент затяжки болтов $55 H \times m$. В работе [1.22] показано, что момент затяжки болтов существенно влияет на получаемый результат. На рисунке 1.24 представлены результаты испытаний с использованием различного момента.

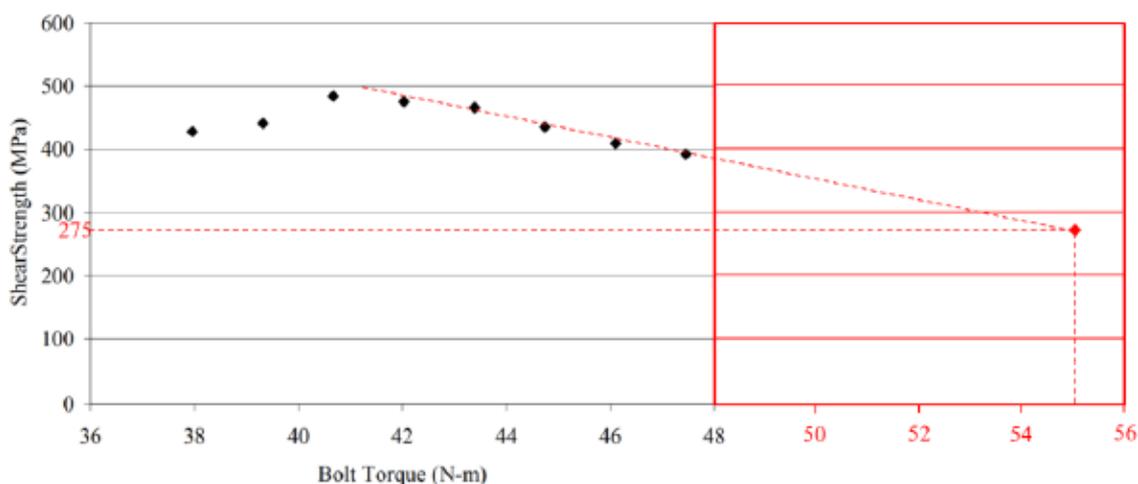


Рисунок 1.24 – Испытания с использованием различного момента затяжки

Согласно результатам данного исследования, оптимальным моментом является $42 H \times m$, а при моменте, превышающем данный и вплоть до $55 H \times m$, прочность падает от 20 до 40%. Данное падение обусловлено повышенными сжимающими напряжениями и зоной концентрации на границе захватной части образца. Следует так же отметить, что данный эффект очень сильно зависит от рисунка насечки на фиксирующих пластинах. Поскольку при большой высоте зубцов на поверхности пластин при определенном моменте могут разрушаться верхние слои образца, что приведет к преждевременному разрушению.

В таблице 1.7 представлены результаты сравнительных испытаний по определению сдвига, которые были опубликованы в работе [1.24].

Таблица 1.7 – Сравнительные испытания на сдвиг

Укладка	Стандарт испытаний	Среднее напряжение сдвига, МПа	Среднеквадратичное отклонение, МПа	Коэффициент вариации, %
[0/90] _{4S}	ASTM D7078	136	0,7	0,5
	ASTM D 4255	Испытания не проводились		
	ASTM D 5379	148	3,4	2,3
[0/90/±45] _{2S}	ASTM D7078	418	32,8	7,8
	ASTM D 4255	158	6,7	4,2
	ASTM D 5379	195	13,9	7,1
[±45] _{4S}	ASTM D7078	530	26,2	4,9
	ASTM D 4255	167	4,2	2,5
	ASTM D 5379	164	9,9	6,0

Представленные сравнительные испытания показали, что ASTM D7078 позволяет получать максимальные результаты предела прочности на сдвиг, что очень важно в рамках определения расчетных характеристик, полученные величины рассеяния являются удовлетворительными.

На рисунке 1.25 представлены результаты испытаний по двум стандартам ASTM D7078 (V-notch) и D 5379 (Iosipescu) полученные в работе [1.25]. Для ASTM D 7078 использовались различные моменты затяжки болтов.

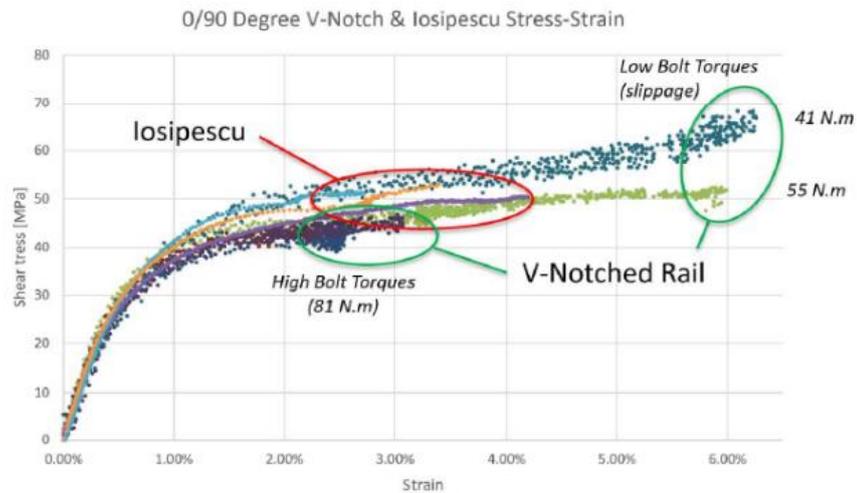


Рисунок 1.25 – Результаты испытаний по ASTM D7078 и D 5379

На графика деформирования образцов с укладкой [0/90], представленных на рисунке 1.25 четко видно, что при моменте затяжки болтов $81 \text{ Н}\times\text{м}$, предел прочности на сдвиг практически одинаковый по двум стандартам; для $55 \text{ Н}\times\text{м}$ получены значительно выше предельные деформации; для $41 \text{ Н}\times\text{м}$ получен значительно выше предел прочности на сдвиг с более высокими значениями предельных деформаций. Представленные данные хорошо согласуются с данными приведенными выше.

На рисунке 1.26 представлены данные по испытаниям образцов с укладкой [+45/-45] для которых значение сдвига будет максимально. Испытания так же проводились по двум стандартам [1.25].

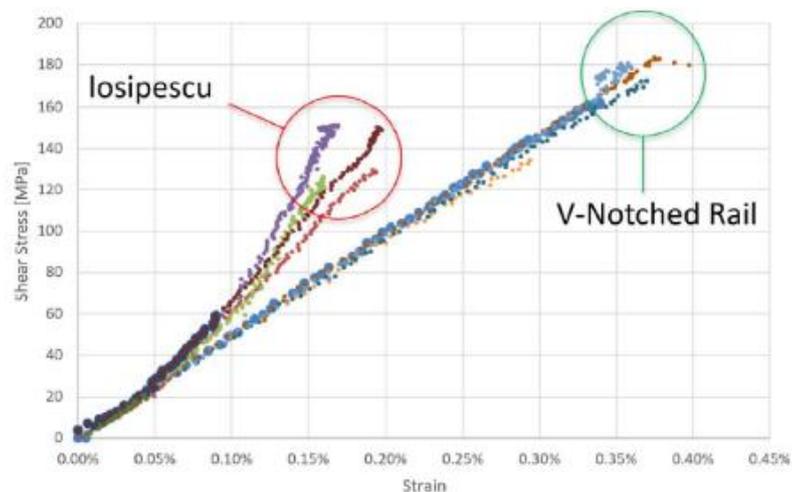


Рисунок 1.26 – Испытание образцов с укладкой [+45/-45] по ASTM D7078 и D5379

Представленные графики деформирования показывают, что ASTM D7078 позволяет получать более высокие данные, как по значению сдвига, так и по предельным деформациям.

Основываясь на представленных данных, было принято решение взять за основу проекта методики по определению предела прочности на сдвиг в плоскости листа ASTM D7078.

К моменту разработки проекта методики был сформирован собственный опыт применения данного ASTM, в результате которого были разработаны дополнительные доработки.

В первую очередь следует отметить, что ASTM D7078 предполагает проведение испытаний образцов с рекомендуемой толщиной порядка 3-4 мм, что далеко не покрывает весь спектр толщин в силовой части конструкции композитных региональных самолетов. Для такого типа воздушных судов в различных зонах конструкции могут применяться ПКМ с толщиной 5 мм и существенно более.

Для проведения испытаний по ASTM D7078 были выбраны образцы толщиной 6,28 мм, которые были изготовлены из углепластика (наполнитель углеродная лента). Образцы изготавливались по технологии вакуумной инфузии. Приспособление для испытаний было заказано у производителя, который имел лицензию на производство.

В результате испытаний оказалось, что для предотвращения выскальзывания образцов толщиной 6,28 мм необходимо закручивать болты с моментом $95 \text{ Н}\times\text{м}$, на что не было рассчитано стандартное приспособление. В результате через несколько испытаний было получено разрушение болтов оснастки. Разрушение представлено на рисунке 1.27.



Рисунок 1.27 – Разрушение болта в стандартной оснастке.

После высверливания болта, было обнаружено, что само тело приспособления также не рассчитано на такие величины моментов, что привело к срыву резьбы.

Дополнительно при самостоятельном изготовлении из высокопрочной стали зажимных пластин («губок»), представленных на рисунке 1.28, зафиксировано, что их не следует подвергать закаливанию.

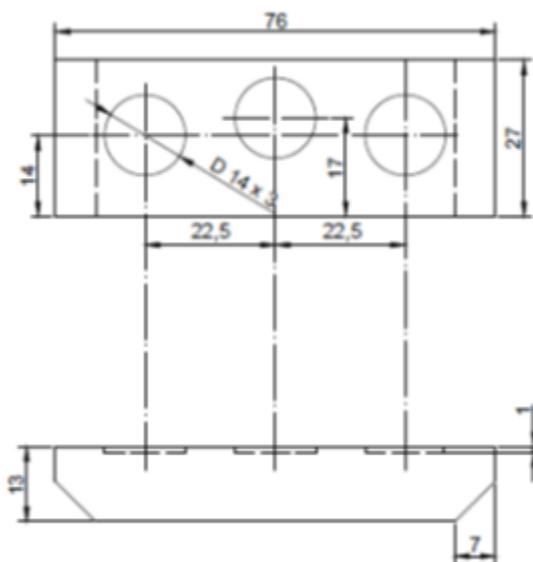


Рисунок 1.28 – «Губки» для фиксации захватных частей образца

При закалке «губок» повышается их хрупкость, что приводит к их разрушению от изгиба при затягивании образца большими моментами, так как

зажать образец сразу равномерно не получается, соответственно относительно центрального фиксирующего болта будут создаваться моменты на краях губок.

В процессе проведения испытаний с доработанным приспособлением и измененной процедурой испытаний были получены зачетные разрушения образцов и высокие значения характеристик предела прочности на сдвиг, которые находились в согласии с данными паспорта на материал. Коэффициент вариации экспериментальных данных по напряжениям и сдвиговому модулю не превышает 4%. На рисунке 1.29 представлено типовое разрушение образца.

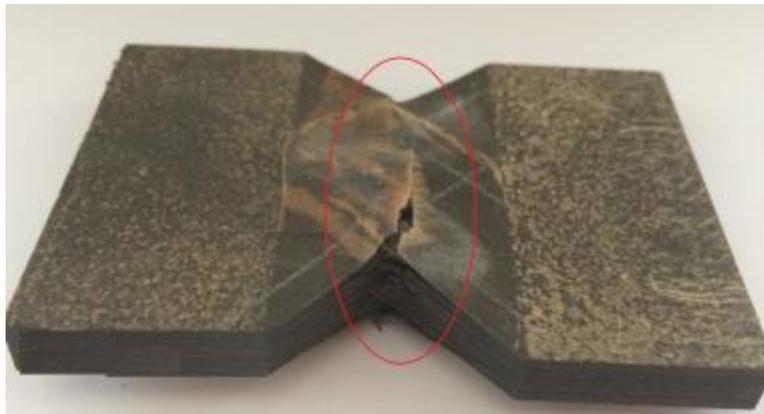


Рисунок 1.29 – Типовое разрушение образца с толщиной 6,28 мм

С учетом полученного опыта и обоснованного выбора ASTM D7078 как базового стандарта, был разработан проект методики испытаний ПКМ на сдвиг в плоскости листа. В проекте методики представлено переработанное стандартное приспособление, которое позволяет испытывать образцы толщиной до 6,28 мм с получением зачетных результатов, оговорены новые условия момента затяжки болтов, а также регламент их замены, рекомендован рисунок насечек захватных пластин, который обеспечивает необходимую передачу нагрузки, но не повреждает верхние слои. Следует понимать, что ASTM 7078 является общепромышленным стандартом и направлен на широкий спектр слоистых материалов с различными свойствами. Разработанный проект методики фактически является адаптацией ASTM 7078 под материалы и типовые толщины авиационной промышленности.

Проект методики представлен в Приложении А к данной диссертационной работе.

1.5. Определение предела прочности на сдвиг тонких алюминиевых листов. Проект методики.

Согласно справочнику ОАК одной из базовых расчетных характеристик для металлов является предел прочности на сдвиг (τ_{12}). В Справочнике, при отсутствии необходимых экспериментальных данных, предлагается пользоваться формулой: $\tau_{12} \approx 0,5\sigma_6$. Однако было решено устранить данный недочет и начать получать данную характеристику исключительно экспериментальным путем, заодно еще раз подтвердив корректность данной рекомендации для современных алюминиевых сплавов.

Для определения предела прочности на сдвиг (фактически срез) существует ОСТ 1.90148-74 разработанный ФГУП «ВИАМ». Минимальный диаметр образца на срез – 2 мм. Соответственно для вырезки образца из алюминиевого листа диаметром 2 мм, необходим лист толщиной около 4 мм, что уже, по сути, находится на границе между листом и плитой. Большинство обшивочных алюминиевых листов для изготовления фюзеляжа и крыла самолета имеют толщины примерно от 1,2 мм до 3 мм. Таким образом возникла задача разработки проекта стандарта для определения предела прочности на сдвиг для тонких алюминиевых листов.

1.5.1. Метод испытаний на сдвиг тонких алюминиевых листов

Цель данной работы заключается в создании метода испытаний на сдвиг тонких алюминиевых образцов, полученных прокатом или литьем. За основу был взят зарубежный стандарт ASTM B 831 – 93: Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products.

1.5.2. Область применения и суть метода

Данный метод охватывает испытания на чистый сдвиг тонких алюминиевых образцов, полученных прокатом или литьем, для определения напряжения среза $\tau_{ср}$ (МПа). Допускается использование фрезерования для доведения образцов до необходимой толщины. Напряжение среза определяется по максимальной разрушающей нагрузке P_{max} (Н).

Экспериментальные данные могут быть использованы в расчетах при проектировании конструктивных элементов планера самолета.

Примечание 1: Условия нагружения данным и другими методами не идеальны, так как они не удовлетворяют строго определению чистого сдвига. Однако и в натурной конструкции условия чистого сдвига практически не возникают.

Испытательное оборудование и аппаратура

Испытательные машины. Машины должны быть оснащены аппаратурой для измерения параметров нагружения. Погрешность установления нагрузки не должна превышать 1 %. Максимальные разрушающие нагрузки должны быть в рабочем диапазоне нагрузок испытательной машины.

Приспособления для крепления и нагружения образцов (захваты). Схема захватов, применяемых во время испытаний, показана на рисунке 50. Захваты должны удовлетворять следующим требованиям:

- быть выполненными из закаленной стали;
- реализовывать схему нагружения, в том числе, обеспечивать точную центровку образца;
- обеспечивать разрушение образца в зачетном сечении.

Аппаратура для измерения толщины t (мм). Измерения толщины проводятся в области между двумя надрезами, выполненными в образце. Точность измерения не ниже 0.01 мм.

Аппаратура для измерения длины рабочей зоны W (мм). Общее требование к аппаратуре состоит в том, чтобы она обеспечивала точность измерения не ниже 0.1 мм. Если возможно замерить длину рабочей зоны с большей точностью, то при $W \geq 5.1$ мм рекомендуется измеренную длину округлять с точностью 0.025 мм, при $2.5 \leq W < 5.1$ мм – с точностью 0.01 мм, при $W < 2.5$ мм – с точностью 0.0025 мм.

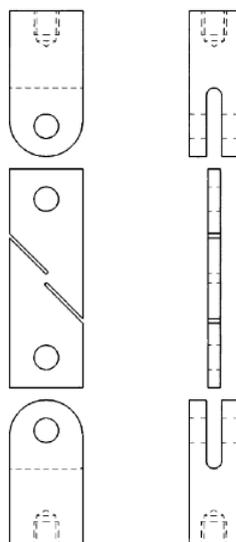


Рисунок 1.30 – Схема захватов, применяемых во время испытаний на срез
1.5.3. Образец для испытаний на срез

Образец представлен на рисунке 51. Ширина $B = 38.1$ мм, длина $L = 114$ мм, толщина не должна превышать 6.3 мм, минимальная толщина определяется из условия недопустимости местной потери устойчивости образца у отверстий под захваты.

Рабочее сечение между окончаниями надрезов должно быть параллельно линии нагружения и отцентрировано относительно нее с погрешностью не более 0.025 мм.

Все обработанные поверхности в рабочей зоне должны быть 7 класса точности и выше. Измерение длины рабочей зоны W проводится между окончаниями надрезов.

Примечание 2: Измерения предполагается производить на полированной поверхности образца. Неровности поверхности образца, обусловленные механической обработкой (горячая прокатка, нанесение надрезов и т.д.), могут привести к неточному определению размеров рабочей зоны.

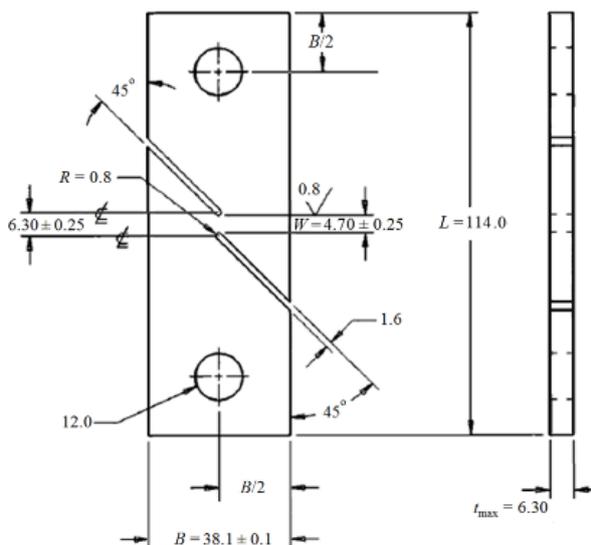


Рисунок 1.31 – Образец для испытаний на срез

1.5.4. Ориентация вырезки образца и направление оси нагружения

Напряжение среза алюминиевых образцов из полуфабрикатов, полученных прокатом, обычно зависит от ориентации вырезки и направления действия нагрузки относительно направления проката.

Для описания ориентации вырезки образца и направления действия нагрузки используется трехбуквенное обозначение (рисунок 1.32). Направление максимальной деформации полуфабриката или его большая сторона обозначается буквой Д. Направление проката проходит вдоль Д. Стороны среднего и наименьшего размера обозначаются буквами П и В соответственно. Первые две буквы обозначают плоскость сдвига, первая буква обозначает направление нагрузки, третья буква – направление, вдоль которого происходит разрушение. Наиболее часто используемые для тонких образцов ориентации вырезки и нагружения: ДП-Д и ПД-П.

Примечание 3: Обычно алюминиевые полуфабрикаты, полученные литьем, не демонстрируют направленность (анизотропию), присущую алюминиевым полуфабрикатам, полученным прокатом, поэтому трехбуквенная маркировка образцов из таких полуфабрикатов не используется.

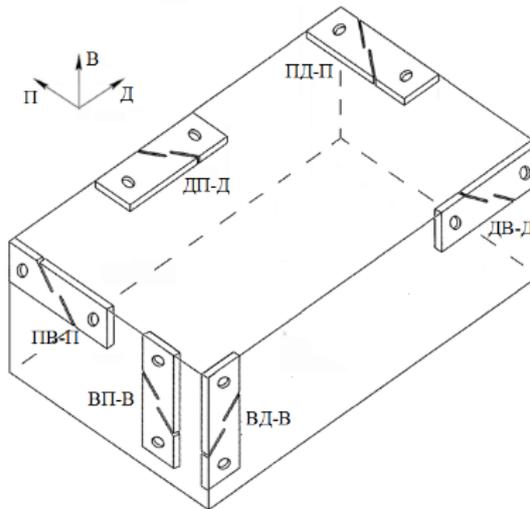


Рисунок 1.32 – Ориентация образцов

1.5.5. Процедура испытаний

1. Измерение образцов: измерьте длину W и толщину t рабочей зоны (рисунок 1.30).
2. Испытания: установите образец в захваты, как показано на рисунке 50. Образец должен свободно вращаться в захватах во время испытаний.
3. Скорость нагружения V не должны превышать 0.3 мм/сек и 10 МПа/сек в нетто сечении (площадь нетто-сечения $F = W \cdot t$). Скорость нагружения должна быть постоянной.
4. Определите разрушающую нагрузку P_{\max} .

1.5.6. Вычисления

Вычислите напряжение среза, используя максимальную нагрузку, следующим образом:

$$\tau_{cp} = \frac{P_{\max}}{W \cdot t} \quad (1)$$

1.5.7. Протокол

Протокол должен содержать следующую информацию:

1. ссылка на стандарт, по которому проведено испытания;
2. обозначения материала и образца;
3. размеры образца (мм);

4. направление вырезки образца и нагружения;
5. максимальная нагрузка (Н);
6. сопротивление разрушению при сдвиге (МПа);
7. температура лабораторного воздуха ($^{\circ}\text{C}$).

1.5.8. Проведение испытаний на сдвиг

Для апробации метода испытаний на срез, представленного в п.1, были изготовлены и испытаны 10 образцов.

1.5.9. Объект испытаний

Образцы были изготовлены из материала 1163 РДТВ лист 1.8 в соответствии с требованиями п.1.1.4 ($W=38.0$ мм, $L=114.0$ мм). Ориентация вырезки образцов и направления нагружения – ДП-Д. Надрезы были нанесены двумя способами (рисунок 1.33):

– в 5-и образцах надрезы были выполнены с использованием электролобзика ($h=1.4$ мм), окончания надрезов высверлены сверлом диаметров 1.6 мм ($r=0.8$ мм);

– в 5-и образцах надрезы были получены фрезой диаметром 1.6 мм; ширина надреза $h=1.6$ мм, радиус закругления на кончике надреза $r=0.8$ мм.

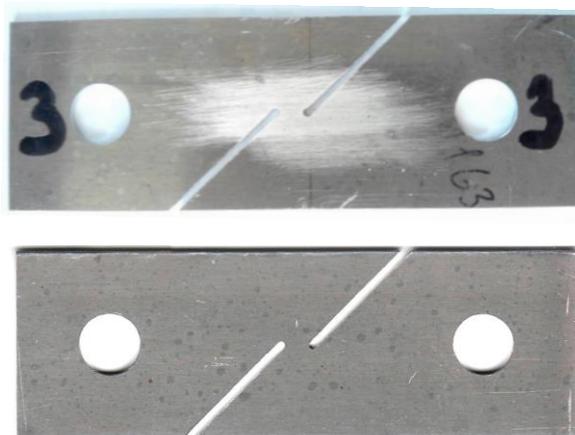


Рисунок 1.33 – Образцы для испытаний на срез: надрез выполнен электролобзиком (образец сверху), надрез выполнен фрезой (образец снизу)

1.5.10. Испытательное оборудование и оснастка

Испытания проведены на универсальной 10 тонной электрогидравлической испытательной машине Instron-10 (рисунок 1.34). На рисунке 1.35 показаны захваты с установленным в них образцом.



Рисунок 1.34 – Электрогидравлический стенд Instron-10



Рисунок 1.35 – Захваты с установленным в них образцом

1.5.11. Проведение испытаний

Перед испытанием проводилось измерение образцов. Ширину образцов измеряли в среднем (рабочем) сечении. Толщину измеряли с помощью микрометра (точность 0,01 мм).

Замеры длины рабочей зоны, а также отклонение плоскости рабочего сечения от линии нагружения проводились с использованием микроскопа DigiMicro (USB-микроскоп 2.0MPix) (рисунок 1.36).

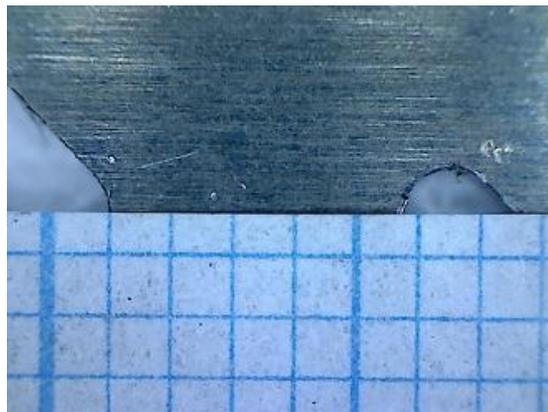


Рисунок 1.36 – Определение длины рабочей зоны с использованием микроскопа DigiMicro (USB-микроскоп 2.0MPix)

Точные геометрические параметры каждого образца, параметры нагружения и результаты испытаний указаны в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Результаты испытаний на срез 10-и образцов

№	W , мм	t , мм	V , МПа/сек	P_{\max} , Н	τ_{cp} , МПа	Примечания
1	4.80	1.67	6.2	2511	313	Надрезы выполнены электролобзиком
2	4.60	1.66	6.5	2413	316	
3	4.60	1.67	6.5	2443	318	
4	4.70	1.67	6.4	2492	317	
5	4.75	1.67	6.3	2457	310	
6	4.80	1.67	6.2	2472	308	Надрезы выполнены фрезой
7	4.80	1.68	6.2	2482	308	
8	4.75	1.68	6.3	2482	311	
9	4.80	1.67	6.2	2511	313	
10	4.80	1.68	6.2	2521	313	

1.5.12. Выводы

Изготовлены 10 образцов для испытаний на срез. Надрезы в образцах были выполнены двумя способами.

1. Проведены испытания 10 образцов: отклонения полученных значений напряжения среза от среднего значения (313 МПа) не превышает 1.6 %.
2. Технология выполнения надрезов (лобзиком или фрезой) не влияет на результаты испытаний.

Разработанный проект методики рекомендуется применять для получения предела прочности на сдвиг для алюминиевых листов толщиной менее 4 мм.

Выводы к главе 1

В главе рассмотрены основные виды испытаний, используемые для получения расчетных характеристик. Даны рекомендации по выбору методик в зависимости от массовости эксперимента и необходимой точности получаемых экспериментальных результатов.

Показано, что для получения предела прочности на сдвиг композиционных полуфабрикатов, применяемых при производстве авиационной конструкции, а именно с толщинами более 4 мм, ни один из существующих стандартов не пригоден без существенных изменений. Обоснован выбор ASTM D7078 в качестве базового для разработки методики проведения испытаний на сдвиг в плоскости листа. Разработана и отработана новая методика испытаний. Текст методики представлен в Приложении А.

В главе обоснована потребность в разработке методики испытаний на сдвиг для тонких алюминиевых листов. На основе ASTM D871 разработана новая методика и приведены основные ее положения. Представлены экспериментальные результаты по ее отработке.

Разработка новых методик для получения пределов прочности на сдвиг для алюминиевых и композиционных материалов позволило повысить достоверность прогнозов статической прочности авиационной конструкции, так как в расчетах будут использоваться более точные механические свойства.

2. Зависимость усталостных характеристик алюминиевых полуфабрикатов от частоты нагружения образца в эксперименте и способа производства отверстия в образце.

2.1. Введение

В настоящее время в авиационной отрасли усталостные испытания образцов на растяжение-сжатие используются для оценки влияния уровня напряжений на их способность выдерживать достаточно большое количество циклов нагружения без разрушения. Это влияние зависит от материала (полуфабриката), геометрических концентраторов, шероховатости поверхности и т.п. Результаты таких исследований лежат в основе выбора того или иного полуфабриката для обеспечения работоспособности элементов конструкций при наличии в условиях эксплуатации большого количества переменных напряжений.

Усталостные характеристики металлических материалов имеют разброс, заметно выше разброса их механических свойств. Кроме этого, получаемые оценки параметров усталостных характеристик элементов конструкций и даже лабораторных образцов весьма сильно зависят от технологии их изготовления и ряда процедур, связанных с процессом самих испытаний. Все это, а также большая продолжительность и высокая трудоемкость испытаний на усталость, требуют для получения сравнимых и статистически обоснованных характеристик усталости материалов в разных лабораториях не только ограничения типоразмеров образцов, но и большей детализации процесса испытаний и изготовления образцов.

Заметим, что результаты таких испытаний в виде кривых усталости лабораторных образцов могут быть использованы для оценок долговечности элементов конструкций, только если эти образцы имитируют (по геометрии, технологии изготовления и т.п.) критические, с точки зрения усталости, конструктивные элементы, а вид нагружения образцов отражает условия нагружения элементов конструкций в эксплуатации.

Для силовых элементов, определяющих ресурс авиаконструкций, основным видом нагружения является растяжение-сжатие, а наиболее типичным конструктивным элементом – полоса конечной ширины с центральным поперечным отверстием.

Расстояние между рядами заклепок и болтов в продольных и поперечных швах летательных аппаратов, как правило, в 4-5 раз превышает диаметр крепежного элемента. Однако так исторически сложилось, что усталостные характеристики крыла были увязаны с характеристиками кривой усталости полосы, в которой ширина в 6 раз превышала диаметр отверстия. В дальнейшем многие годы усталостные свойства материалов в отечественном авиастроении оценивались по испытаниям на усталость именно таких образцов.

Следует отметить, что получение заявленных выше характеристик усталости полуфабрикатов является необходимым, но не достаточным условием проведения подетальных усталостных расчетов элементов авиационных конструкций, включая их продольные и поперечные стыки, осуществленных механическим крепежом (болты, заклепки, болт-заклепки).

В данной главе представлены результаты исследования зависимости усталостных характеристик современных алюминиевых полуфабрикатов от частоты нагружения образца в эксперименте и способа производства отверстия в образце.

2.2. Методика ЦАГИ

Все экспериментальные данные, которые были проанализированы в данной главе, были получены в соответствии с методикой ЦАГИ «Метод получения усталостных характеристик». Для лучшего понимания в данном разделе приведены основные положения методики.

Документ, разработанный в ЦАГИ, предполагает испытания двух типов образцов: полоса с отверстием и проушина при циклическом нагружении. На рисунках 2.1 и 2.2 представлены рекомендуемые геометрические размеры образцов.

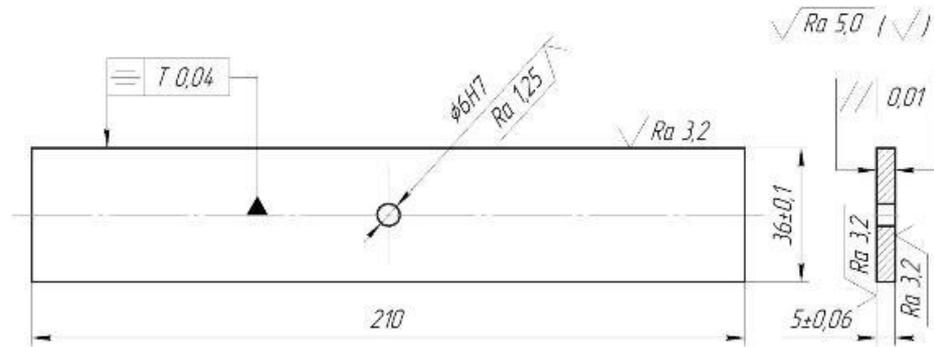


Рисунок 2.1 – Рекомендуемый образец полоса с отверстием

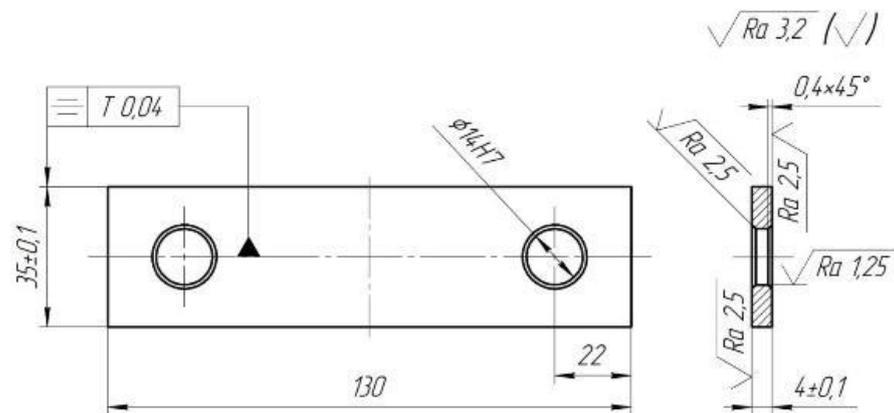


Рисунок 2.2 – Рекомендуемый образец проушина

Дополнительно рекомендуется образцы полоса с отверстием толщиной более 8 мм из листов и 6 мм из плит и профилей алюминиевых сплавов, 4 мм из титановых сплавов и 3 мм из высокопрочных сталей необходимо изготавливать с хвостовыми частями в виде лопаток (Тип 2). Эскиз образца представлен на рисунке 2.3.

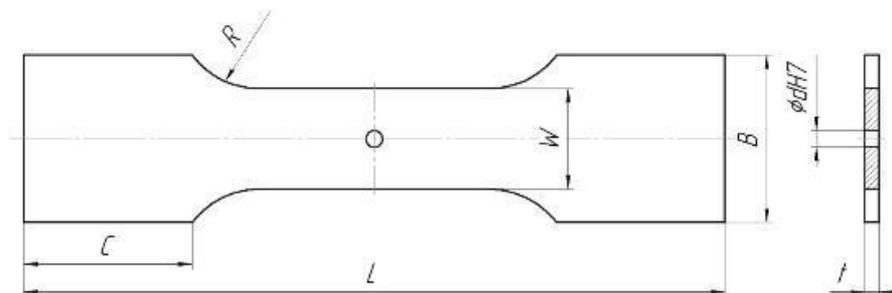


Рисунок 2.3 – Эскиз образца с хвостовыми частями в виде лопаток

Общая длина L образца полоса с отверстием Тип 2 складывается из длины регулярной зоны образца, составляющей три ширины образца $3 \cdot W$, размеров хвостовых частей $2 \cdot C$ и галтельных переходов образца $2 \cdot L_r$, где

$L_r = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{B-W}{2}\right)^2}$. Длина хвостовиков образца C должна составлять не менее $2/3$ длины губок гидравлических захватов.

Представленные эскизы образцов применялись для изготовления образцов при получении усталостных характеристик основных авиационных алюминиевых, титановых и стальных материалов. Большинство обработанных экспериментальных данных в виде кривых усталости были представлены в Справочнике ОАК по расчетным характеристикам.

Детальное рассмотрение образцов типа проушина не приводится, так как в работе экспериментальные данные по ним не получались.

В методике приводятся требования по изготовлению образцов:

Изготовление и маркирование образцов не должны оказывать существенного влияния на усталостные свойства исходного материала. Нагрев образца при изготовлении не должен превышать 50°C и вызывать структурные изменения и физико-химические превращения в металле; припуски на обработку, параметры режима и последовательность обработки должны сводить к минимуму наклеп и исключать местный перегрев образцов при обработке, а также трещины и другие дефекты. Снятие последней стружки с рабочей части и головок образцов производят с одной установки образца; заусенцы на боковых гранях образцов и кромках надрезов должны быть удалены. Окончательное чистовое фрезерование образцов ведется с глубиной фрезерования не более $0,125$ мм.

При изготовлении образцов из алюминиевых сплавов рекомендуются следующие режимы фрезерования:

- цилиндрической фрезой диаметром $40-60$ мм, скорость вращения 500 об/мин при подаче инструмента 60 мм/мин;
- торцевой фрезой диаметром $40-60$ мм, скорость вращения 1000 об/мин при подаче инструмента 60 мм/мин.

Сверление отверстий $\text{Ø}6\text{H}7$ ($\text{Ø}5\text{H}7$) в образцах из алюминиевых сплавов для квалификационных испытаний проводят в несколько этапов с использованием промышленных масел для смазки инструмента:

- сверление направляющего отверстия диаметром 3 мм;
- чистовое сверление отверстия 5,8 (4,8) мм и развертывание до $\text{Ø}6\text{H}7$ ($\text{Ø}5\text{H}7$) со скоростью 1000 об/мин. Скорость подачи $0,1 \div 0,2$ мм/оборот (остановки подачи инструмента не допускаются). Чистота поверхности отверстия Ra не ниже 1,25 мкм;
- зачистка заусенцев тонкой шлифовальной бумагой по ГОСТ 10054 с зернистостью от 40 до 20 мкм вдоль образца (заваливание кромок отверстия не допускается). Не допускается удаление заусенцев с кромок отверстий снятием фасок.

При проведении испытаний накладываются ограничения по частоте нагружения образца в процессе эксперимента:

Сертификационные испытания при нагружении близком к отнулевому в диапазоне долговечностей $10^4 \div 5 \cdot 10^5$ циклов проводятся с постоянной частотой нагружения в диапазоне $2 \div 5$ Гц. При испытаниях с большими базами (средними значениями долговечности до 10^6 циклов) допускается увеличение частоты нагружения образцов до 10 Гц. При испытаниях с базами $5 \cdot 10^3 \div 10^4$ циклов испытания проводятся с частотами $1 \div 3$ Гц. При симметричном цикле напряжений ($R = -1$) указанные выше частоты уменьшаются в 1,5 раза. Во всех случаях частоту нагружения образца указывают при представлении результатов испытаний.

2.3. Постановка задачи

Основной задачей решенной в данной главе является проверка обоснованности требований методики ЦАГИ по частоте нагружения образца в процессе испытаний и способа сверления отверстия. Невыполнение данных требований без дополнительных исследований может привести к тому, что новые экспериментальные данные невозможно будет сравнить с данными полученными

ранее. Это существенно затруднит оценку вновь разработанных металлических полуфабрикатов с точки зрения усталостных свойств.

Ограничение по частоте проведения испытаний обусловлено выбором режимов испытаний максимально близких к условиям нагружения конструкции воздушного судна при натуральных ресурсных испытаниях. В соответствии с имеющимися данными, частота в пределах 0,5-10 Гц не сказывается на усталостных характеристиках или сказывается одинаково. В итоге 0,5-1 Гц – нагружение конструкции в натурном эксперименте; 3-10 Гц – частота нагружения элементарного образца в испытании. В следующем разделе данная тема будет раскрыта шире.

Что касается способа сверления отверстия, то данный подход исторически сложился в ЦАГИ в рамках опытного изготовления образцов. Практика проведения испытаний показала, что любые отклонения могут приводить к увеличению рассеяния, занижению характеристик и другим, негативным с точки зрения качества экспериментальных данных последствиям. Однако, в связи с разработкой в последние 10-15 лет большого количества образцов авиационной техники, а также активным восстановлением производства существующих металлических материалов и производства новых материалов, опытное производство ЦАГИ не в состоянии обеспечить массовое производство образцов с выдерживанием соответствующих требований. Следует отметить, что за указанный период авиационные заводы так же сильно модернизировали свой станочный парк. В результате было решено проверить на предмет взаимозаменяемости способы сверления ЦАГИ и серийного авиационного завода.

2.4. Сравнение способов сверления отверстий

Основной целью выполнения требований по сверлению отверстий это необходимость недопущения различных повреждений внутренней поверхности отверстия, которые могут привести сразу к образованию трещины. Дополнительно может произойти перегрев материала в зоне сверления или появление иных эффектов, которые негативно сказываются на получаемых экспериментальных

данных. Необходимо не допустить как занижение усталостных характеристик, так и завышение.

Для проведения экспериментальных работ было изготовлено по 20 образцов для каждого способа сверления. Первый способ – в соответствии с методикой ЦАГИ. Второй способ – технология серийного авиационного завода, для которой характерными особенностями были: сверление отверстия за один проход и частота вращения сверла 4000-5000 об/мин. Детально описать способ выполнения отверстия на заводе не представляется возможным, так как это является интеллектуальной собственностью и в сопроводительной документации к образцам не указывалось.

Исследуемыми полуфабрикатами являлись алюминиевые плита (толщина 40 мм) и прессованный профиль (толщина 5 мм), поскольку они имеют большие толщины по отношению к листам, вследствие чего больше вероятность возникновения различных эффектов, влияющих на экспериментальные данные из-за большей глубины сверления. Обшивочные листы, как правило, имеют толщины от 1,5 мм до 3 мм, соответственно сверло достаточно быстро их «прокалывает».

В качестве образца использовалась полоса с отверстием. Толщина образцов была единой – 5 мм. Для плиты не целесообразно брать номинальную толщину 40 мм, так как это приведет к повышению нагрузки, поэтому при изготовлении образцов плита фрезеровалась до 5 мм в соответствии с рекомендациями методики ЦАГИ. В таблице 2.2 представлено распределение образцов.

Таблица 2.2 Распределение образцов по способам сверления и полуфабрикатам

Способ сверления	Плита	Профиль
ЦАГИ	10	10
Завод	10	10

Испытания проводились в Лаборатории прочности ЦАГИ на электрогидравлической машине Instron с максимальным усилием 10т. Асимметрия цикла была $R= 0,05$ ($R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$). Для плиты были выбраны два уровня максимальных напряжений нетто (напряжения в сечении отверстия, $B=30$ мм) 25кгс/мм² и 16 кгс/мм². Для профиля – 19 кгс/мм² и 16 кгс/мм².

В таблице 2.3 представлены общие характеристики полученных экспериментальных данных.

Полуфабрикат	Средняя долговечность		$\left \frac{N_2}{N_1} - 1 \right \times 100\%$	Стандартное отклонение ¹ S_{lgN}		Частота нагружения f , Гц
	ЦАГИ	Завод		ЦАГИ	Завод	
Плита (25 кгс/мм ²)	30 399	28 037	7,8%	0.04	0.04	3
Плита (16 кгс/мм ²)	229 331	207 435	9,6%	0.10	0.08	5
Профиль (19 кгс/мм ²)	64 440	75 410	17%	0.07	0.09	3
Профиль (16 кгс/мм ²)	150 696	152 248	1%	0.06	0.11	5

¹ – Для вычисления стандартного отклонения, т.е. меры того, насколько точки разбросаны относительно среднего значения, использовалась формула из работы [2.1]: $S^2 = \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}$, n - размер выборки; \bar{x} - среднее значение.

Исходя из значений, приведенных в таблице 2.3 можно сделать вывод, что полученные экспериментальные данные хорошего качества, а именно обладают маленьким рассеянием (ниже общепринятого значения 0,15), а средние значения долговечностей для двух способ сверления не существенно отличаются. Полученная разница средних долговечностей в 17% для образцов профиля при 19

кгс/мм² является нормальной для такого рода испытаний, поскольку максимальное и минимальное значение для двух способов сверления разнятся на 40%.

В качестве условия эквивалентности двух способ сверления было решено доказать методами математической статистики, что полученные данные принадлежат одной генеральной совокупности, следовательно, неразличимы между собой. При анализе использована общепринятая гипотеза о логарифмически нормальном распределении усталостной долговечности. Процедура анализа включала два этапа:

- проверка гипотезы о равенстве дисперсий,
- проверка гипотезы о равенстве средних значений.

В связи с тем, что статистика критерия, используемого для проверки равенства средних значений, зависит от соотношения дисперсий сравниваемых совокупностей, этап проверки равенства дисперсий этих совокупностей является обязательным. Для проверки гипотезы равенства дисперсий использован в соответствии с работой [2.2] двухвыборочный F -критерий, основанный на отношении оценок дисперсий $F_3 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$, где $s_1 > s_2$. Уровень значимости, то есть вероятность отклонить выбранное нами предположение, был выбран 5%. Критические значения, с которыми сравнивался критерий, были взяты из [2.3].

Результаты этого анализа представлены в таблице 2. 4.

Таблица 2.4 – Результаты проверки равенства дисперсий

Полуфабрикат	Эмпирическое значение статистики $F_3 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$	Критическое значение
плита 1163Т (25 кгс/мм ²)	1,42	6,59
плита 1163Т (16 кгс/мм ²)	1,52	5,19
профиль В95очТ2 (19 кгс/мм ²)	1,403	9,28
профиль В95очТ2 (16 кгс/мм ²)	3,275	6,26

Сравнивая значения статистики F и соответствующего критического значения, получаем, что все значения меньше критических, следовательно, гипотеза о равенстве дисперсий двух выборок верна с вероятностью 95%.

Поскольку дисперсии равны, для проверки равенства средних значений используем критерий, основанный на t -статистике [2.2] $t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\bar{s} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$, где

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{s_1^2(n_1 - 1) + s_2^2(n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}}.$$

Приведённые в таблице 2.5 результаты расчётов

показывают, что при уровне значимости 5% гипотеза о равенстве средних значений может быть принята. Одинаковые значения дисперсий и средних значений при разных скоростях сверления свидетельствуют о том, что этот технологический параметр (скорость сверления отверстий) не влияет на усталостную долговечность исследованных материалов или влияет одинаково.

Таблица 2.5 – Проверка гипотезы о равенстве средних

Полуфабрикат	Эмпирическое значение статистики t_3	Критическое значение
плита 1163Т (25 кгс/мм ²)	1,33	2,3646
плита 1163Т (16 кгс/мм ²)	0,725	2,2622
профиль В95очТ2 (19 кгс/мм ²)	1,188	2,4469
профиль В95очТ2 (16 кгс/мм ²)	0,064	2,2622

На рисунках 2.4 и 2.5 приведены кривые усталости для двух полуфабрикатов.

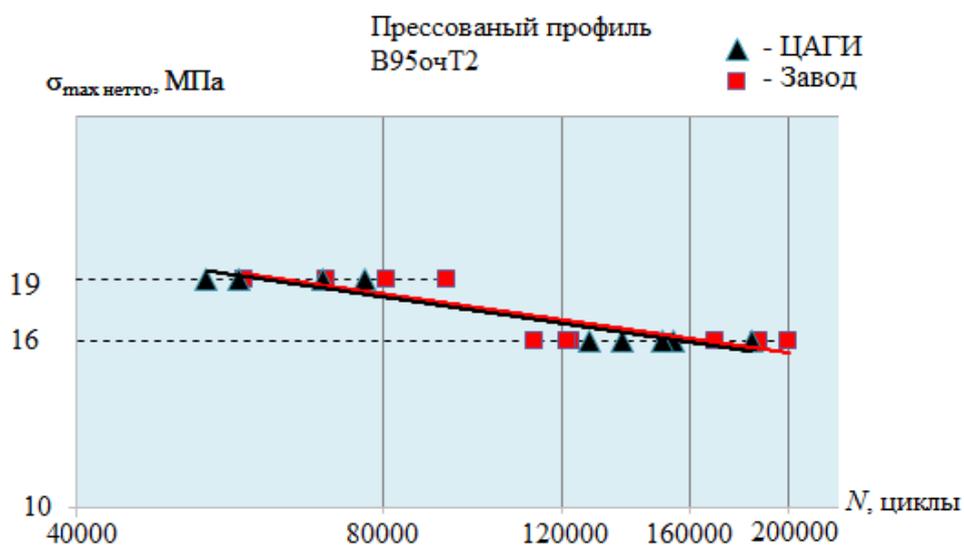


Рисунок 2.4 – Кривые усталости для профиля: черная – отверстие ЦАГИ; красная-отверстие завод

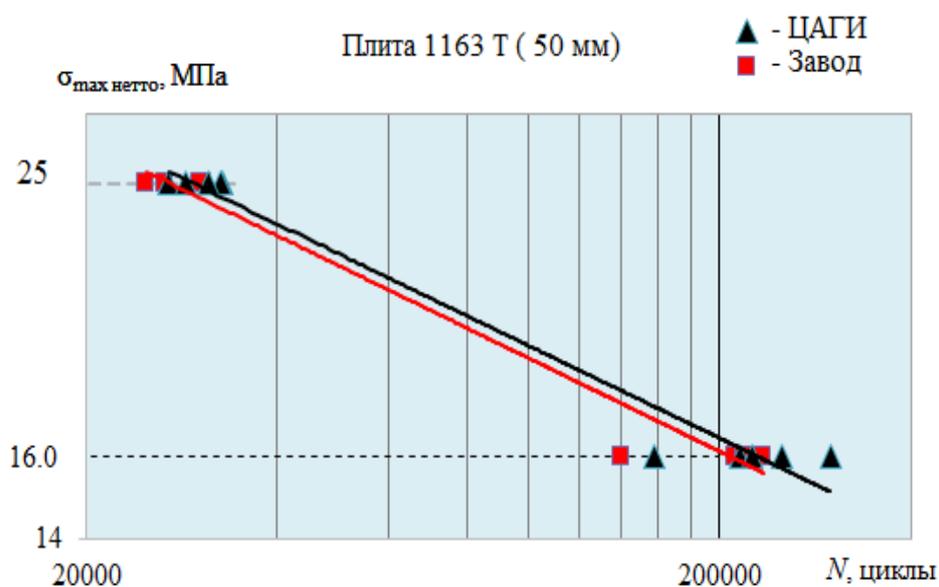


Рисунок 2.5 – Кривые усталости для плиты: черная – отверстие ЦАГИ; красная-отверстие завод

Полученные кривые усталости фактически совпадают, что дополнительно указывает на эквивалентность подходов по сверлению отверстий.

Обобщая статистическую обработку можно сделать вывод, что с вероятностью 95% процентов рассматриваемые способы сверления отверстий можно считать взаимозаменяемыми, следовательно, способ сверления,

реализованный на заводе можно применять для производства образцов в рамках квалификационных испытаний. Данное расчётно-экспериментальное подтверждение необходимо проводить для каждого отдельного производства.

Проведенные исследования позволили ускорить темпы производства образцов, сохранив гарантию получения качественных экспериментальных данных.

2.5. Подтверждение влияния частоты нагружения на получаемые усталостные характеристики

2.5.1. Обзор

Среди авторов, которые первыми начинали проводить исследования по влиянию частоты нагружения на усталостную долговечность следует упомянуть Краузе (1934), Оберга и Джонсона (1937) и Ренсона (1949) [2.4].

По-видимому, первая аналитическая зависимость для оценки влияния частоты нагружения на долговечность металлов была предложена Экелем (1951) на основе испытаний свинца на изгиб при нормальной температуре в следующем виде [2.5]:

$$\log(L) = \log(k) - m \cdot \log(f) , \quad (2.1)$$

где L – долговечность в днях; f – частота нагружения; k – константа.

Учитывая, что долговечность в циклах равна $N=f \times L$, получим:

$$\log(N) = \log(k) - (m - 1) \cdot \log(f) ,$$

где k – функция амплитуды напряжения; m – функция температуры.

Таким образом, для оценки влияния частоты нагружения на долговечность при постоянной температуре и амплитуде напряжений получим выражение:

$$\log\left(\frac{N_1}{N_2}\right) = (m - 1) \cdot \log\left(\frac{f_2}{f_1}\right) \text{ или } \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^{1-m}$$

Как правило, из-за недостатка экспериментальных данных зависимость параметра m от амплитуды напряжений игнорируется и зависимость распространяется на диапазон долговечностей от 5×10^3 до 10^6 циклов.

Таким образом, для оценки влияния частоты нагружения на долговечность получим простое выражение:

$$N_1 = N_2 \cdot (f_1/f_2)^C, \quad (2.2)$$

где C – константа материала при постоянной температуре.

Автор работы [2.6] нашёл, что для испытаний при комнатной температуре $m = 0.7$. В работе [2.7] для стали с 0,17 % углерода при $t = 20^\circ\text{C}$ приведено значение $m = 0,75$. Такое значение m означает увеличение долговечности данной стали на 78% при увеличении частоты на порядок.

В работе [2.8] показано, что зависимость усталостной долговечности полосы с отверстием из сплава типа АК4 от частоты нагружения может быть аппроксимировано выражением подобным (2.2).

В литературе и справочных данных, особенно по сталям и сплавам титана, большая часть экспериментальных данных о влиянии частоты нагружения на долговечность относится к пределам выносливости. В этом случае для оценки параметра C в формуле (2.2) использовано выражение:

$$N_{f_1}/N_{f_2} = \left\{ (\sigma_{-1})_{f_1} / (\sigma_{-1})_{f_2} \right\}^m, \quad (2.3)$$

где $(\sigma_{-1})_{f_1}$, $(\sigma_{-1})_{f_2}$ – пределы выносливости (не обязательно при симметричном нагружении) образцов, полученные при испытаниях на усталость с частотами нагружения f_1 и f_2 , соответственно;

N_{f_1} , N_{f_2} – долговечности образцов при напряжениях превышающих наибольшее значение пределов выносливости;

m – “наклон” кривой усталости полуфабриката образца и элемента конструкции.

Влиянию частоты нагружения циклического деформирования на усталость к настоящему времени уделено достаточное внимание [2.4–2.19] в связи с большим прикладным значением этого вопроса.

Общей закономерностью влияния частоты на усталостную долговечность является её увеличение с ростом частоты. Эффект частоты обусловлен действием разных процессов, присущих или сопутствующих периодическому нагружению. Усталость металлов является результатом микропластических деформаций при периодическом нагружении, приводящих к образованию усталостных трещин. Чем медленнее происходит нагружение и длительнее действие наибольших напряжений на материал, тем полнее протекает пластическая деформация и долговечность снижается. Вводимая при этом энергия идёт не только на деформирование, часть её рассеивается, а часть накапливается в металле, что может приводить к заметному нагреву детали и изменению локальной структуры термически упрочнённых сплавов, какими являются практически все самолетостроительные сплавы силовых конструкций. Следствием чего является ускорение усталостного процесса при высокой частоте нагружения. В том же направлении действует окружающая среда – воздух, который для конструкционных сплавов является коррозионно-активной средой [2.19]. Аналогичные соображения о влиянии частоты нагружения на предел выносливости металлических материалов высказаны в работе [2.20].

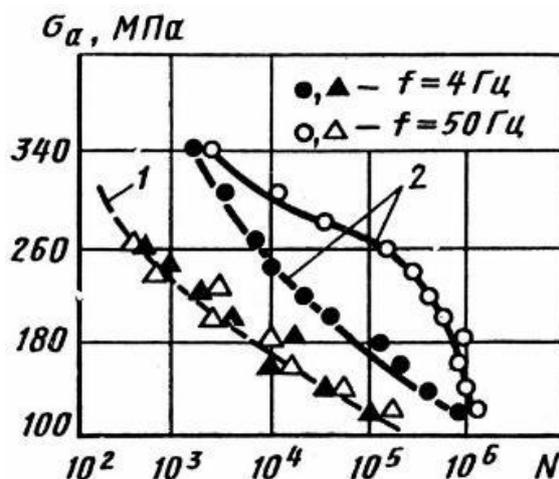
Очевидно, что время действия коррозионной среды, прямо связанное с частотой нагружения, приводит к повышению повреждающего влияния низкой частоты на усталостную долговечность. В работе [2.21] показано, что усталостная долговечность заклёпочного соединения листов из сплава Д16Т в вакууме в 5 раз больше, чем в воздухе. Аналогичным образом действует и повышенная температура. Разупрочнение вследствие ползучести или другие процессы, обусловленные нагревом, проявляются тем сильнее, чем ниже частота нагружения (см. таблицу 2.6) [2.19].

Таблица 2.6 – Влияние частоты нагружения на усталостную долговечность образцов из листов АК4 в связи с температурой испытаний [2.19]

Образец	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$ МПа	f Гц	$N \cdot 10^{-3}$	N_f/N_{80}	C^*	$N \cdot 10^{-3}$	N_f/N_{80}	C^*
			ЦИКЛ			ЦИКЛ		
			Температура, °С					
			20			120		
Заклёпочное соединение	$\frac{157}{5.7}$	80.0	187.0	1.00	0.0485	102.0	1.00	0.122
		4.7	163.0	0.87		72.2	0.71	
Полоса с отверстием, $\alpha_\sigma=2.9$	$\frac{165}{16.5}$	80.0	64.8	1.00	0.0410	77.5	1.00	0.096
		0.6	54.2	0.84		56.8	0.73	
		0.006	44.1	0.68		32.0	0.41	

* – параметр в формуле (2.2), оцененный по результатам данных испытаний для учета частоты нагружения на долговечность.

На рисунке 2.6 представлены результаты испытаний образцов из сплава Д16Т при частотах 4 и 50 Гц [2.13]. Различие в частоте нагружения не сказалось на усталостной долговечности по образованию трещины 0.3 мм, тогда как усталостной долговечности по разрушению различалась очень сильно.



1 – по образованию усталостной трещины 0.3 мм; 2 – по разрушению

Рисунок 2.6 – Кривые усталости при изгибе с вращением

Влияние коррозионной среды, а также локальные изменения в структуре сплавов наиболее сильно проявляются на стадии роста усталостных трещин, поэтому влияние частоты связано с критерием разрушения, т.е. чем большая трещина принята за критерий разрушения, тем сильнее эффект частоты. То же можно сказать и об уровне концентрации напряжений, чем он выше, тем больше доля развития усталостной трещины и тем сильнее влияние частоты [2.19].

Для элементов с умеренной концентрацией напряжений ($K_t=3...4$) повышение частоты с 0.1–0.2 до 2–5 Гц не приводит к значительному увеличению усталостной долговечности (обычно 10–30 %). Дальнейшее увеличение частоты до 10–100 Гц увеличивает усталостную долговечность в 2–5 (до 10) раз. Эти цифры характерны для термически упрочнённых сплавов. Для отожжённых и сильно перестаренных полуфабрикатов влияние частоты либо невелико, либо отсутствует. Изменение усталостной долговечности с частотой нагружения также связано с уровнем циклических напряжений. При напряжениях, соответствующих долговечности менее 10^4 циклов или более 10^6 циклов этот эффект меньше [2.16].

Наиболее сильно влияет частота при напряжениях, соответствующих усталостной долговечности $(1-3) \cdot 10^5$ циклов. Однако и при напряжениях, соответствующих пределам выносливости, имеет место небольшое увеличение этих пределов с увеличением частоты нагружения. Это иллюстрируют таблицы 2.7 и 2.8. Таблица 2.8 характеризует сопротивление усталости при частотах, соответствующих акустическим нагрузкам, которое в работе [2.18] определяют следующим соотношением:

$$(\sigma_{-1})_{f_1} - (\sigma_{-1})_{f_2} = a_f \cdot \lg(f_1/f_2)$$

где $(\sigma_{-1})_{f_1}$ и $(\sigma_{-1})_{f_2}$ – пределы выносливости образцов, полученные при испытаниях на усталость с частотами нагружения f_1 и f_2 , соответственно.

Таблица 2.7– Влияние частоты нагружения на пределы выносливости сплавов (таблица 1.4 [2.19] дополнена последней колонкой)

Сплав	Предел выносливости σ_{-1} , МПа			C^*
	Частота, Гц			
	25	167	500	
Сталь углеродистая	215	215	230	0.0642
Коррозиестойкая сталь	415	435	489	0.1670
Сталь высокопрочная	675	680	700	0.0391
Алюминиевый сплав	105	105	120	0.1272
Латунь	140	165	185	0.3647

* – значение коэффициента C в формуле (2.2), оценённое с учётом зависимости (2.3) и “наклона” кривой усталости $m=4$.

Таблица 2.8 – Частотный коэффициент a_f по (2.4) (таблица 1.5 [2.19] дополнена двумя последними колонками 4 и 5)

Материал	Температура образца, °С	a_f , МПа	σ_{-1}^{**} , МПа	C^*
Сталь 45	20	20.0	210	0.1023
Сталь 1Х2М	20	15.0	250	0.0984
Сталь 1Х2М	350	20.0	185	0.1700
Сплав ОТ4-1	20	20.0	340	0.1023
Сплав ВТ22	20	16.5	410	0.0672
Сплав Д16Т	20	6.7	120	0.1345

* – значение коэффициента C в формуле (2.2), оценённое с учётом “наклона” кривой усталости $m=4$ и предела выносливости σ_{-1}^{**} при низкой частоте.

В таблице 2.9 и рисунке 2.6 представлены результаты испытаний образцов в виде полосы с отверстием из листов алюминиевых сплавов Д16АТ, В95АТ1 и АК4-1Т1 [2.22, 2.23]. Результаты испытаний демонстрируют монотонно увеличение долговечности от 0,17 до 40 Гц. Здесь же приведены значения параметра C в формуле (2.2) для аналитической оценки влияния частоты нагружения на долговечность.

Таблица 2.9 – Влияние частоты нагружения на долговечность листов из сплавов Д16АТ, В95АТ1 и АК4-1Т1

Образец	σ_{max_br} МПа	f Гц	N цикл	$N_{40}/N_{0.17}$	C
Лист Д16АТ; $t=2-4$ мм; $\alpha_\sigma=2.6$; $R=0.0$	130.8	0.17	74 990	1.927	0.1201
		40.0	144 500		
Лист В95АТ1; $t=2-5$ мм; $\alpha_\sigma=2.6$; $R=0.0$		0.17	42 860	1.273	0.0438
		40.0	54 560		
Лист АК4-1Т1; $t=2-3$ мм; $\alpha_\sigma=2.6$; $R=0.0$		0.17	58 000	1.725	0.0999
		40.0	100 070		

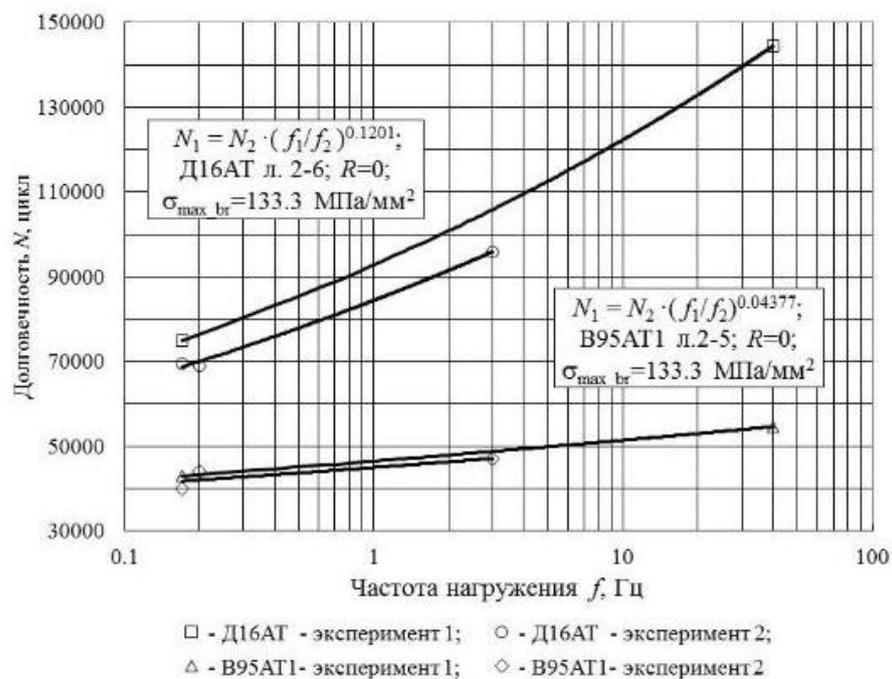


Рисунок 2.6 – Влияние частоты на долговечность образцов в виде полосы с отверстием $\alpha_\sigma=2.6$ из листов алюминиевых сплавов Д16А и В95АТ1

Результаты исследования влияние частоты на долговечность полосы с отверстием из сплавов Д16Т и В95Т, выполненного С.И. Ратнер [2.9] представлены в таблице 2.10. Здесь же приведены значения параметра C в формуле (В.2), которые хорошо согласуются с представленными выше значениями параметра C .

Таблица 2.10 – Влияние частоты нагружения на долговечность образцов из сплавов Д16Т, В95Т

Образец	f Гц	N цикл	$N_{40}/N_{0.03}$	C
Д16Т; $\sigma_b=450$ МПа; $t=4$ мм $B=15$ мм; $d=3$ мм; $R=0.1$	0.03	4100	2.1	0.1030
	40.0	8600		
В95Т; $\sigma_b=510$ МПа; $t=2$ мм, $B=15$ мм; $d=3$ мм; $R=0.1$	0.03	1870	1.4	0.0404
	40.0	2500		

Ниже представлены материалы о влиянии частоты нагружения на предел выносливости заимствованные из справочника [2.24]. Результаты исследования влияния частоты нагружения на предел выносливости при изгибе на базе $(1-2) \cdot 10^7$ циклов ряда сталей и алюминия приведены на рисунке 2.7. Из рисунка видно, что для всех исследованных металлов при увеличении частоты нагружения до 10^4 Гц наблюдается монотонный рост предела выносливости. При дальнейшем увеличении частоты нагружения для ряда исследованных материалов предел выносливости снижается.

1 – сталь (0.86 % С; 2 – холоднокатаная сталь (1.11 % С);

3 – нормализованное армко-железо;

4 – деформированная сталь;

5 – низкоуглеродистая сталь;

6 – катаный алюминий

(заимствовано из работы [2.24, рис 2.41])

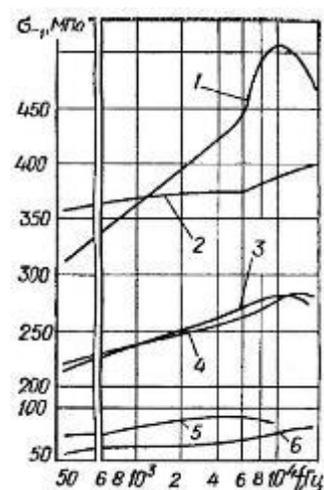


Рисунок 2.7 – Зависимость пределов выносливости металлов от частоты нагружения

Частота нагружения оказывает большее влияние на более пластичные металлы. Особенно чётко это проявляется для одних и тех же сплавов, когда пластичность изменяется за счёт их термической обработки [2.17].

В таблице В.6 представлены данные о пределах выносливости образцов из титановых сплавов заимствованные из справочника [2.24]. За отсутствием экспериментальных данных о влиянии частоты нагружения на долговечность титановых сплавов (так же, как и сталей) по этим данным с учётом принятого “наклона” кривых усталости для данных материалов равного 4 оценён параметр C в зависимости (2.2).

Таблица 2.11 – Влияние частоты нагружения на усталостную долговечность образцов из титановых сплавов [2.24]

Материал	Образец	Вид нагружения	f , Гц	σ_{-1} , МПа	C
ОТ4-1	$d=7.5$ мм, шлифование ручное	Растяжение-сжатие	16, 600	320, 350	0.0989
ОТ4-1		Изгиб	16, 600	310, 340	0.1019
ВТЗ-1	$d=7$ мм, $l=35$ мм, $R_a=0.32$	Растяжение-сжатие	33, 270	430, 460	0.1283

Такая оценка параметра C , возможно неконсервативная, все же показывает, что влияние частоты на долговечность титановых сплавов необходимо учитывать. Данное соображение можно отнести и к аналогично оцененным значениям параметра C для сталей.

В сводной таблице 2.12 представлены значения параметра C в формуле (2.2) для оценки влияние частоты нагружения на усталостную долговечность алюминиевых и титановых сплавов и сталей при температуре 20 °С.

Таблица 2.12 – Влияние частоты нагружения на усталостную долговечность алюминиевых и титановых сплавов и сталей при температуре 20 °С (сводная таблица)

Материал	Образец	Вид нагружения	f Гц	C	Источник данных
Д16АТ	$t=2-4$ мм; $K_t=2.6$	Растяжение	0.17–40	0.1201	[2.22, 2.23]
Д16Т	$t=4$ мм $B=15$ мм; $d=3$ мм	Растяжение	0.03–40	0.1030	[2.12]
В95АТ1	$t=2-5$ мм; $K_t=2.6$	Растяжение	0.17–40	0.0438	[2.22]
В95Т	$t=2$ мм $B=15$ мм; $d=3$ мм	Растяжение	0.03–40	0.0404	[2.12]
АК4-1Т1	$t=2-3$ мм; $K_t=2.6$	Растяжение	0.17–40	0.0999	[2.22]
АК4	Заклёпочное соединение	Растяжение	4.7–80	0.0485	[2.19]
АК4	$K_t=2.6$	Растяжение	0.006–80	0.0410	[2.19]
Сталь углеродистая	–	Изгиб	25–500	0.0642	[2.13]
Коррозионестойкая сталь	–	Изгиб	25–500	0.1670	[2.13]
Сталь высокопрочная	–	Изгиб	25–500	0.0391	[2.13]
Алюминиевый сплав	–	Изгиб	25–500	0.1272	[2.13]
Латунь	–	Изгиб	25–500	0.3647	[2.13]
Сталь 1Х2М	–	Изгиб	–	0.1023	[2.19]
Сталь 45	–	Изгиб	–	0.1700	[2.19]
Сплав ОТ4-1	–	Изгиб	–	0.1023	[2.19]
Сплав ВТ22	–	Изгиб	–	0.0672	[2.19]
Сплав Д16Т	–	Изгиб	–	0.1345	[2.19]
ОТ4-1	$d=7.5$ мм; шлифование ручное	Растяжение- сжатие	16–600	0.0989	[2.24]
ОТ4-1		Изгиб	16–600	0.1019	[2.24]
ВТ3-1	$d=7$ мм; $R_a=0.32$	Растяжение- сжатие	33–270	0.1283	[2.24]

Обобщая представленную в обзоре информацию, можно сделать вывод, что частота нагружения образца при испытании может вносить вклад в результат эксперимента, причем с точки зрения обеспечения ресурса авиационной конструкции не в запас. Среди опубликованных данных не представлены результаты исследований для новых алюминиевых материалов, таких как 1163Т,

1163 РДТВ и других, которые получили широкое применение в проектируемых и изготавливаемых воздушных судах (МС-21, Ил-112, Ил-114, SSJ-100).

Для большинства представленных в обзоре материалов в последние 5 лет поменялись технические условия, что в свою очередь может найти отражение в получаемых прочностных свойствах.

2.5.2. Постановка задачи

В рамках данной части работы проверялось влияние частоты нагружения образца полоса с отверстием на уровень получаемых долговечностей. Исследования проводились для современных алюминиевых сплавов 1163 Т плита толщиной 50 мм и обшивочный лист 1163 РДТВ толщиной 2 мм. Были выбраны два уровня частоты нагружения 3-5 Гц (в соответствии с методикой ЦАГИ) и 40 Гц.

Мотивацией для данной работы послужило желание проверить возможность ускорения квалификационных испытаний по получению кривых усталости, а также получение кривых усталости при повышенной частоте. Полученные экспериментальные данные в дальнейшем использовались для прогнозирования долговечности элементов вертолетных конструкций, поскольку для них частота нагружения 20-40 Гц более характерна.

2.5.3. Проведение эксперимента

Для каждого полуфабриката было выбрано по 3 образца на уровень для 3 партий, уровней нагружения было 3, соответственно для получения кривой усталости было отобрано 27 образцов. Причем образцы вырезались вдоль проката (Д) и поперек проката (П). Результаты испытаний для частоты 3-5 Гц общеизвестны и приведены в виде кривых усталости в Справочнике ОАК, следовательно, задача состояла в получении и обработке экспериментальных данных полученных при 40 Гц. В таблице 2.13 представлено распределение образцов.

Таблица 2.13 – Распределение образцов

Полуфабрикат	$\sigma_{\max_нетто}$ (КГС/ММ ²)	Частота f (Гц)
1163Т плита 50 мм (Д, П)	20, 16, 14	40
1163РДТВ лист 2 мм (Д, П)	20, 16, 13	40

Испытания проводились в соответствии с методикой ЦАГИ. В качестве испытательного оборудования использовалась электрогидравлическая машина Instron 10 т, которая позволяет в штатном режиме развивать частоту нагружения 40 Гц.

В процессе испытаний производился замер температуры образца бесконтактным пирометром. Повышение температуры образца фиксировалось в пределах 5-10 °С. Основываясь на материалах из обзора, такое повышение температуры не может оказать влияние на получаемые результаты.

2.5.4. Обработка результатов

Поскольку образцы были выбраны из 3 партий, перед проведением обработки полученных экспериментальных данных, проверить результаты для 3 комплектов на принадлежность одной генеральной совокупности. Результаты проверки позволят обрабатывать полученные значения долговечностей совместно.

Для проверки однородности, принадлежности результатов испытаний (на каждом уровне напряжения отдельно) к одной совокупности используем непараметрический k -выборочный критерий Крускала-Уолиса [2.3]

Статистика этого критерия

$$CW = \frac{12 \sum_{i=1}^k n_i [\bar{R}_i - 0.5(N+1)]^2}{(N^2 - 1)}, \quad (2.3)$$

где k - число партий, испытанных на соответствующем уровне напряжения,

n_i - число испытанных образцов i -й партии,

N - суммарное число образцов, испытанных на уровне,

\bar{R}_i - среднее значение рангов результатов i -й партии (ранг-порядковый номер, который имеет экспериментальное значение данной партии в общем вариационном ряду, построенном в порядке убывания).

Статистика (2.3) имеет распределение как $\frac{N}{N-1} \chi_{k-1}^2$. Уровень значимости принимаем равным 5%. Если $CW < \frac{N}{N-1} \chi_{k-1,0.05}^2$, то проверяемая гипотеза принимается, и результаты можно объединить в одну выборку.

Процедура проверки гипотезу была проведена аналогично такому же анализу в разделе 4. Для всех экспериментальных данных на всех уровнях напряжения $CW < \frac{N}{N-1} \chi_{k-1,0.05}^2$, следовательно, для построения кривой усталости данные можно объединить. Исключение составили данные для листа 1163 РДТВ (П). Для них подобная процедура была иной и описана ниже.

В таблицах 2.13, 2.14 приведены обобщенные экспериментальные данные для образцов из плиты 1163 Т.

Таблица 2.13 – Данные по испытаниям образцов из плиты 1163 Т (Д)

σ , кгс/мм ²	n	$\overline{\lg N}$	$S_{\lg N}$
20	9	5.033	0.182
16	9	5.693	0.350
15	2	6.426	0.022
14	6 (1 не разрушен)	5.833	0.3025

Таблица 2.14 – Данные по испытаниям образцов из плиты 1163 Т (П)

σ , кгс/мм ²	n	$\overline{\lg N}$	$S_{\lg N}$
20	9	4.938	0.197
16	9	5.508	0.317
14	6 (1 не разрушен)	5.790	0.197

В таблице 2.13 на уровне 14 кгс/мм² было решено испытать 6 образцов и в итоге 1 был не разрушен, его наработка составила более 4×10^6 . Поскольку уровень в 14 кгс/мм² дает высокие долговечности, фактически можно сказать близкие к пределу выносливости, было принято решения 2 образца с этого уровня забрать и испытать при 15 кгс/мм².

Аналогичная ситуация сложилась для образцов, вырезанных из плиты 1163 Т поперек проката, на уровне 14 кгс/мм² был получен 1 неразрушенный образец. В данном случае решили ограничиться 6 образцами.

Для образцов из листа 1163 РДТВ вырезанных поперек проката обобщенные данные представлены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Результаты испытаний для листа 1163 РДТВ (П)

σ , кгс/мм ²	n	$\overline{\lg N}$	$S_{\lg N}$
20	6	4.785	0.037
16	6	5.251	0.049
13	6 (2 не разрушены)	6.176	0.800

В процессе проведения работы возникла необходимость уменьшить количество образцов, что отражено в таблице 2.15. Уменьшение количества образцов вызвано тем, что изначально несколько образцов было испытано на уровнях 8,5, 10, 12 кгс/мм² в каждом случае наработка была равна 10^7 циклов без разрушения образца. Только на уровне в 13 кгс/мм² были получены достаточно стабильные разрушения образцов. Для получения этих точек было потрачено достаточно много времени, поэтому было решено ускорить работу пожертвовав количеством образцов.

Для значений, обобщенных в таблице 2.15 проверка гипотезы об однородности данных может быть проведена только для результатов, полученных при напряжениях 20 кгс/мм² и 16 кгс/мм², так как в обеих партиях при 13 кгс/мм² есть один неразрушенный образец. Для проверки гипотезы на двух верхних уровнях использованы двухвыборочные критерии: F - критерий для проверки

равенства дисперсий, t -критерий – равенства средних значений. Уровни значимости критериев для обоих параметров оказались велики, выборки однородны и могут быть объединены. Процедура повторяет раздел 2.4. Результаты испытаний на уровне напряжения 13 кгс/мм^2 в общем вариационном ряду, расположенные в порядке возрастания, чередуются, что может свидетельствовать о том, что эти выборки так же однородны.

Данные представленные в таблицах 2.13, 2.14, 2.15 вычислялись для последующего получения параметров кривой усталости. Для образцов из листа 1163 РДТВ (Д) было получено большое количество неразрушенных образцов и метод определения параметров кривой усталости был иной. Поэтому полученные долговечности будут приведены на графике кривой усталости.

В общем виде использовалось следующее уравнение кривой усталости:

$$\lg N = B - m \lg \sigma$$

где N – долговечность в циклах нагружения; B , m – параметры кривой усталости; σ – напряжение.

Параметры кривой усталости для плиты 1163Т (Д, П), листа 1163РДТВ (П) вычислялись по следующим формулам:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \overline{\lg N_i} + m \sum_{i=1}^k n_i \lg \sigma_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \lg \sigma_i \sum_{i=1}^k n_i \overline{\lg N_i} - \sum_{i=1}^k n_i \sum_{i=1}^k n_i \lg \sigma_i \overline{\lg N_i}}{\sum_{i=1}^k n_i \sum_{i=1}^k n_i (\lg \sigma_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^k n_i \lg \sigma_i \right)^2}$$

В результате были получены параметры кривых усталости, приведенные в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Параметры кривых усталости для плиты 1163Т (Д, П), листа 1163РДТВ (П)

Полуфабрикат	Параметры кривой усталости
Плита 50 мм (Д)	$m = 6,3 ; B = 13,3$
Плита 50 мм (П)	$m = 5,6 ; B = 12,2$
Лист 2 мм (П)	$m = 7,187 ; B = 14,1$

Для 1163 РДТВ (Д) часть образцов не разрушилась при испытаниях на первоначальном уровне напряжения. Они были испытаны до разрушения на более высоких уровнях напряжения. Чтобы учесть предварительную наработку этих образцов оценка параметров КУ проводилась методом последовательных приближений. До достижения абсолютной погрешности оценок обоих параметров потребовалось 7 приближений. Результаты приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Параметры кривой усталости 1163РДТВ (Д)

№ приближения	m	$Abs(m_i - m_{i-1})$	B	$Abs(B_i - B_{i-1})$
1	6,32562		13,05535	
2	7,38387	1,05825	14,40768	1,35233
3	7,27151	0,11236	14,26423	0,14345
4	7,283	0,01149	14,2789	0,01467
5	7,28182	0,00118	14,27739	0,00151
6	7,28194	0,00012	14,27755	0,00016
7	7,28193	1E-05	14,27753	2E-05

По результатам обработки экспериментальных данных были получены параметры кривых усталости для полуфабрикатов 1163Т плита и 1163 РДТВ лист при частоте нагружения 40 Гц. В таблице 2.17 приведены параметры кривых усталости для 3-5 Гц (Справочник ОАК) и 40 Гц для рассматриваемых полуфабрикатов.

Таблица 2.17 – Параметры кривых усталости при разных частотах

Полуфабрикат	Параметры КУ 3-5 Гц	Параметры КУ 40 Гц

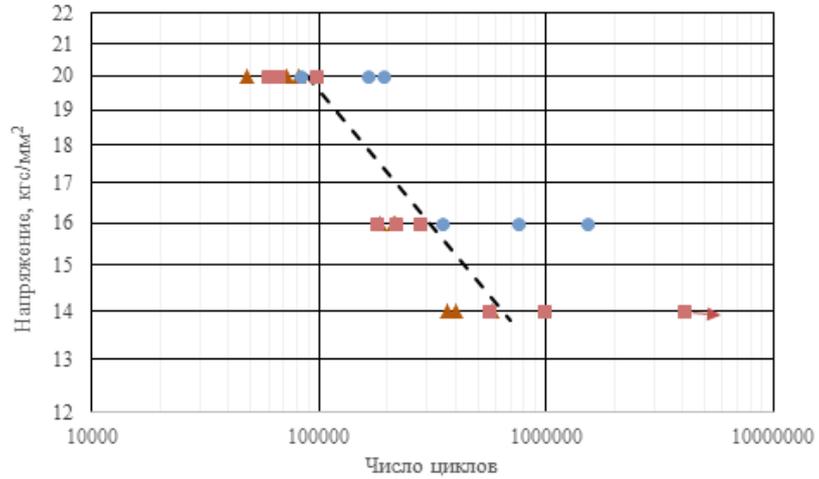


Рисунок 2.9 – Кривая усталости образцов из 1163Т (плита 50 мм), вырезанных вдоль проката (II)

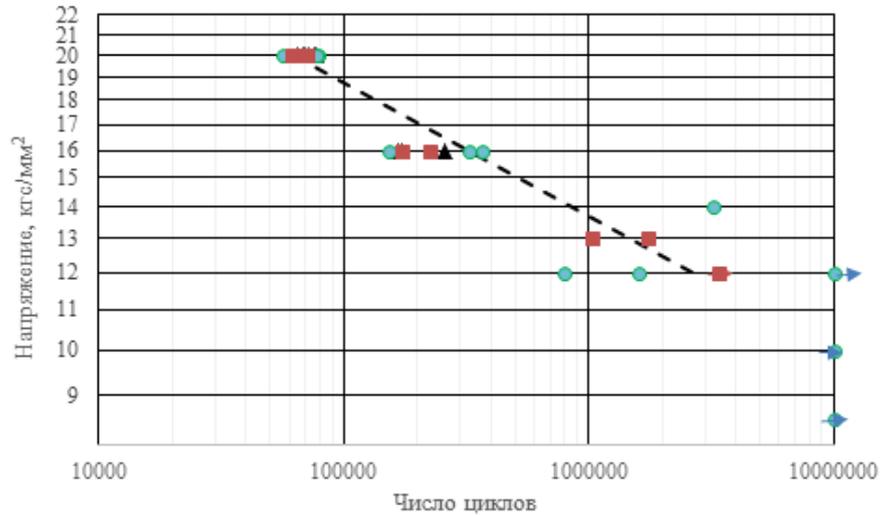


Рисунок 2.10 – Кривая усталости образцов из 1163 РДТВ (лист 2 мм), вырезанных вдоль проката (Д)

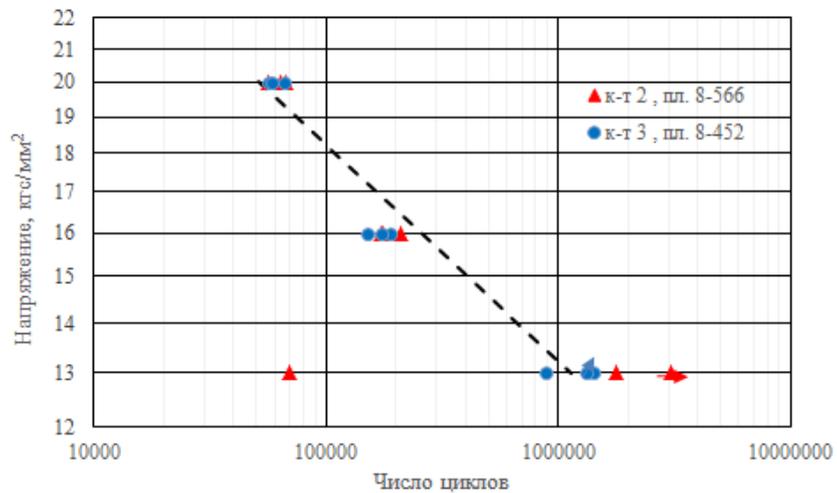


Рисунок 2.10 – Кривая усталости образцов из 1163 РДТВ (лист 2 мм),
вырезанных вдоль проката (П)

После построения кривых усталости для 1163 РДТВ, было обнаружено, что кривая может иметь излом и разбиваться на две кривые. На рисунке 2.11 представлена кривая для 1163 РДТВ (Д) с изломом.

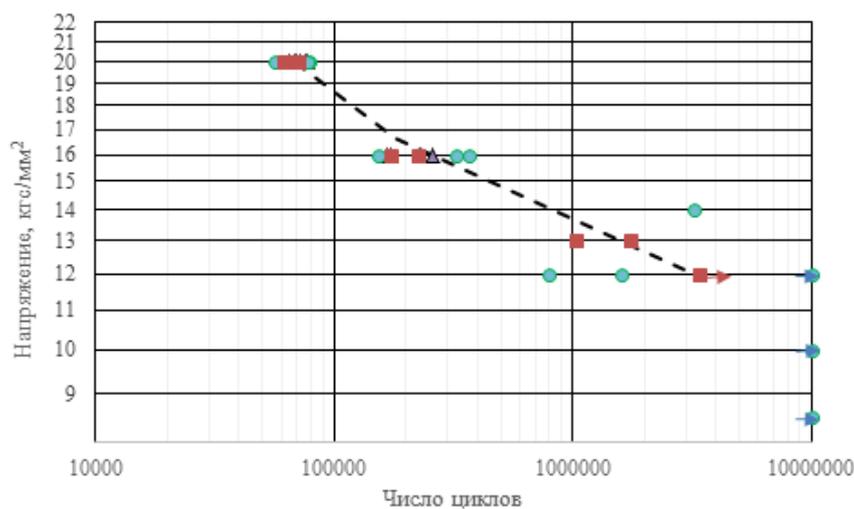


Рисунок 2.11 – Кривая усталости 1163РДТВ (Д) с изломом

Фактически на рисунке 2.11 представлены две кривые усталости: для базы испытаний 5×10^5 и 5×10^6 . Вычислив параметры для верхней кривой усталости получили, что $m = 5,2$; $B = 11,2$. Верхняя часть нас больше интересует, поскольку имеет аналогичную базу испытаний, как и кривая усталости при 3-5 Гц. Для образцов вырезанных поперек проката параметры кривой усталости получились: $m = 4,8$; $B = 11$. Однако и в этом случае мы имеем завышение долговечности в 2-2,5 раза. Это более реалистично, но для окончательного вывода относительно излома необходимо в дальнейшем испытать образцы на промежуточных уровнях нагружения.

2.6. Выводы к главе 2

В данной главе проведены исследования влияния способа сверления отверстия в образце на получаемые усталостные характеристики. Проведено экспериментальное определение влияния частоты нагружения образцов на параметры кривой усталости для современных алюминиевых полуфабрикатов 1163 Т плита и 1163 РДТВ лист.

Установлено, что рассмотренный заводской способ сверления отверстий не вносит дополнительного влияния на экспериментальные результаты и может использоваться взамен способа, рекомендованного ЦАГИ. Результаты данной части работы позволили перенести производство образцов полоса с отверстием на завод, чем существенно сократили процесс их производства и выполнения сертификационных испытаний алюминиевых материалов в рамках работ по отечественному среднемагистральному самолету.

По результатам проведения испытаний и обработки результатов получено, что современные алюминиевые полуфабрикаты сохраняют тенденцию к увеличению долговечности при повышении частоты нагружения образцов в эксперименте. Данное увеличение является существенным и в связи с этим необходимо строго соблюдать рекомендацию методики ЦАГИ по выбору частоты нагружения образцов при проведении испытаний.

Полученные кривые усталости при 40 Гц могут быть использованы для оценок авиационных конструкций, для которых нагружение с такой частотой характерно в эксплуатации. Например, конструкции вертолетов.

В качестве развития данного направления исследований предполагается провести аналогичные работы для других материалов.

3. Влияние различных способов сверления на получаемые усталостные характеристики для ПКМ

На сегодняшний день при выполнении механической лезвийной обработки (сверление, фрезерование) в деталях из полимерного композиционного материала (ПКМ) на различном технологическом оборудовании [3.1] возникают характерные повреждения кромок (рисунок 3.1). Характерная средняя глубина этих повреждений около 0.1мм (рисунок 3.2).

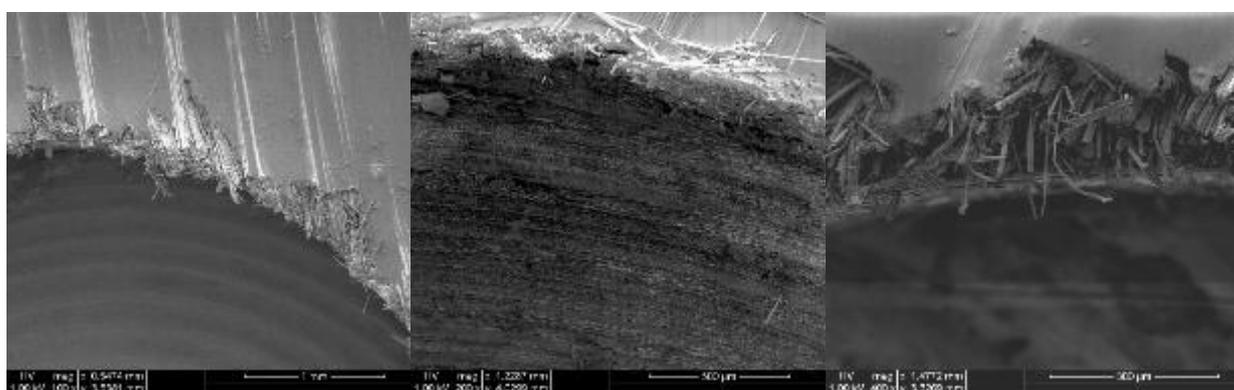


Рисунок 3.1 – Дефекты на кромках деталей из ПКМ после выполнения механической обработки (фрезерование, сверление)

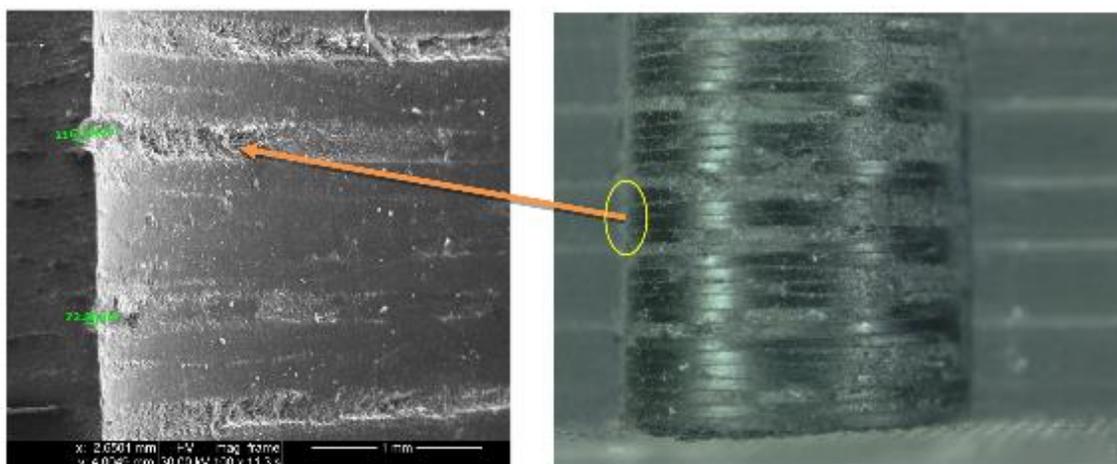


Рисунок 3.2 – Глубина повреждений на обработанных сверлом кромках отверстий (характерная глубина повреждений 0.1мм)

Образующиеся дефекты типа микротрещин, ворсистости, сколов связующего и расслоений обнаруживаются не только на обработанных кромках, но и проникают на некоторую глубину в прикромочной зоне (рисунок 3.3).

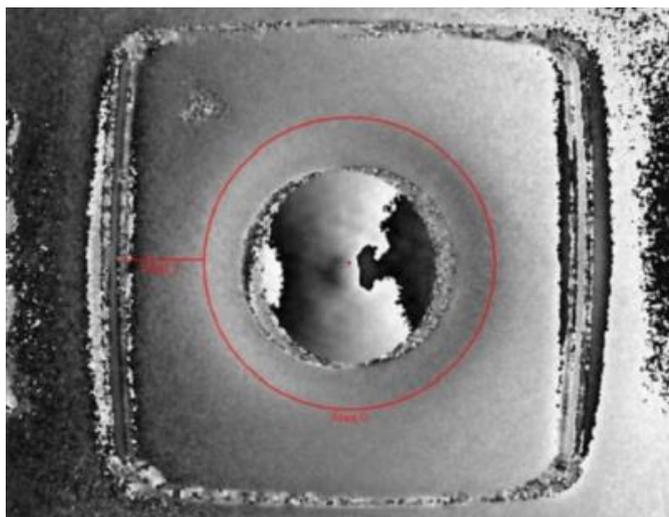


Рисунок 3.3 – Обнаруженная внутренняя поврежденная зона в образце из ПКМ после механической обработки (метод шерографии)

Дефекты образуются как за счет частичного отслоения затупленным инструментом, так и сколов полимерного связующего [3.1] наряду с ограниченным вытягиванием волокон наполнителя из матрицы до их разрушения (рисунок 3.4).

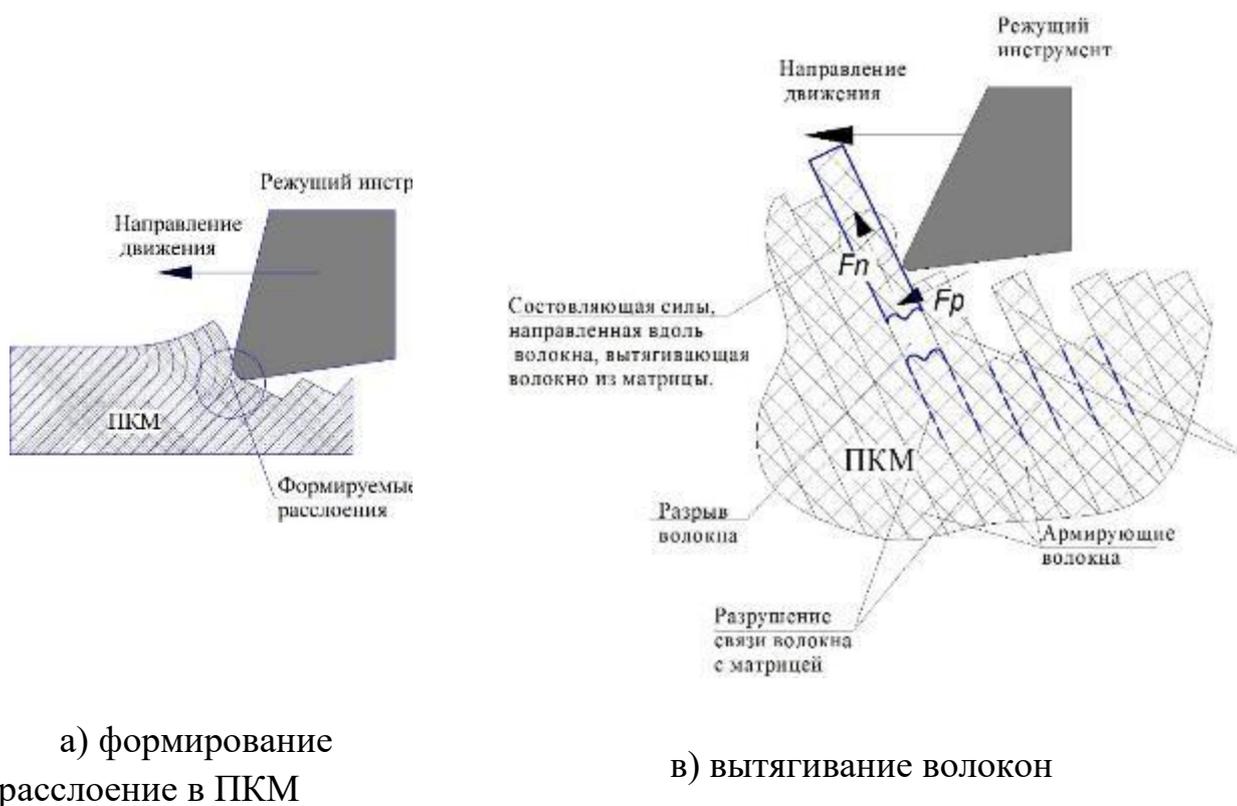


Рисунок 3.4 – Формирование внутренних повреждений в ПКМ при обработке

3.1. Изготовление образцов

Анализ состояния кромок деталей из ПКМ после механической обработки показывает, что основным нарушением целостности становятся растрескивание связующего и вытягивание волокон наполнителя (рисунок 1.4). Базовой рекомендацией является использование наиболее острого из предлагаемого режущего инструмента. Максимальное заострение может быть достигнуто на режущих пластинах и монолитном инструменте из твердых сплавов. При обработке стоит учитывать, что повреждения слоистого полимерного композиционного материала имеются не только на поверхности обработанных кромок, но и распространяются на некоторую глубину внутрь. Данные повреждения могут существенно влиять на прочностные свойства детали, в особой степени при усталостном нагружении и приводить к преждевременным расслоениям в зоне обработки. В связи с чем, представляется целесообразным контролировать износ инструмента не только по износу режущей кромки и увеличению масштабов внешних повреждений на обрабатываемой поверхности, но и по возрастающим нагрузкам при обработке. Это можно осуществить, проводя предварительную оценку износа инструмента на тестовом образце с применением устройства для измерения усилий резания. Для ответственных, высоконагруженных деталей из ПКМ, при возрастании усилий резания на 40% и более, необходимо производить замену режущего инструмента независимо от получаемого качества обработанных кромок.

Поскольку обработка инструментом с алмазным напылением дает большую шероховатость на обработанных кромках по сравнению с обработкой быстрорежущей сталью, можно рекомендовать следующий операционный выбор инструмента в технологическом процессе:

- ✓ Для деталей малонагруженных – обработку (сверление) выполнять инструментом с алмазным напылением;
- ✓ Для деталей высоконагруженных – обработку выполнять двумя инструментами:

- предварительная обработка инструментом с режущими частями с алмазным напылением (черновой проход);

- финишная обработка, сверлом с максимально заостренной режущей кромкой, при этом, для снижения вероятности расслоения внешних слоев со стороны выхода инструмента, на последних 1.5-2.0 мм обработки уменьшать усилие подачи на 30-40%.

Охлаждение выполнять воздухом со сдувом и высасыванием опилок. Скорость резания (по частоте вращения шпинделя) уточнить по отсутствию перегрева, определяемого дымлением, а также видимым оплавлением и прижогом связующего.

2. При необходимости повышения производительности обработки (повышение скорости резанья), а также обработки в глубоких карманах, в каналах и углах применять для охлаждения смазывающую охлаждающую жидкость (СОЖ) без масляных фракций.

3. Для предотвращения проникновения СОЖ в обработанные поверхности деталей из ПКМ, по завершению обработки выполнять сдувание остатков СОЖ струей сжатого воздуха, с дополнительным прогревом воздушным феном при температуре до 50°C.

В качестве режущего инструмента для обработки образцов из ПКМ на основе углеродного волокна экспериментальным путем был выбран инструмент фирмы Karnasch серии Professional Tools, который был специально разработан для обработки углепластика/стеклопластика. Эти инструменты делаются исключительно острыми благодаря лазерной обработке режущих кромок, что способствует чистому разрезанию волокон. Это увеличивает стойкость инструмента до 300% и позволяет избежать расслаивания материала, а также позволяет достичь наилучшего качества поверхности. Специальная геометрия сверл по углепластику/стеклопластику также позволяет производить сверление без расслоения материала.

Однако даже применение современного инструмента и должный выбор параметров обработки не позволяют полностью избавиться от повреждений на обработанных кромках.

В этой связи, целесообразна разработка дополнительного технологического процесса, позволяющего устранить иликратно снизить размеры повреждений на обрабатываемых деталях из ПКМ.

Среди них:

- применение, разработанного в Mitsubishi Gas Chemical, Inc, Япония, пленочного SLE-покрытия, которое по заявлению производителя снижает повреждаемость обрабатываемых деталей, а такжекратно повышает ресурс используемого инструмента;
- финишная обработка с применением абразивного инструмента, при использовании которого происходит шлифование поверхности детали из ПКМ при низких образующихся температурах и усилий, действующих на слоистый материал.

Повреждения, образующиеся на обработанных кромках деталей из ПКМ имеют глубину, как правило 0.1-0.15 мм. Обнаруженные повреждения удаётся удалить при помощи шарошки или наждачной бумаги (размерная характеристика зерна 200 мкм) и получить шероховатость поверхности не ниже Ra 1.6 (рисунки 3.5 и 3.6), при этом, за счёт снижения усилий, действующих на волокна наполнителя, не увеличивается размер внутренних повреждений. Однако, такой способ связан с применением дополнительного ручного труда.

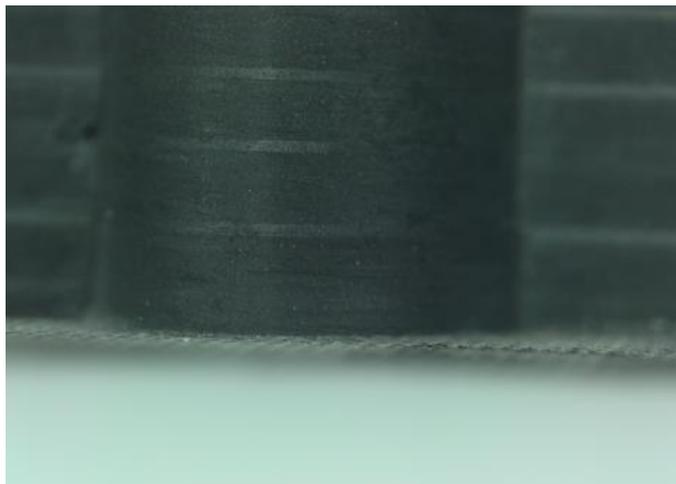


Рисунок 3.5 – Поверхность кромки после обработки шкуркой

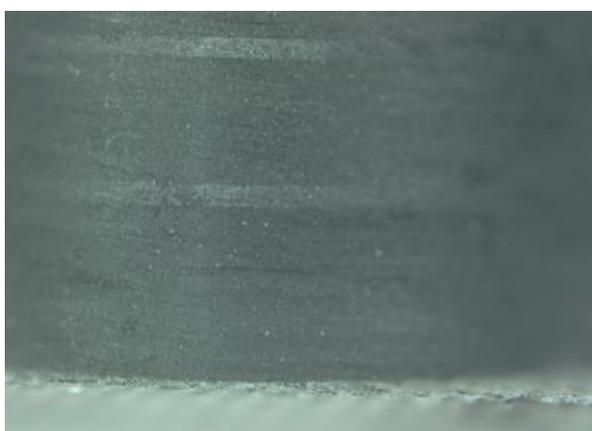


Рисунок 3.6 – Поверхность кромки после обработки шкуркой

В этой связи представляется целесообразным изготовление отверстий в деталях из ПКМ в два этапа:

- изготовление отверстия с припуском 0.1-0.2 мм сверлом с острой режущей кромкой и с технологическими параметрами обработки позволяющие минимизировать внутренние повреждения в детали;
- проведение чистовой обработки отверстия инструментом с абразивной поверхностью (размерная характеристика зерна 200 мкм).

Исследование результатов применения при изготовлении отверстий в ПКМ инструментом с абразивной поверхностью разбито на следующие этапы:

- 1 этап, обработка пробных отверстий в детали из ПКМ инструментом с различной геометрической формой рабочей части, определение рационального

диапазона технологических параметров обработки (скорость вращения инструмента, подача);

- 2 этап, исследование поверхности обработанных пробных образцов с применением оптического (с увеличением до 200 крат) и электронного сканирующего микроскопов, сопоставление полученных результатов с результатом сверления лезвийным инструментом;

- 3 этап, определения влияния технологии изготовления отверстий на усталостную долговечность;

- 4 этап, формирование рекомендаций для определения рациональной формы инструмента и величины зернистости на поверхности абразивного инструмента.

Для проведения финишной обработки отверстий в деталях из ПКМ использовался алмазно-абразивный инструмент «МонАлиТ», предоставленный фирмой «Рус-Атлант МК», г. Москва.

На данном этапе исследований проводился анализ результатов обработки абразивным инструментом и влияния основных технологических параметров обработки (скорость вращения инструмента и подача) на ее результат.

Фотоизображения инструмента представлен на рисунке 3.7.

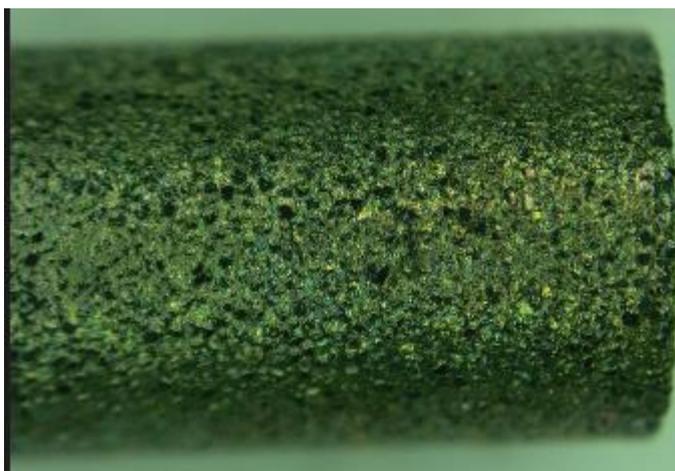


Рисунок 3.7 – Фотография рабочей части абразивного инструмента

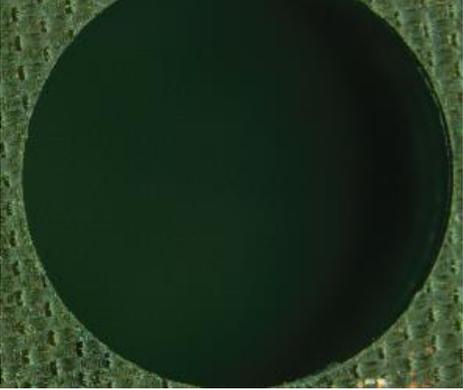
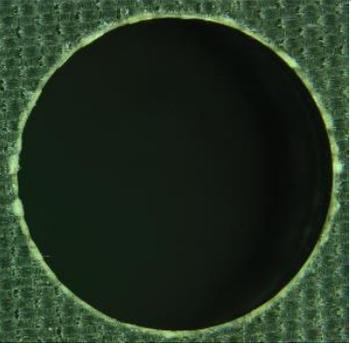
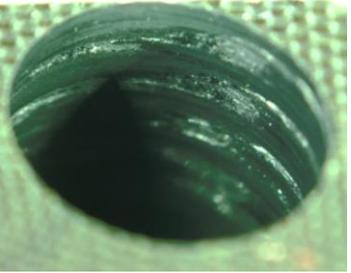
	Со стороны входа
	Со стороны выхода
	Вид обработанной кромки, видны вырывы волокон наполнителя из матрицы

Рисунок 3.9 – Фотоизображения Результаты изготовления отверстий лезвийным инструментом Сверлом Karnasch D6.

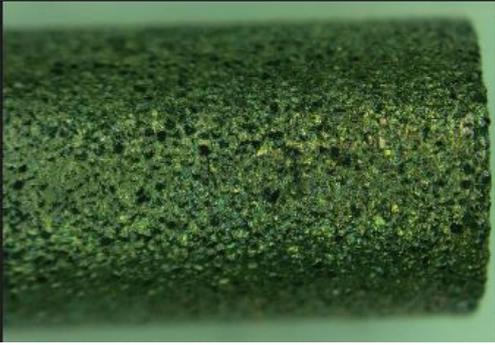
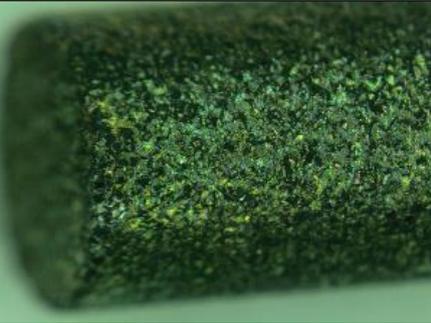
	
До обработки	После обработки

Рисунок 3.10 – Фотоизображение абразивного инструмента до и после обработки

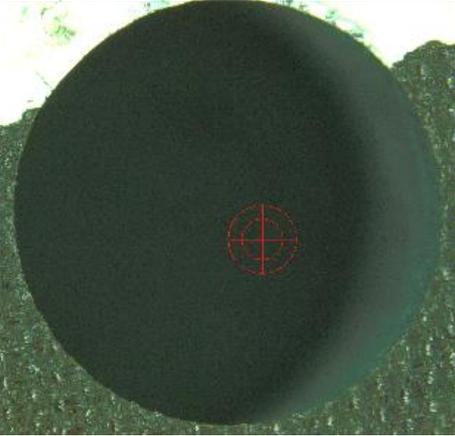
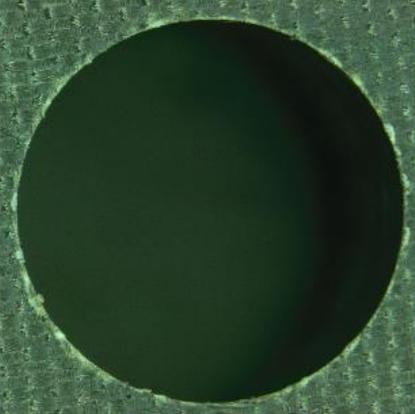
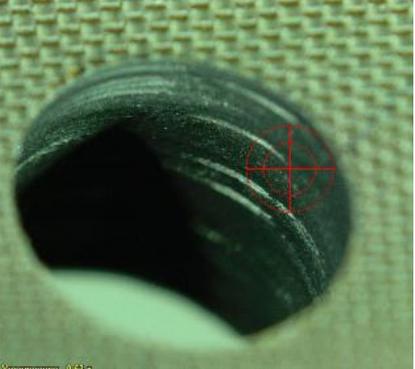
	<p>Со стороны входа. Сколов на входе инструмента не обнаружено.</p>
	<p>Со стороны выхода. Видны зоны с незначительным отслоением внешнего слоя стеклоткани, сколов на выходе инструмента не обнаружено.</p>
	<p>Вид обработанной кромки. Поверхность кромок гладкая, вырывы волокон наполнителя отсутствуют</p>

Рисунок 3.11 – Фотоизображения результата доработки отверстий абразивным инструментом

В процессе обработки также проводился замер температуры в зоне резания. На рисунках 3.12, 3.13 представлены характерные термограммы и распределение температуры вблизи оси отверстия при его обработке.

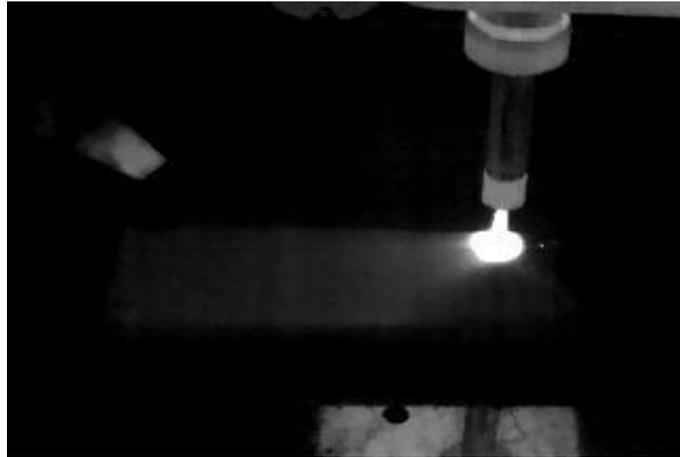


Рисунок 3.12 – Процесс замера температуры в зоне резания

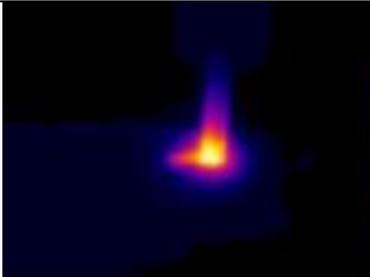
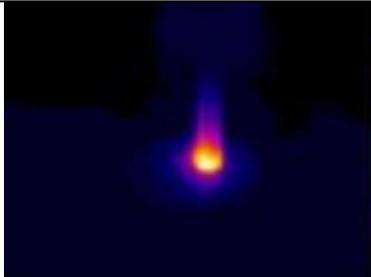
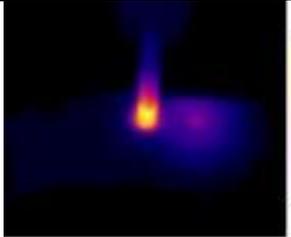
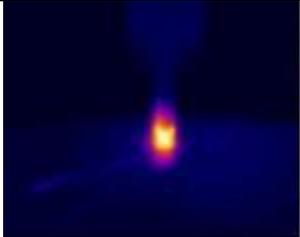
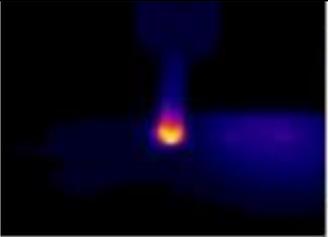
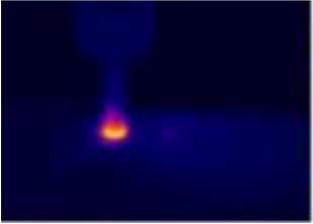
Режим обработки	Использованный инструмент Karnasch	
	Исходный	SLE
S=3000об/мин, F=100мм/мин	 <p>$T_{\max}=201^{\circ}\text{C}$</p>	 <p>$T_{\max}=169^{\circ}\text{C}$</p>
S=4000об/мин, F=250мм/мин	 <p>$T_{\max}=126^{\circ}\text{C}$</p>	 <p>$T_{\max}=108^{\circ}\text{C}$</p>
S=5000об/мин, F=500мм/мин	 <p>$T_{\max}=125^{\circ}\text{C}$</p>	 <p>$T_{\max}=100^{\circ}\text{C}$</p>

Рисунок 3.13 – Результаты замера температуры в зоне резания

На рисунке 3.14 представлена зависимость, определенной с применением тепловизора температуры в зоне обработки, от технологических режимов сверления.

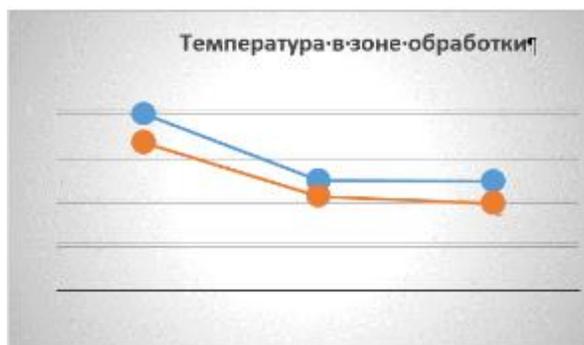


Рисунок 3.14 – Зависимость температуры в зоне обработки от технологических режимов. ----- исходная, ----- с применением SLE покрытия.

Видно, что применение SLE-пленки приводит к снижению температуры в зоне обработки в среднем на 20%

На рисунке 3.15 представлены изображения кромок изготовленных отверстий в детали из ПКМ с применением SLE покрытия и без с использованием инструмента Karnasch Leuco (рисунок 3.15).

	<p>S=3000об/мин, F=100мм/мин</p> <p>Без SLE/ с SLE</p>
	<p>S=4000об/мин, F=250мм/мин</p> <p>Без SLE/ с SLE</p>

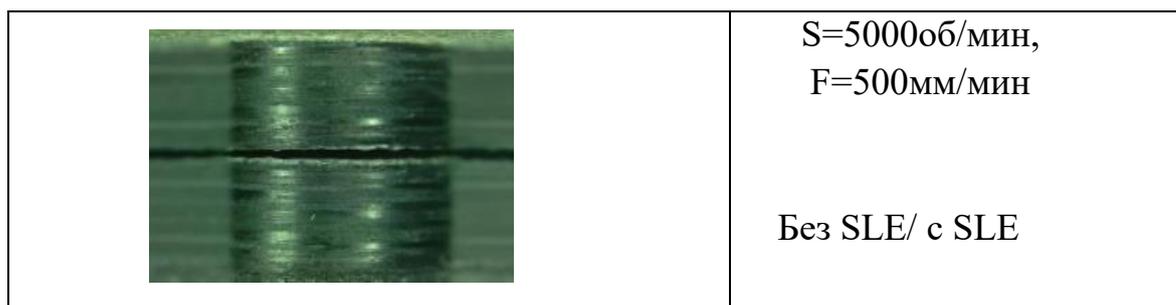


Рисунок 3.15 – Результаты обработки инструментом Karnasch

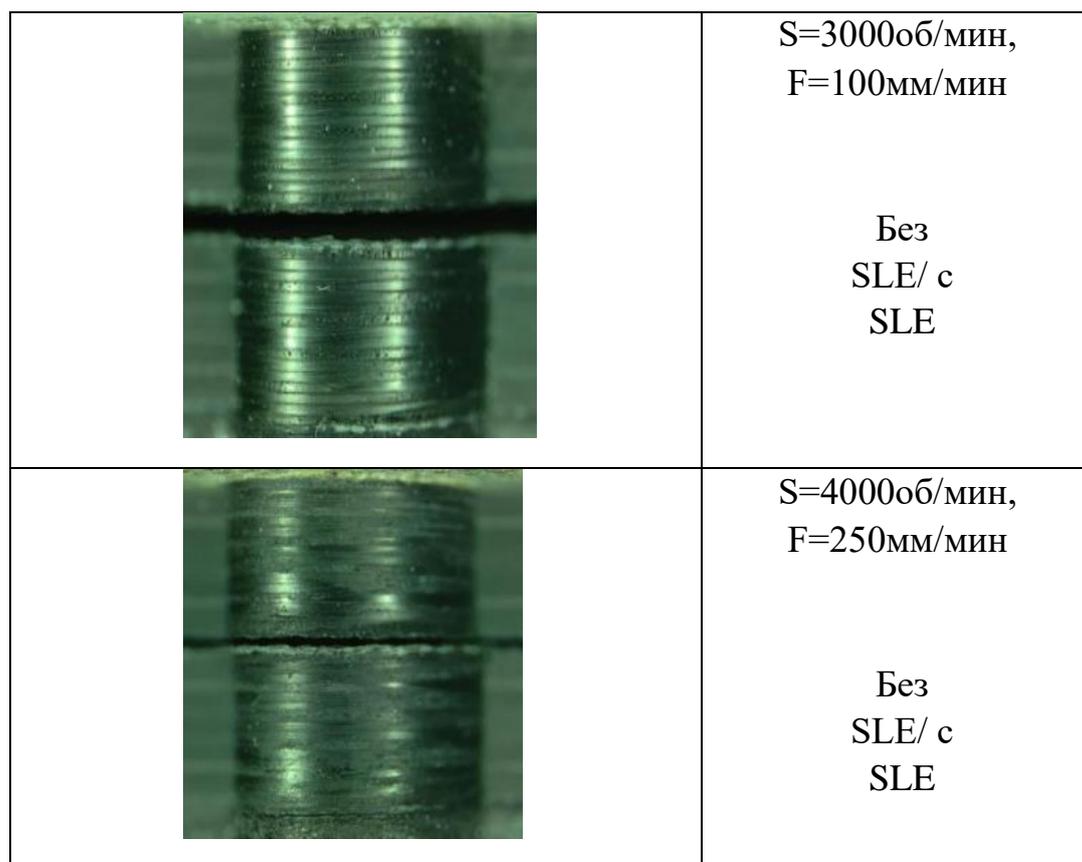


Рисунок 3.16 – Результаты обработки инструментом Karnasch

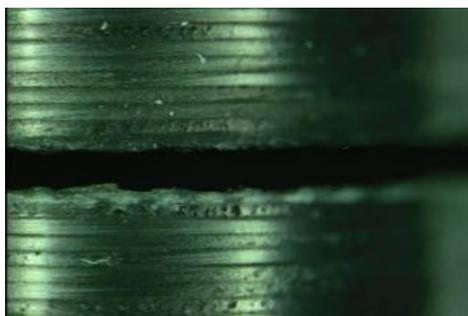


Рисунок 3.17 – Режим 1 инструмент Лойко (увеличенное изображение)

Изготовленные срезы были исследованы также с применением электронного сканирующего микроскопа (ЭСМ), который дает более контрастное изображение поверхности и позволяет обнаружить микроповреждения, а также при схожем увеличении обладает большей глубиной резкости, что позволяет видеть всю исследуемую поверхность.

На рисунке 3.18 представлены полученные изображения кромок изготовленных отверстий.

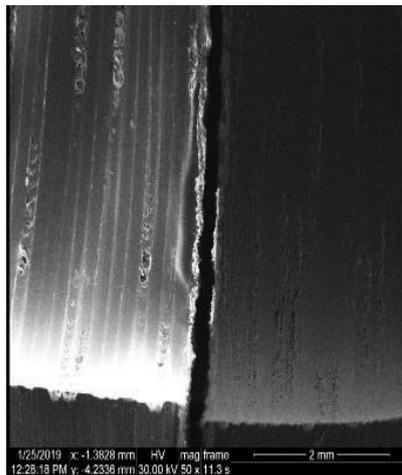


Рисунок 3.18 – Изображения обработанных кромок (слева – исходная, справа – с SLE

3.1.1 Выводы к разделу

1. Применение технологического процесса с доработкой кромок отверстий с применением абразивного инструмента позволяет снизить размеры повреждений.

2. Результаты исследований образцов обработанных абразивным инструментом с применением оптического микроскопа и ЭСМ совпадают. На поверхности отверстия обработанного алмазно-абразивным инструментом повреждений в виде сколов связующего, вырывов волокон наполнителя не обнаружено.

3. По результатам предварительных испытаний образцов на усталостную долговечность показано, что в образцах, доработанных абразивным инструментом расслоения начинаются при количестве циклов нагружения от 130 000, в то время

как в образцах, обработанных только лезвийным инструментом – от 30 000 циклов. По-видимому, применение абразивного инструмента обеспечило уменьшение внешних повреждений на обрабатываемых кромках и объема внутренних повреждений в виде микро-расслоений, что и сместило момент начала расслоений в образцах.

4. Полученный положительный результат применения абразивного инструмента позволяет продолжить работы и подтвердить предварительные выводы при проведении экспериментального исследования влияния абразивного инструмента на усталостную долговечность образцов на большем количестве, не менее 15 штук.

5. Представлены результаты применения SLE-пленки при сверлении отверстий в пластине из углепластика. Использовано два типа инструмента: сверло с корончатой заточкой Karnasch; сверло с конусной заточкой Leuco с углом при вершине 85° переходит в 27°

6. Для соответствия технологических рекомендаций производителя SLE-пленки целесообразно применить при сверлении инструмент из карбида вольфрама (без защитного покрытия) и с соответствующим углом при вершине.

7. Результаты замеров температуры в зоне обработки показали, что применение SLE-пленки снижает её значение в среднем на 20%. Кроме того, применение SLE – пленки снижает повреждаемость обработанных кромок детали со стороны входа инструмента.

8. Размеры повреждений (сколы связующего и вырывы волокон наполнителя из матрицы) на обработанных поверхностях деталей из углепластика не зависят от применения или отсутствия SLE – пленки (возможно это связано с неподходящей для использования с SLE-пленкой геометрической формой инструмента).

9. Применение SLE – пленки по-видимому приводит к снижению усилий при сверлении, что может снизить масштаб внутренних повреждений в

обрабатываемых деталях и, как следствие, повысить их прочностные характеристики.

10. Применение SLE-покрытия не снижает усталостную долговечность обработанных образцов.

11. Целесообразно провести изготовление отверстий с замером усилий возникающих при обработке с применением динамометра.

12. Целесообразно провести расширенные исследования по определению необходимой толщины SLE-пленки, формы используемого инструмента, а также технологических параметров обработки.

3.2. Проведение экспериментальных исследований

В данном разделе представлены результаты испытаний образцов, изготовленных по трем технологиям открытия отверстий. Образцы произведены в НТЦ НПК ФГУП «ЦАГИ». По результатам производства образцов был составлен соответствующий приложение.

3.1 Объект испытаний

В представленной работе были исследованы образцы со свободным отверстием вырезанные из панели, изготовленной из углепластика Hexcel M21/34%/UD194/ IMA ($n_c=16$ слоёв) и стеклоткани Hexcel M21/45%/120 ($n_c=2$ слоя). Схема укладки слоев материала $[0_c/ (+45/-45/0/90/02/+45/-45)]_S$, номинальная толщина $t_n=3.174$ мм.

Образцы типа полоса с отверстием вырезаны из панели под углом 0° и под углом 90° . Эскиз образца представлен на рисунке 3.19.

Для проведения испытаний, по согласованию с заказчиком, использовались образцы отличные от стандартных.

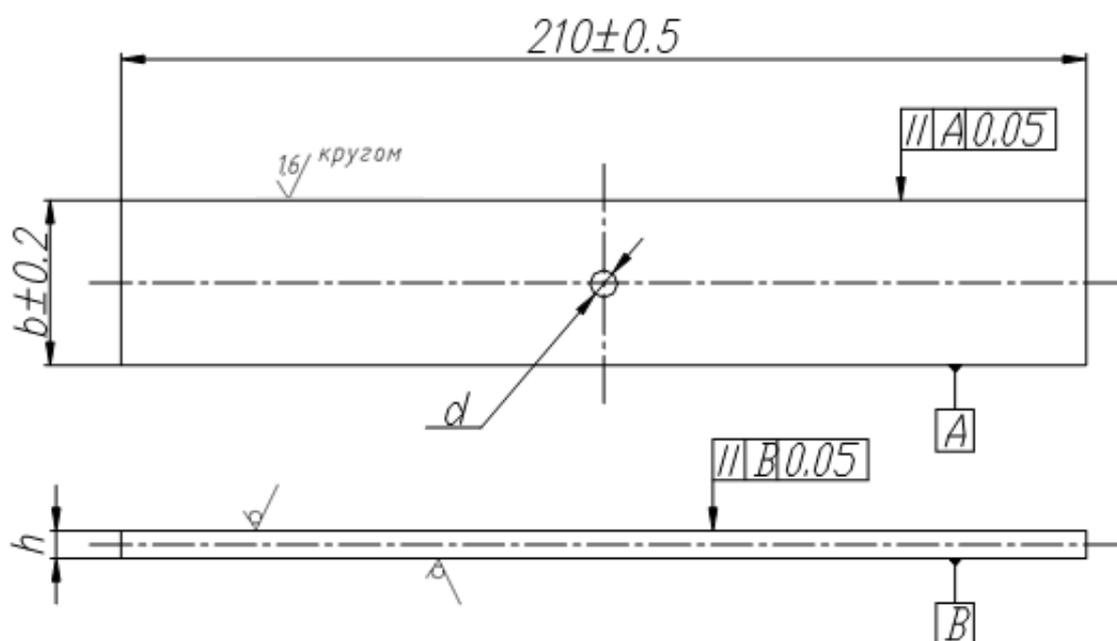


Рисунок 3.19 – Эскиз образца для испытаний

На рисунке 3.20 представлена типовая укладка образцов.

Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Направление укладки	0°	+45°	-45°	0°	90°	0°	0°	+45°	-45°	-45°	+45°	0°	0°	90°	0°	-45°	+45°	0°
Материал	M21-45%-120	M21 / 34% / УП194/1МА															M21-45%-120	

Рисунок 3.20 – Типовая укладка для образцов

Распределение по типам испытаний образцов вырезанных вдоль 0° представлено на рисунке 3.21.

Технология	Кол-во образцов	Тип испытания
Технология идентичная заводской	6	Статика
Технология идентичная заводской	20	R=-1
Технология с абразивным инструментом	6	Статика
Технология с абразивным инструментом	19	R=-1

Рисунок 3.21 – Распределение образцов вырезанных вдоль 0°

Для образцов, вырезанных вдоль 90° распределение по режимам нагружения представлено на рисунке 3.22.

Технология	Кол-во образцов	Тип испытания
Технология идентичная заводской	6	Статика
Технология идентичная заводской	23	R=-1
Технология с абразивным инструментом	6	Статика
Технология с абразивным инструментом	23	R=-1
Технология с применением пленки	10	R=-1
Технология с применением пленки	4	Статика

Рисунок 3.22 – Распределение образцов вырезанных вдоль 90°

3.2 Методика испытаний

Испытания образцов в виде полосы со свободным отверстием проводились в соответствии с методом испытаний СТО СМК 7-112-2016.

При нагружении в условиях сжатия применялось специальное приспособление для исключения потери устойчивости образца. Оно состоит из обкладок, подкрепляющих образец с двух сторон и четырех болтов для фиксации этих обкладок на образце. Образец в приспособлении представлен на рисунке 3.23. На рисунке 3.24 показано приспособление в разобранном виде.



Рисунок 3.23 – Образец в противоизгибном приспособлении для испытания на сжатие

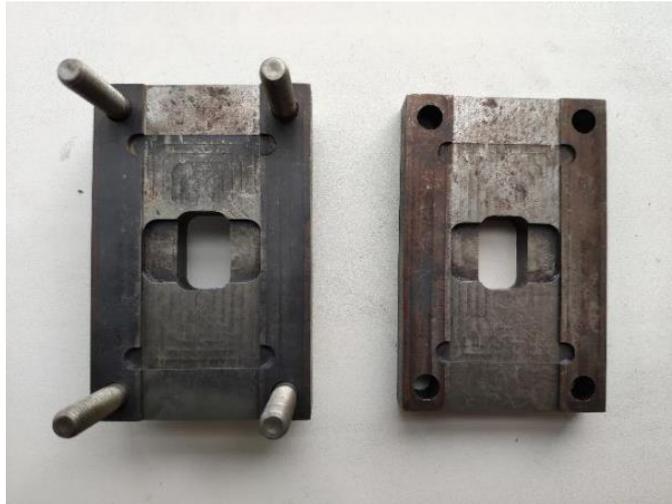


Рисунок 3.24 – Элементы противоизгибного приспособления для испытания на сжатие образцов

Момент затяжки болтов оснастки контролировался с помощью электронного динамометрического ключа. В первую очередь все болты затягивались моментом 0.5 Н·м, затем болты верхнего ряда до 1 Н·м. Верхняя часть образца – часть образца, помещённая в захват испытательной машины, расположенный на неподвижной траверсе. Нижняя часть образца – часть образца, помещённая в гидрозхват, смонтированный на штоке испытательной машины.

Статические испытания проводились на электрогидравлической машине INSTRON-10, которая осуществляет растяжение и сжатие образца с постоянной скоростью и обеспечивает измерение нагрузки и перемещения с точностью до ± 1 % от измеренной величины. Захваты обеспечивают надежное крепление образцов в положении, когда продольная ось симметрии образца совпадает с осью нагружения.

Испытания образцов проводились при стандартной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423.

Статическая прочность (σ_c), МПа, определялась по формуле

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{b \cdot t_n}, \quad (3.1)$$

где P_{max} – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;

b – среднее значение ширины образца, измеренной в трех точках, мм;
 t_n – номинальная толщина образца, мм.

Усталостные испытания образцов в виде полосы со свободным отверстием проводились в соответствии с методом испытаний СТО СМК 7-112-2016. Метод основан на проведении испытаний плоских образцов на усталость с заданным значением асимметрии цикла и постоянной скоростью нагружения. Для предотвращения общей потери устойчивости образца в процессе испытаний использовалось специальное противозгибное приспособление.

Усталостные испытания проводились на электрогидравлических машинах INSTRON-10-1, INSTRON-10-2, INSTRON-10-3, которые позволяют осуществлять нагружение образца с постоянной скоростью и обеспечивают измерение нагрузки и перемещения с точностью до $\pm 1\%$ от измеренной величины. Захваты обеспечивают надежное крепление образцов в положении, когда продольная ось симметрии образца совпадает с осью нагружения. В процессе испытаний осуществлялся контроль постоянства заданной амплитуды нагрузки.

Испытания образцов проводились при стандартной атмосфере 23/50 по ГОСТу 12423. Испытание проводились при асимметриях нагружения $R = -1$.

Параметры цикла усталостного нагружения образцов (коэффициент асимметрии цикла) вычисляют по формуле:

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}}, \quad (3.2)$$

где P_{max} – максимальное значение нагрузки цикла, Н;

P_{min} – минимальное значение нагрузки цикла, Н.

.

3.3. Обработка результатов

По результатам проведенных испытаний были получены экспериментальные данные для различных технологий сверления отверстий. Обработанные результаты

испытаний в виде параметров кривых усталости и рассеяния приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Обработанные экспериментальные данные

Тип обработки отверстия	m	C	S_{lgN}	Кол-во образцов
Стандартная-0	27.34	72.12	0.44	10
Стандартная-90	9.03	24.69	0.16	16
Стандартная+шлиф-инстр.-0	22.49	60.33	0.40	11
Стандартная+шлиф-инстр.-90	11.88	30.78	0.18	15
Пленка-0	26.29	69.67	0.23	14
Пленка-90	12.25	31.66	0.14	12

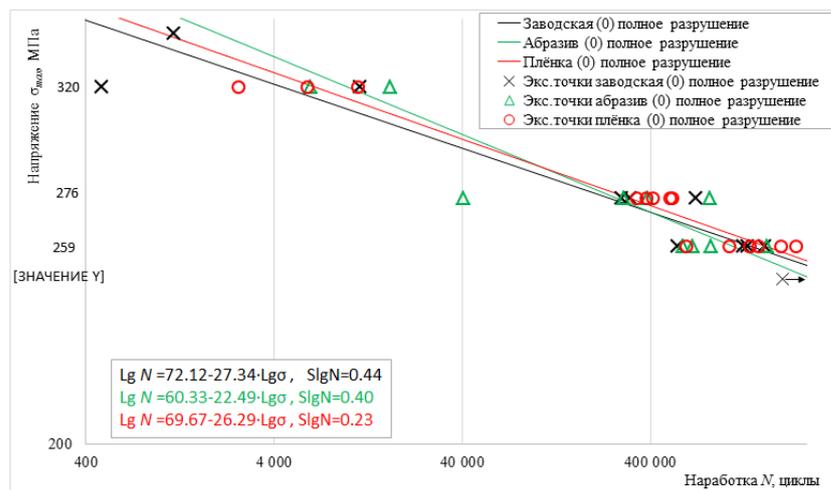


Рисунок 3.25 – Кривая усталости для образцов, вырезанных вдоль 0° для трех технологий производства отверстия

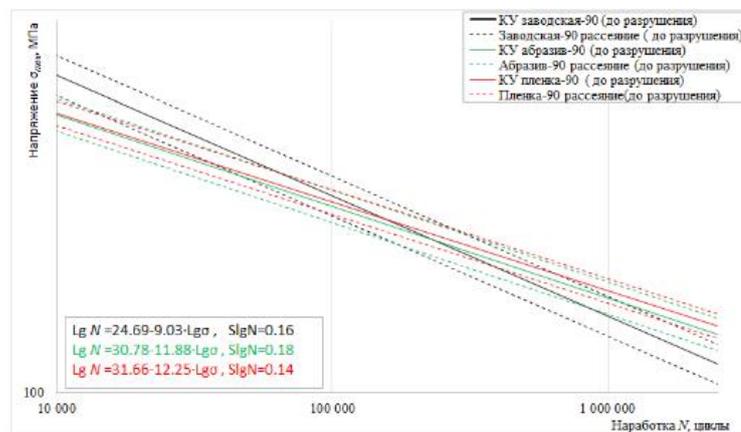


Рисунок 3.26 – Кривая усталости для образцов, вырезанных вдоль 90° для трех технологий производства отверстия

Для образцов, вырезанных вдоль 0° , было получено:

✓ Результаты испытаний образцов с обработкой с абразивом показывают большую долговечность, чем образцов с заводской технологией и с применением пленки в диапазоне от 5×10^3 до 10^5 циклов, а в диапазоне от 10^5 до 1.6×10^6 циклов наоборот образцы с заводской технологией и с пленкой показывают большую долговечность, чем образцы с абразивом согласно КУ и S_{lgN} .

✓ Образцы с заводской технологией обработки отверстия и с применением пленки показали примерно одинаковую долговечность в исследуемом диапазоне согласно КУ и рассеянию S_{lgN} , однако рассеяние S_{lgN} для образцов с пленкой меньше в 2 раза, чем для заводской обработки.

✓ Соответственно можно считать, что обработка с применением пленки показываем лучший результат в диапазоне от 10^5 до 1.6×10^6 циклов.

Для образцов, вырезанных вдоль 90° , выводы по некоторым пунктам отличаются:

✓ Результаты испытаний образцов с заводской обработкой показывают большую долговечность, чем образцов с абразивом и с пленкой в диапазоне от 7×10^3 до 1.5×10^5 циклов, а в диапазоне от 1.5×10^5 до 10^6 циклов наоборот образцы с абразивом и с пленкой показывают большую долговечность, чем образцы с заводской технологией согласно КУ и S_{lgN} .

✓ Образцы с абразивом и с пленкой показали примерно одинаковую долговечность в диапазоне 7×10^3 до 1.5×10^5 циклов согласно КУ и рассеянию S_{lgN} . В диапазоне от 1.5×10^5 до 10^6 циклов образцы с пленкой показывают большую долговечность, чем с абразивом. S_{lgN} образцов с пленкой меньше, чем для образцов с абразивом.

✓ Соответственно можно считать, что обработка с применением пленки показываем лучший результат.

В целом для двух групп образцов делается общий вывод, что оптимальные результаты показывают образцы, произведенные с применением полимерной пленки, что можно объяснить лучшими восстанавливающими свойствами пленки

при заполнении дефектов в процессе производства, в отличие от шлифовального инструмента (абразивного).

3.4. Выводы к главе 3

В данной главе рассмотрены различные способы сверления отверстий в образцах из ПКМ.

Показано, что стандартный способ, использующий лезвийный инструмент может оставлять на поверхности отверстия различные производственные дефекты: сколы, вырывы и т.д. Наличие производственных дефектов крайне негативно сказывается на усталостных характеристиках материала.

Получены экспериментальные данные по трем способам сверления, а также построены кривые усталости материала для каждого типа отверстия.

Обосновано, что наилучшие результаты с точки зрения получаемых долговечностей и рассеяния дает способ сверления с применением полимерной пленки.

Представленные результаты позволяют существенно уменьшить рассеяние усталостных характеристик композиционных материалов, что в свою очередь дает возможность понизить соответствующий коэффициент надежности и увеличить определяемый ресурс воздушного судна у которого основные силовые элементы изготовлены из композиционных материалов.

4. Разработка методики испытаний для определения овализации отверстия

4.1. Введение

Согласно принятой в инженерной практике и хорошо отработанной на механических соединениях системе условных расчетов смятие представляет собой обособленный вид разрушения соединения. Но на самом деле смятие, а точнее точка перехода от смятого материала к несмятому, является инициатором для таких видов разрушения, как разрыв детали, срез детали или вырыв материала детали.

Это объясняет эффективность применения прессовых посадок в целях повышения усталостных характеристик соединения. Таким образом, картина напряженно-деформированного состояния элементов соединения на самом деле намного сложнее, чем та, которую можно будет описать, опираясь на традиционную систему инженерных условных расчетов. Для металлических деталей удалось обосновать приемлемые уровни осредненного напряжения смятия. В случае рассмотрения композитных материалов (КМ) необходимо учитывать анизотропию характеристик, влияние структуры пакета [4.1], а также влияние геометрических параметров, среди которых согласно [4.2] доминируют толщина детали и диаметр крепежного элемента (КЭ). Существующие стандарты эти особенности не учитывают. Так, в стандарте [4.3] рекомендуется использовать только один вариант толщины детали и диаметра КЭ, но в нем не исключается возможность использования (по необходимости) и других вариантов геометрических параметров, правда, вопрос анизотропии свойств не рассматривался вообще.

Для однозначной оценки допустимого уровня осредненных напряжений смятия необходимо назначить признаки предельного допустимого уровня смятия материала. Этот вопрос дискутируется до сих пор. Так, в работе [4.4] предлагается ориентироваться на 4%-ную овализацию отверстия. Этот критерий успешно используется для металлических деталей и одним из возможных объяснений выбора такого значения может быть тот факт, что для посадки на холодно предельно допустимый натяг составляет 5%. Правда, для металлов [4.5] допустимый уровень предельных осредненных напряжений смятия ниже предела пропорциональности (кроме случая прессовой посадки). В случае слоистых КМ обеспечить посадку с натягом затруднительно, возможно поэтому в стандарте [4.3] допустимая овализация отверстия снижена до 2%. Здесь следует отметить, что речь идет об остаточной овализации, то есть в материале детали произошла пластическая деформация, что в КМ недопустимо, так как в месте смятия зарождаются микротрещины, которые могут распространиться внутрь пакета и вызвать в дальнейшем разрушение. Таким образом, первым аргументом против на

4.2. Общие сведения о методике испытаний

На данный момент на территории РФ отсутствует документ в области стандартизации, устанавливающий порядок проведения испытаний полимерных композиционных материалов (ПКМ) на прочность при смятии с получением диаграммы зависимости овализации отверстия от нагрузки.

В ФГУП «ЦАГИ» был разработан проект ОСТ «Метод определения прочности при смятии и характеристик диаграммы «нагрузка – овализация отверстия» образцов ПКМ». По данному методу были проведены испытания односрезных зенкованных соединений из ПКМ с получением значений овализации при статическом и усталостном нагружении.

Апробация метода проводилась на односрезных соединениях ПКМ (рисунок 4.2) с определением овализации отверстий сухих образцов при нормальной и пониженной температуре минус 55°C, влагонасыщенных образцов при повышенной температуре 82°C при статическом нагружении в ходе последовательных циклов нагружения, сухих образцов при нормальной температуре при усталостном нагружении в зависимости от количества циклов при отнулевом растяжении и симметричном цикле.

В ходе проведения эксперимента, по результатам эксперимента и расчетно-экспериментальному моделированию при испытаниях на растяжение образца, были обнаружены недостатки в используемом методе испытания.

Недостатки, обнаруженные в ходе проведения эксперимента связаны, в том числе, с искажением полученных результатов в связи с фактическим вкладом в характер разрушения образца также таких факторов как пластические деформации болта, несовершенство приспособления для испытаний методы измерения.

Образец для проведения испытаний представлял собой односрезное соединение - полоса из ПКМ с зенкованным отверстием диаметром 6 мм, скреплённая с помощью болта с металлической пластиной. Чертеж представлен на рисунке 4.2.

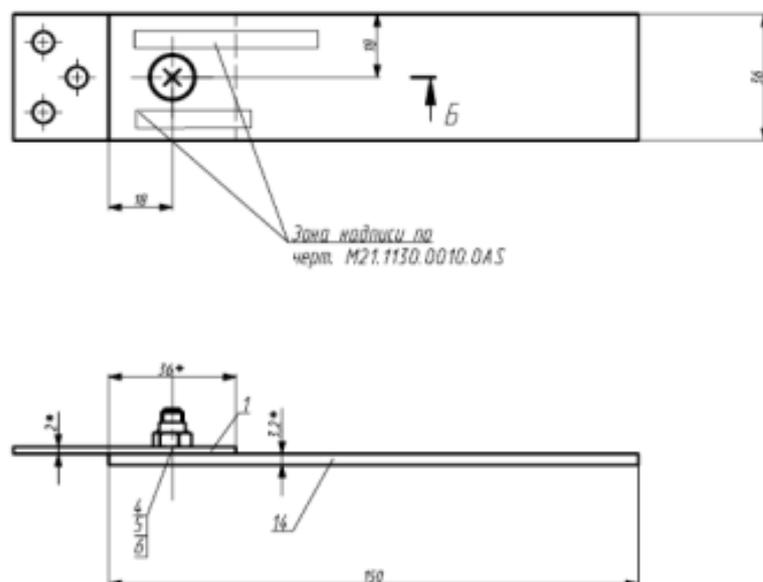


Рисунок 4.2 – Эскиз образца

Специальное стальное приспособление для испытания показано на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 - Приспособление для испытания односрезного одноболтового соединения

Перемещение пластины относительно центра отверстия измерялось с помощью экстензометра. Точки, соответствующие расположению ножек экстензометра, находятся на расстоянии 25 мм друг от друга (что соответствует базе экстензометра) и показаны на рисунке 4.4.

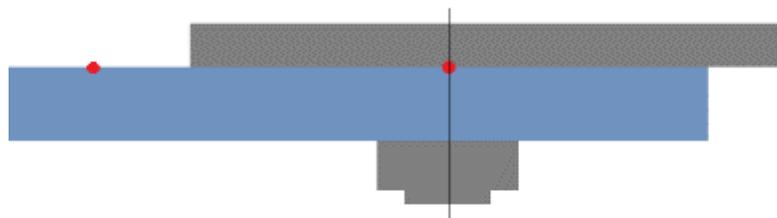


Рисунок 4.4 – Точки, соответствующие расположению ножек экстензометра

4.3. Статические испытания образцов

Были получены значения напряжения смятия, предела прочности на срез болтов и податливости при статическом нагружении образцов одноболтовых односрезных соединений с зенкованными болтовыми отверстиями с затянутыми болтами.

Вычисления показателей проводились по следующим формулам 1-8.

Относительное смещение сечения по центру отверстий стыкуемых углепластиковой и металлической пластин относительно друг друга рассчитывалось по формуле:

$$\Delta = \frac{\Delta L}{d_{отв}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где ΔL – смещение, мм;

$d_{отв}$ – диаметр отверстия, мм.

Начальная овализация отверстия при первом нагружении (рисунок 2.1):

$$\Delta_n = \Delta_{+10\text{МПа}} - \Delta_{-10\text{МПа}}, \% \quad (2)$$

где $\Delta_{+10\text{МПа}}$ – относительное смещение углепластиковой и металлической пластин при нагружении образца до 10 МПа (при первом нагружении);

$\Delta_{-10\text{МПа}}$ – относительное смещение углепластиковой и металлической пластин при нагружении образца до минус 10 МПа (при первом нагружении).

Овализация отверстия (после каждого цикла нагружения):

$$\Delta_d = \Delta_{+10\text{МПа (разгр.)}} - \Delta_n, \% \quad (3)$$

где $\Delta_{+10\text{МПа}}$ (разгр.) - относительное смещение углепластиковой и металлической пластин при разгрузении образца до 10 МПа (см. рисунок 4.5).

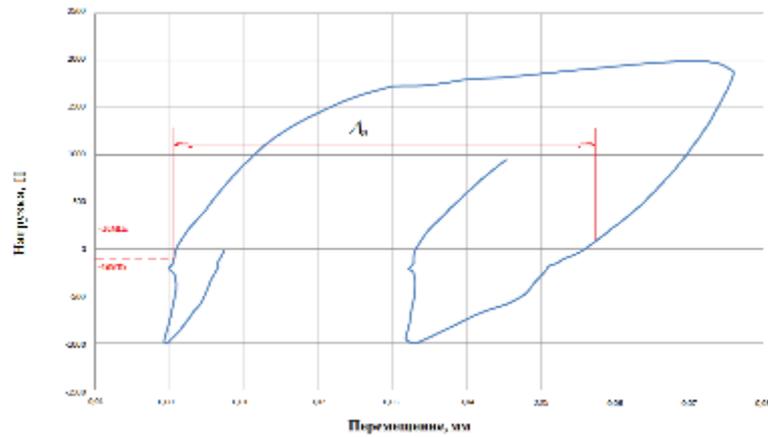


Рисунок 4.5 – Определение начальной овализации отверстия Δ_n и относительного смещения углепластиковой и металлической пластин. Податливость определялось по формуле:

$$\Pi = \frac{L_{P_{\max}}}{P_{\max}}, \text{ мм/Н}, \quad (4)$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка, Н;

$L_{P_{\max}}$ - смещение (мм) соответствующее максимальной нагрузке.

Напряжение смятия для образцов:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{P_{\max}}{d_{\text{отв}} t_n}, \text{ МПа}, \quad (5)$$

$d_{\text{отв}}$ – диаметр болтового отверстия, мм;

t_n – номинальная толщина образца.

Напряжение смятия с учётом зенковки:

$$\sigma_{\text{см}}' = \frac{P_{\max}}{d_{\text{отв}} t_n + ab}, \text{ МПа}, \quad (6)$$

где $a=3,46$ мм, $b=2,00$ мм – размеры зенковки (см. рисунок 4.6).

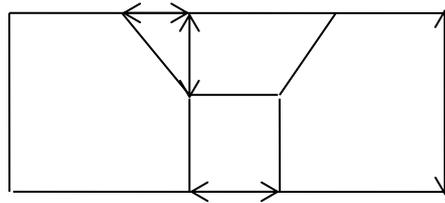


Рисунок 4.6 – Размеры зенковки болтового отверстия в образце типа 1А.13

Напряжение среза болта:

$$\tau_{срб} = \frac{P_{\max}}{\pi r^2}, \text{ МПа}, \quad (7)$$

где r – радиус болта, мм.

Овализация отверстия образца при достижении напряжения смятия определялась по формуле:

$$\Delta_{см} = \frac{\Delta L_{см}}{d_{отв}} 100\%, \quad (8)$$

где $\Delta L_{см}$ – перемещение, соответствующее достижению напряжения смятия.

Статические испытания проводились путем нагружения-разгружения образца несколькими ступенями (рисунок .7).



Рисунок 4.7 – Статическое нагружение образца

Для каждой ступени нагружения определялись напряжение смятия, податливость и овализация.

По полученным результатам строились зависимости конечной овализации отверстия на каждой ступени нагружения от максимальной нагрузки в соответствующей ступени (см. рисунок 4.8).

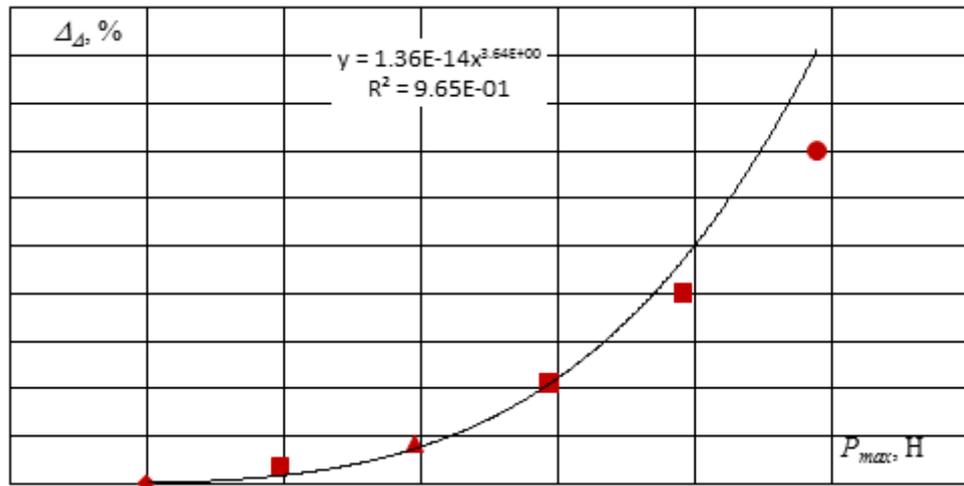


Рисунок 4.8 – Типовая зависимость овализации от максимальной нагрузки на каждой ступени нагружения
Овальзация отверстия происходила с учетом разрушения болта (срез головки болта) (см. фото разрушения на рисунке 4.9).

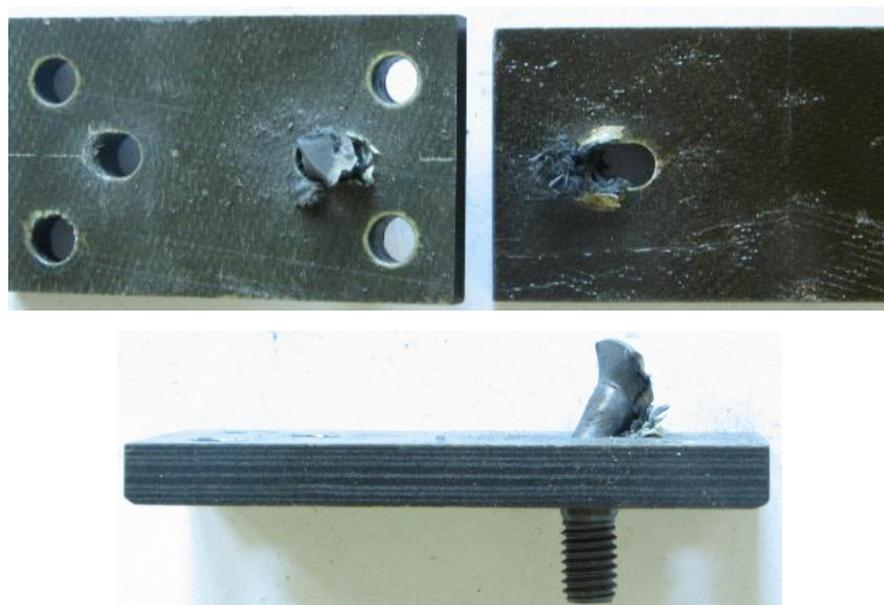


Рисунок 4.9 – Вид статического разрушения образца

По результатам проведенных статических испытаний было установлено, что существенную погрешность в испытания вносит деформирование и разрушение вспомогательной пластины (рисунок 4.9), деформирование болта и другие факторы требующие установления.

4.4. Усталостные испытания образцов

Испытания на усталость проводились с коэффициентами асимметрии цикла $R=-0,1$ и $R=-\infty$ и частоте нагружения от 1 до 3 Гц до достижения перемещения 3 мм.

По результатам испытаний каждой группы образцов строились кривые усталости с определением ее показателей для овализации отверстия 1%, 2%, 4%, 6%, 8% и 10%, а также зависимость овализации отверстия от наработки образца (см. рисунок 4.10). В протоколе испытаний приводилась аппроксимированная зависимость.

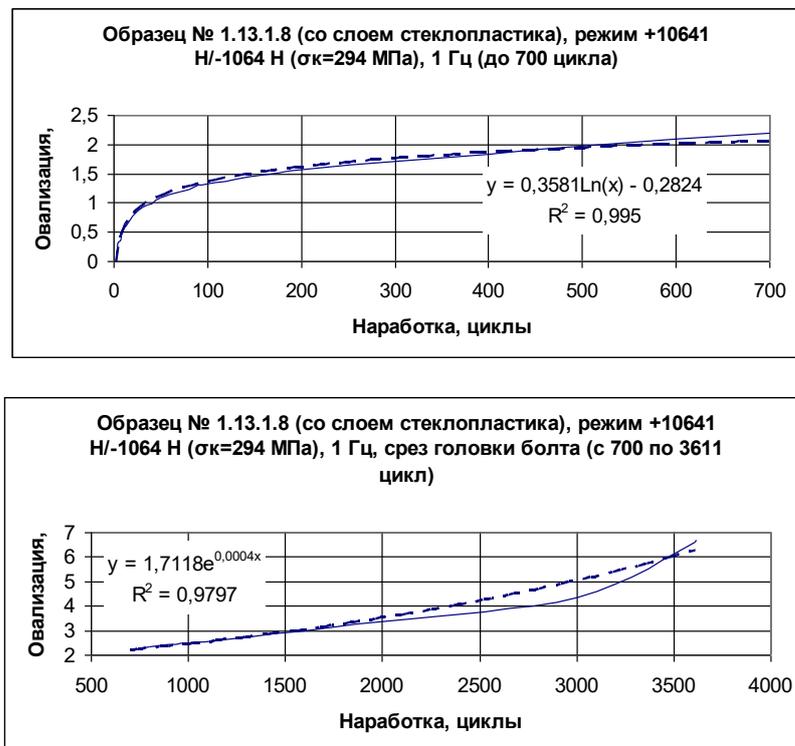


Рисунок 4.10 – Аппроксимация зависимости овализации отверстия от наработки образца

На рисунке 4.11 представлена кривая усталости для серии образцов, полученная при уровне овализации 0,5%, 1%, 2%, 4%.

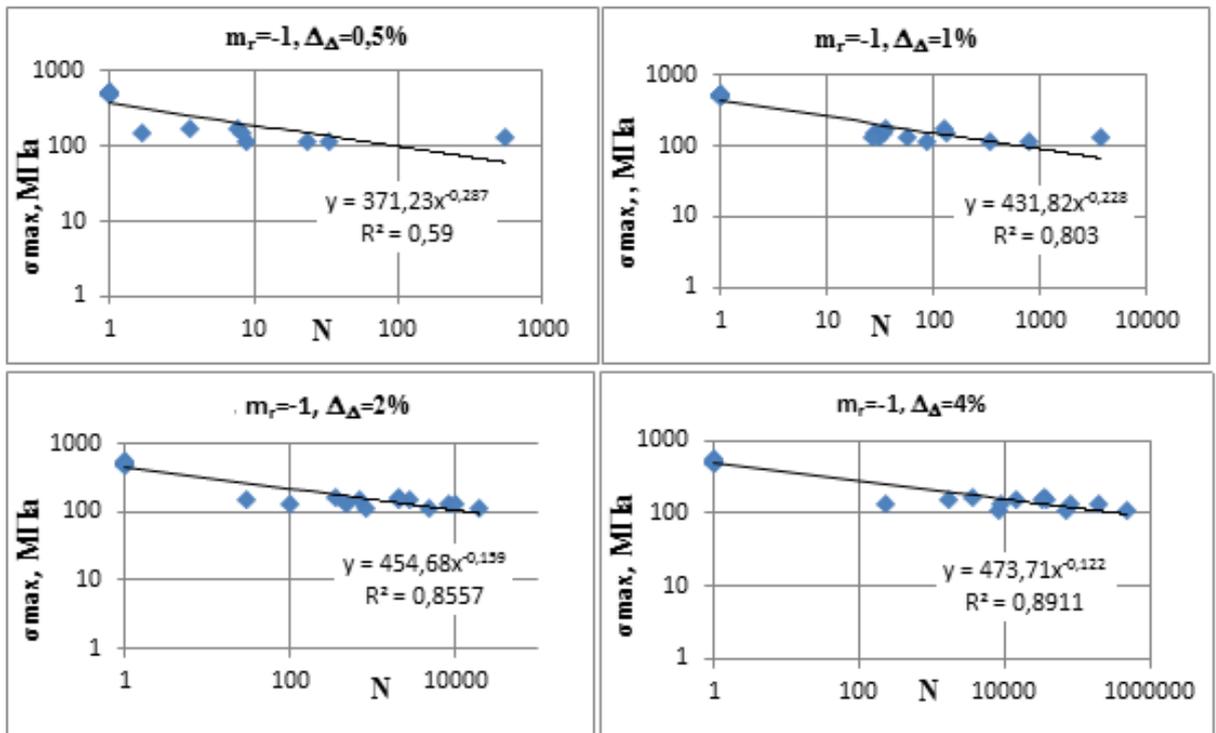


Рисунок 4.11 – Кривые усталости для различного уровня овализации

Как можно увидеть на рисунках 4.11 овализация отверстия растет стремительно: из-за несовершенства метода испытаний и изгиба болта, а также существующих зазоров.

На рисунке 4.12 показано разрушение вспомогательной пластины и болта.



Рисунок 4.12 – Усталостные повреждения образца

Разрушение отверстия вспомогательной пластины вносит существенный вклад в фиксацию овализации, фактически в эксперименте меряется не только овализация зачетного отверстия, а и отверстия вспомогательной пластины, перемещения от изгиба болта. Дополнительно следует отметить, что был допущен просчет в методологической части. Для усталостных испытаний, взаимное смещение пластин определялось по перемещению штока испытательной машины. Данный подход так же вносит существенную погрешность.

4.5. Конечно элементный расчет

Для более детального рассмотрения процесса испытаний было решено провести моделирование с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Abaqus.

На рисунке 4.13 представлена разработанная КЭ модель образца. На рисунке 4.14 изображено нагружение и закрепление модели.

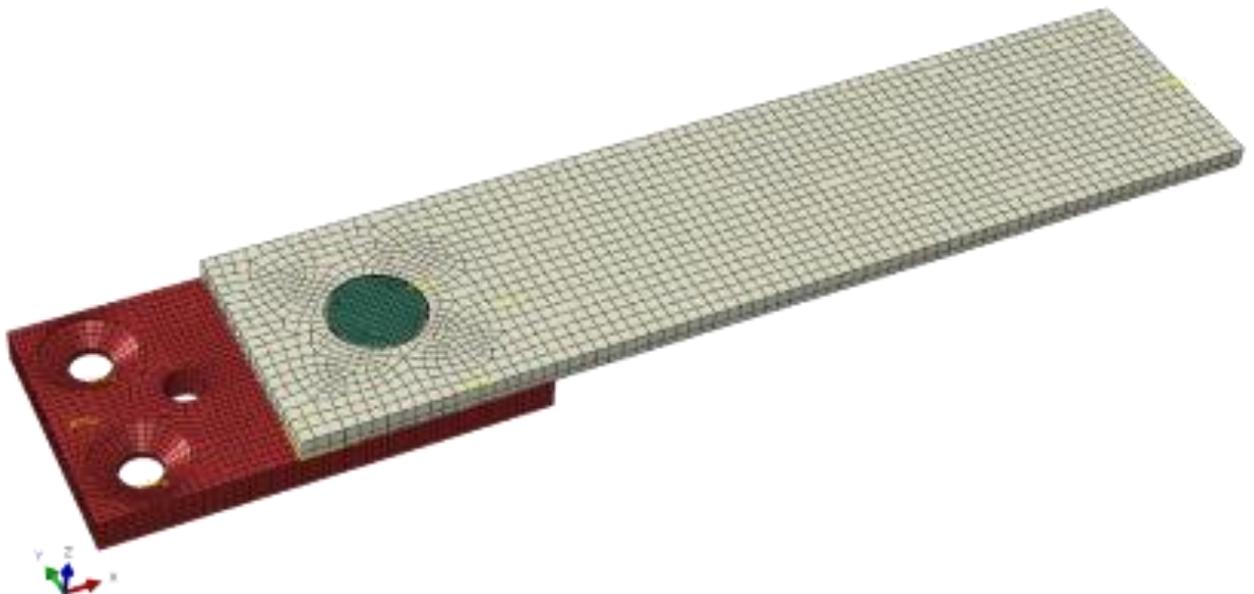


Рисунок 4.13 – Конечно-элементная модель образца

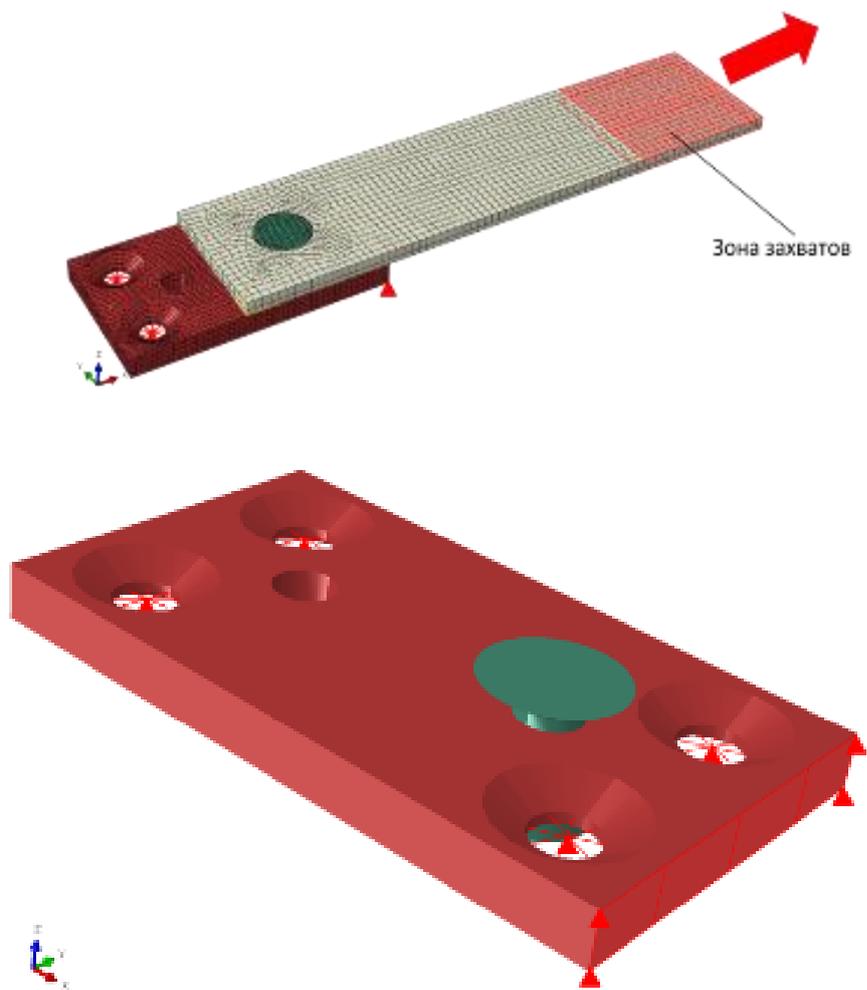


Рисунок 4.14 – Нагружение и закрепление модели

На рисунке 4.15 представлено напряженно-деформированное состояние образца при максимальной нагрузке в виртуальном эксперименте.

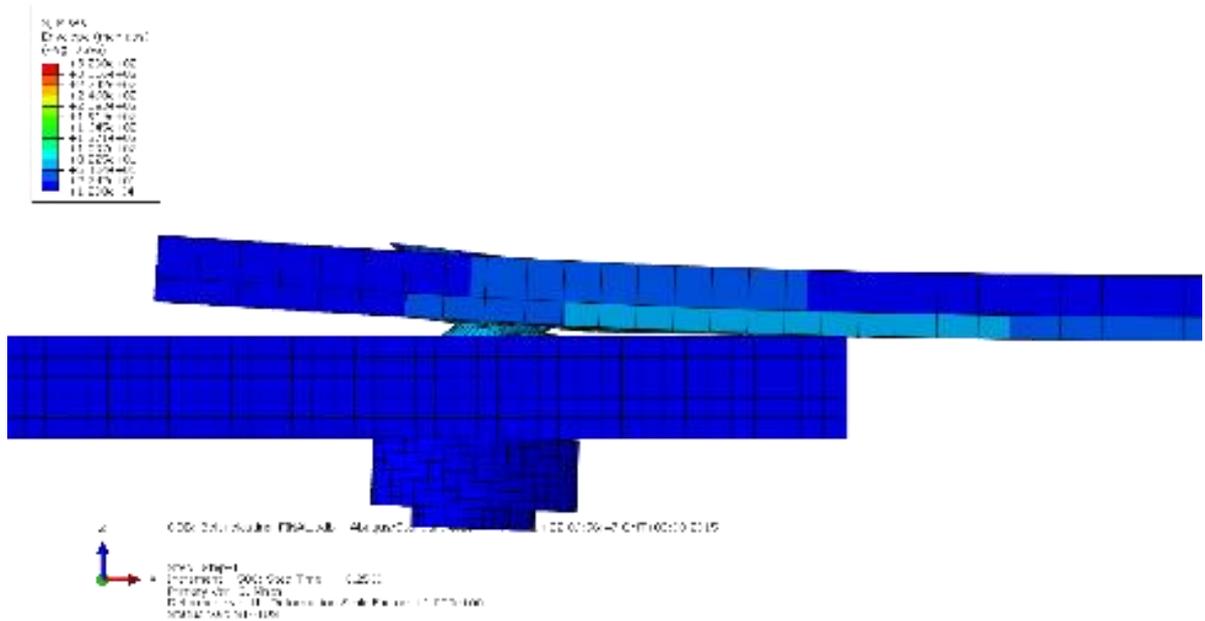


Рисунок 4.15 – Деформирование образца при максимальной нагрузке

Характер деформирования образца (рисунок 4.15) показывает, что помимо продольных сил, из-за изгиба болта, возникают «отрывные» силы и образец изгибается. Так же видно, что изгиб болта вносит существенный вклад в перемещение.

На рисунке 4.16 представлен график зависимости смещения пластин от нагрузки с указанием этапов разрушения материала образца в зоне контакта.

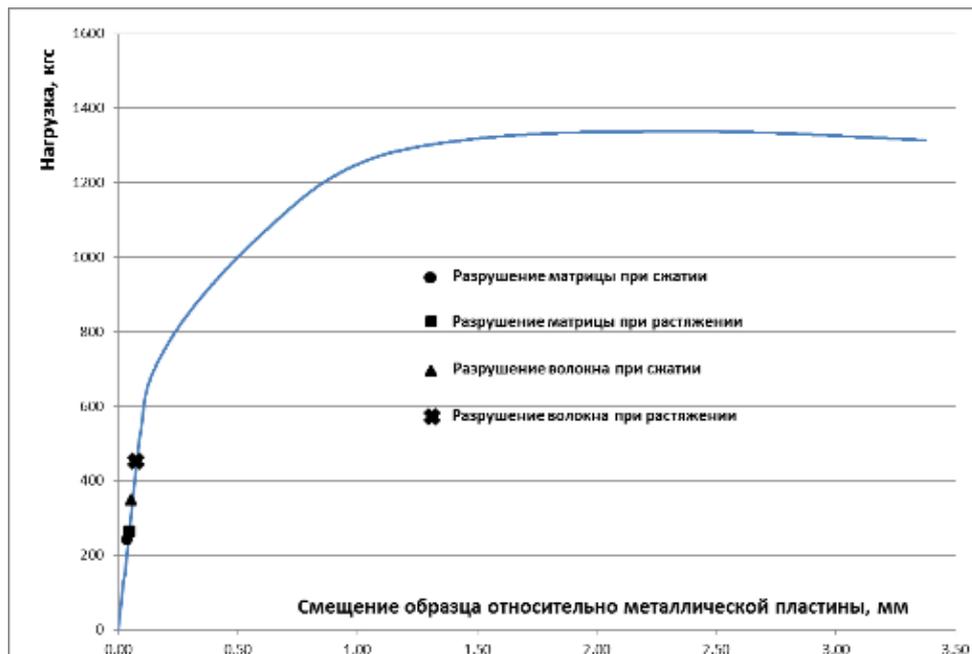


Рисунок 4.16 – График зависимости взаимного смещения от нагрузки

На рисунке 4.17 показаны диаграммы «нагрузка-перемещение» для расчёта и для эксперимента. Синим, показан график, соответствующий методу определения перемещения, максимально точно моделирующему эксперимент. Для его построения значения перемещений были взяты в двух точках, соответствующих точках установки лапок экстензометра в реальном эксперименте. Как видно на рисунке 4.17, график из испытаний и расчётный (синий) график, в целом, близок по форме и характеру кривой. В эксперименте нагружение происходило ступеньками с промежуточными разгрузками, при моделировании данный процесс не реализовывался.

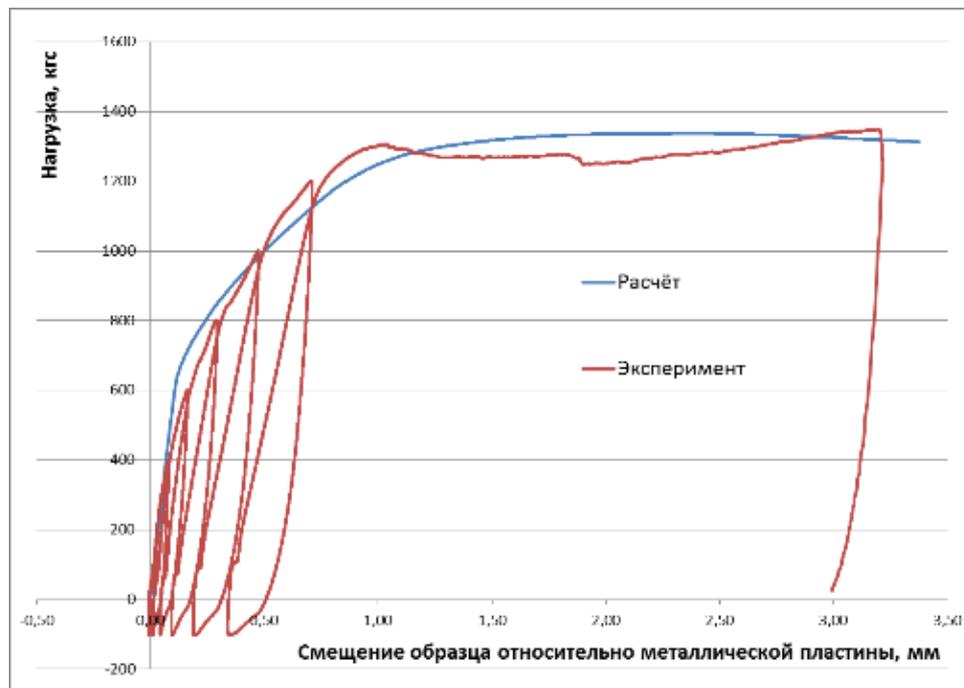


Рисунок 4.17 – Сравнение эксперимента и расчета

На рисунке 4.18 представлено сравнение роста овализации от нагрузки в эксперименте и расчете

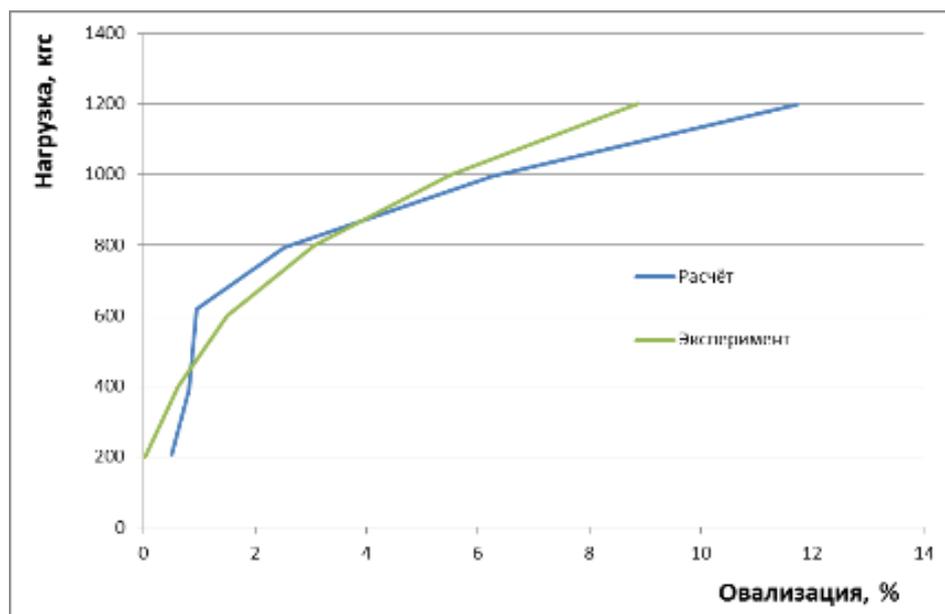


Рисунок 4.18 – График сравнения роста овализации в расчете и эксперименте

В таблице 4.3 представлено сравнение экспериментальных по овализации данных и полученных в процессе расчета.

№ цикла	Нагрузка, кгс	Овальзация, %		Отклонение
		Расчёт	Эксперимент	
1	200	0,51	0,34	17%
2	400	0,82	0,94	33%
3	600	0,94	1,81	98%
4	800	2,53	3,39	34%
5	1000	6,27	5,82	7%
6	1200	11,72	9,19	22%
Среднее отклонение 35%				

Данные таблицы 2.3 показывают, что с ростом нагрузки расхождение расчета и эксперимента растет до момента, когда доминирующую роль в перемещении не начинает играть процесс пластического деформирования болта. По мере увеличения пластических деформаций расчет и эксперимент начинают сходиться.

4.6. Рекомендации по совершенствованию методики

Учитывая данные полученные в результате проведенных экспериментальных исследований и данные полученные при расчёте МКЭ, в дальнейшем предложено:

- Использовать вспомогательную пластину из более прочного материала, для устранения смятия кромок отверстия при нагружении;
- Между пластинами необходимо проложить фторопластовую пластину толщиной 0,5 мм, для устранения влияния трения на результат испытаний;
- Использовать высокопрочный крепеж для устранения влияния пластического деформирования крепежа;
- Крепеж во вспомогательную пластину устанавливаться без зазора или с натягом (по результатам дополнительных исследований);
- В процессе усталостных испытаний замерять овализацию экстензометром (для первого образца с шагом 10 000 циклов, для последующих 20 000 циклов) или использовать другой метод измерения, например, метод видеограмметрических измерений.
- Изменить конструкцию приспособления.

Указанные рекомендации были учтены в новой методике. Редакция методики представлена в Приложении Б.

Выводы к главе 4

Рассмотрена существующая методика проведения испытаний для получения статических и усталостных характеристик элементарных образцов типового соединения, применяемого в композиционных элементах воздушного судна. Определены основные «слабые места» методики и определены способы их устранения.

Выпущена новая методика, учитывающая полученный опыт. В процессе разработки методики было заменено приспособление для проведения испытаний, способы фиксации степени деградации отверстия и процедура проведения измерений.

Получаемые экспериментальные данные с помощью новой методики позволяют получать большие долговечности при сохранении предельного состояния отверстия. Это позволило увеличить допускаемые контактные напряжения в конструкции воздушного судна и скорректировать оценку долговечности типовых соединений.

Заключение

Для обеспечения необходимых уровней статической прочности и ресурса авиационной конструкции разработаны методики и рекомендации, которые позволили повысить достоверность и снизить рассеивание расчетных характеристик по механическим и усталостным свойствам конструкционных материалов. Полученные результаты внедрены на основных предприятиях отрасли.

Применение разработанных методик определения прочности при сдвиге, позволили получать расчётные характеристики с коэффициентом вариации не превышающим 1.6% для металлических сплавов и до 10% для ПКМ.

Апробация новой методики определения статических и усталостных характеристик для соединений из ПКМ, показала возможность до 1.5 раз повысить уровень допускаемых контактных напряжений в конструкции.

Предложенные рекомендации по технологии изготовления образцов со свободным отверстием, позволили для металлических сплавов снизить время проведения квалификации, а для ПКМ двукратно уменьшить рассеяние получаемых усталостных характеристик, что в итоге может привести к увеличению долговечности конструкции более, чем в 5 раз.

Для современных алюминиевых сплавов подтверждена существующая закономерность по влиянию частоты нагружения на долговечность. Проведение усталостных испытаний с частотами выше рекомендованного диапазона приводит к получению необоснованно оптимистичных результатов.

Список литературы

К главе 1:

1.1 Фейгенбаум Ю.М., Бутушин С.В. Композиционные материалы и история их внедрения в авиационные конструкции// Научный вестник ГосНИИ ГА, Выпуск 7, Москва, 2015 г.;

1.2 А.Р. Носкова, В.П. Постников. Исследование внедрения композиционных материалов на рынке авиационного двигателестроения// Master`s journal, Выпуск 1, 2018 г.;

1.3 ОАК, Справочник «Расчетные характеристики металлических материалов и полуфабрикатов», Выпуск 4, 2012 г.;

1.4 NASA, Composite Material Handbook – 17, Volume 5, 2015 г.

1.5 FAA, «Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems», DOT/FAA/AR-00/47, 2001 г.

1.6 FAA, Metallic Material Properties Development and Standardization (MMPDS), USA, 2006 г.

1.7 Park, I.K., «Tensile and Compressive Test Methods for High Modulus Graphite-Fibre Reinforced Composites», Paper No. 23, Proceedings of the International Conference on Carbon Fibers, Their Composites and Applications, The Plastics Institute, London, 1971 г.;

1.8 Hofer, J.R. and Rao, P.N., «A New Static Compression Fixture for Advanced Composite Materials», Journal of Testing and Evaluation, Vol. 5, No. 4, pp. 278-283, 1977 г.

1.9 Chaterjee, S., Adams, D.F., and Oplinger, D.W., «Test Methods for Composites a Status Report Volume II: Compression Test Methods, Report No. DOT/FAA/CT-93/17-II», U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Atlantic City, NJ, 1993 г.

1.10 Adams, D.F. and Lewis, E.Q., «Influence of Specimen Gage Length and Loading Method on the Axial Compressive Strength of a Unidirectional Composite Material», Experimental Mechanics, Vol. 31, No. 1, pp. 14-20, 1991 г.

1.11 Boeing, «Advanced Composite Compression Tests», Boeing Specification Support Standard BSS 7260, The Boeing Company, Seattle, WA, 1988.

1.12 Welsh, J.S. and Adams, D.F., Unidirectional Composite Compression Strengths Obtained by Testing Mini-Sandwich, Angle- and Cross-Ply Laminates, Report No. UW-CMRG-R-95-106, Composite Materials Research Group, University of Wyoming, Laramie, WY, 1995 г.

1.13 Xie, M. and Adams, D.F., 1993, A Study of Various Compression and Shear Test Methods for Composite Materials Using an Elastic-Plastic Finite Element Analysis, Report No. UW-CMRG-R-93-103, Composite Materials Research Group, University of Wyoming, Laramie, WY, 1993 г.

1.14 Westberg, R.W. and Abdallah, M.G., An Experimental and Analytical Evaluation of Three Compressive Test Methods for Unidirectional Graphite/Epoxy Composites, Report No. MISC-E524-10, Hercules Inc., Magna, UT, 1987 г.

1.15 Adams, D.F. and Welsh, J.S., 1, “Recommended Procedure for Generating Axial Compressive Strength Design Data for Composite Materials,” presented at the MIL-HDBK-17 Polymer Matrix Composites Coordination Group Meeting, Clearwater, FL, 1995 г.

1.16 Adams, D.F. and Welsh, J.S., “The Wyoming Combined Loading Compression (CLC) Test Method,” Journal of Composites Technology and Research, JCTRER, Vol. 19, No. 3, pp. 123-133, 1997 г.

1.17 P.W.R. Beaumont, C. Soutis, A. Hodzic, Structural Integrity and Durability of Advanced Composites, Woodhead Publishing, 2015.

1.18 GRASSE ZUR INGENIEURGESELLSCHAFT. (2015, 10 02). Improved Method for Testing Composite Materials. Retrieved from Berlin Innovation: <https://www.berlininnovation.de/en/start/overview/innovation/innovation/260.html>

1.19 Adams, D. D. (2009, December 2). A Comparison of Shear Test Methods. Retrieved from Composites World: <http://www.compositesworld.com/articles/a-comparison-ofshear-test-methods>

1.20 Veryst. (2017). Digital Image Correlation (DIC). (Veryst Engineering LLC) Retrieved from Veryst Engineering: Engineering Through the Fundamentals: <http://www.veryst.com/what-we-offer/mechanical-testing-modelingvalidation/Testing-Library/digital-image-correlation>

1.22 Odegard, G., & Kumosa, M. (2000, June 15). Determination of shear strength of unidirectional composite materials with the Iosipescu and 10 degree off-axis shear tests. (D. o. Center for Advanced Materials and Structures, Ed.) Composites Scient and Technology, 27.

1.23 Adams, D. O., Moriarty, J. M., Gallegos, A. M., & Adams, D. F. (2003). Development and Evaluation of the V-Notched Rail Shear Test for Composite Laminates. Washington: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of Aviation

1.24 Adams, D. (2017, March 31). Best Practices for V-notched Shear Testing of Composites. Retrieved from Composites World: <http://www.compositesworld.com/articles/best-practices-for-v-notched-shear-testing-of-composites>

1.25 M. Crossan, Mechanical Characterization and Shear Test Comparison for Continuous-Fiber Polymer Composites, The University of Western Ontario, тезисы диссертации, 2018 г.

К главе 2:

2.1 Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. –М.: Наука, 1965

2.2 Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. –М.: Мир, 1980 – 510 с.

2.3 Большев Л.Н., Смирнов Н.В Таблицы математической статистики. – М: Наука, 1983.

2.4 Вейбулл В.А. Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964. – 276 с.

2.5 Eckel J.F. (1951) Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 51. – с. 745-760

2.6 Allen N.P. and Forrest P.G. (1956) The influence of temperature on the fatigue of metal. London Conf. 1956, Session 4. Paper 1

2.7 Smith C.R. Fatigue resistance. Aircraft Engineering. v. 32. N 375. 1960. V. – P. 142–144 (сноска F11).

2.8 Данилов Ю.С., Кадобнова Н.В. Роль частоты нагружения при испытаниях на выносливость // Заводская лаборатория, 1959. № 6.

2.9 Ратнер С.И. Разрушение при повторных нагрузках. М.: Оборонгиз, 1959. –352 с.

2.10 Марин Н.И. Некоторые вопросы статической выносливости авиационных конструкций / Труды ЦАГИ вып. 782, М: БНИ ЦАГИ, 1960. – 28 с.

2.11 Шабалин В.А. Влияние частоты перемен нагружения на выносливость дюралюмина // Заводская лаборатория, 1962. № 7.

2.12 Гаррис У.Дж. Влияние частоты циклов нагружения на прочность металлов / В сб. Усталость и выносливость металлов. М., 1963.

2.13 Воробьев А.З., Гаврилова Е.А., Кулешов Д.Я. Влияние частоты нагружения на выносливость алюминиевых сплавов // Заводская лаборатория, 1963. № 10. – С. 1228-1230.

2.14 Воробьев А.З., Гаврилова Е.А. Влияние частоты повторного нагружения на выносливость конструктивных элементов из алюминиевых сплавов / В кн.: Технические Отчеты ЦАГИ, вып. 278 ДСП, М: БНТИ ЦАГИ, 1965. – С. 3–20.

2.15 Maurin E., Barrois W. Influence de la frequence et de la temperature d'essai sur la duree en fatigue d'eprouvtes et d'assemblages en tble A-U2GN-T6. L'Aeronautique et L'Astronautique. 1969. N 9. – P.39-55.

2.16 Воробьев А.З., Гаврилова Е.А., Доценко А.М., Екименков Л.Н. О форме кривых выносливости некоторых алюминиевых сплавов // Заводская лаборатория, 1971. № 7. – С. 832-834.

2.17 Афонин А.И., Кузьменко В.А., Шевчук А.Д. К вопросу о влиянии частоты нагружения на усталостную прочность металлов // Проблемы прочности. 1971. № 1. – С. 62-67.

2.18 Кузьменко В.А., Махотнюк Л.Е., Писаренко Г.Г. и др. Усталостные испытания при высоких частотах нагружения. – Киев: Наукова думка, 1979. – 336 с.

2.19 Воробьев А.З., Олькин Б.И., Стебенев В.Н., Родченко Т.С. Сопротивление усталости элементов конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. -240 с.

2.20 Кузьменко В.А., Васинюк И.М., Крук Б.З. Многоцикловая усталость при переменных амплитудах нагружения. – Киев: Наукова думка, 1986. – 264 с.

2.21 Ермоленко Б.И. Установка для испытаний на выносливость при растяжении в вакууме // Заводская лаборатория, 1970. № 7.– С. 864-865.

2.22 Богданов Б.Ф., Колганова З.Н., Заверюха Г.Г. Справочные данные по выносливости конструктивных самолетостроительных сплавов / НТО НИО-18 № 1852 VII, Жуковский: ЦАГИ, 1977. – 172 с.

2.23 Заверюха Г.Г. Исследование идентичности результатов усталостных на машинах с различными системами нагружения. НТО НИО-18 № 5190, 1994. – 15 с.

2.24 Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Часть 1. Киев: Наукова думка, 1987, 512 с.

К главе 3:

3.1 В.Д. Вермель, А.М. Доценко, Г.А. Корнилов, С.М. Наумов, С.А. Титов. «Сопоставление технологий обработки элементов конструкций из полимерных композиционных материалов» журнале «Оборонная техника» вып. 8-9 за 2012г, с.57-61.

К главе 4:

4.1 Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов / Е. Т. Василевский, А. З. Двейрин, Я. С. Карпов, С. П. Кривенда // Открытые информационные и

компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 47. – Х., 2010. – С. 42 – 52.

4.2 Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / под ред. Дж. Любина / пер. с англ. А.Б. Геллера и др. Под ред. Б.Э. Геллера. – М: Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 584 с.

4.3 ASTM D5961/ D5961M-05 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.

4.4 Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, Т. Я. Кинцис – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

4.5 Киркач Н.Ф. Расчет и проектирование деталей машин: Учеб. пособие для техн. вузов / Н. Ф. Киркач, Р. А. Баласян. – 3-е изд., перераб. и доп. – Х.: Основа, 1991. – 276 с.

4.6 Карпов Я. С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я. С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.

4.7 Карпов Я. С. Исследование напряженно-деформированного состояния многорядных механических соединений деталей из композиционных материалов / Я. С. Карпов. // Авиационно-космическая техника и технология: тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н. Е. Жуковского. – Х., 1998. – С. 328 – 334.

4.8 Степин П.А. К расчету на срез соединений с прерывистыми связями / П.А. Степин. // Вестник инженеров и техников. – 1951. – № 4. – С. 175 – 179.

4.9 Ю.П. Трунин, «Критерии прочности и модели разрушения механического соединения элементов из полимерных композиционных материалов», Труды ЦАГИ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Проект методики испытаний для определения сдвига в плоскости слоя»

Проект авиационного стандарта «Метод испытаний образцов на прочность при сдвиге в плоскости слоя»

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на ламинат и конструктивные образцы из полимерных композиционных материалов, армированных стеклянными, углеродными и органическими волокнами. Стандарт устанавливает метод определения напряжения разрушения образцов ламината и при испытаниях на сдвиг в условиях нормальной, пониженной и повышенной температур при монотонном статическом нагружении образцов до полного разрушения.

Настоящий стандарт может быть также применен при разработке паспорта и технических условий на материалы, которые необходимы для проведения квалификации авиационных материалов, а также при исследованиях и разработках.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 12.4.021–75 Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные.

Общие требования

ГОСТ 6507–90 Микрометры. Технические условия

ГОСТ 9245–79 Потенциометры постоянного тока измерительные. Общие технические условия

ГОСТ 12423–66 Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)

ГОСТ 14359–69 Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования

ГОСТ 24778–81 Пластмассы. Метод определения прочности при сдвиге в плоскости листа

ТР–1.4.1773–87 Механическая обработка деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов. Типовые операции технологических процессов

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов по указателю «Национальные стандарты», составленному на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения, условные обозначения и сокращения

3.1. В настоящем стандарте применяются следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1. **испытание (эксперимент):** Осуществление определенного комплекса воздействия на лабораторный образец, который может быть воспроизведён сколь угодно большое число раз, с целью изучения прочностных характеристик материала образца.

3.1.2. **лабораторный образец:** Небольшой, обычно плоский монолитный или сотовый образец для оценки свойств ПКМ.

3.1.3. **ламинат ПКМ:** Полимерный композиционный материал с многонаправленной ориентацией волокна.

3.1.4. **партия:** Для препрега и композиционного материала – материал, изготовленный на одном оборудовании по одному и тому же технологическому процессу и из одних и тех же компонентов.

3.1.5. **полимерный композиционный материал (ПКМ):** Материал конструкционного назначения, состоящий из высокопрочных волокон (наполнителя) и полимерной матрицы (отверждённого связующего).

3.1.6. **слой ПКМ:** ПКМ толщиной, равной толщине образца ПКМ, отнесённой к числу уложенных в нём листов наполнителя.

3.2. В настоящем стандарте применяются следующие обозначения:

3.2.1. $[\alpha_i^j]_{sk}$: Укладка слоёв в образце (α – угол ориентации слоя относительно продольной оси образца, i – число рядом лежащих слоёв с одним углом ориентации, j – индекс материала слоя (для ПКМ, состоящего из разных наполнителей), s – симметричное повторение набранных пакетов, k – число симметричных повторений пакетов).

3.2.2. b : Ширина рабочей зоны образца.

3.2.3. δ_1 : Толщина слоя в материале.

3.2.4. $\delta_{1н}$: Номинальная толщина слоя (устанавливается при формировании расчётных характеристик монослоя).

3.2.5. h : Толщина образца.

3.2.6. h_n : Номинальная толщина образца.

3.2.7. F : Площадь поперечного сечения в рабочей зоне образца

3.2.8. n_δ : Число слоёв.

3.2.9. $\varepsilon_{\pm 45}$: Относительные деформации, полученные с тензодатчиков

3.2.10. P_c : Нагрузка, предшествующая разрушению образца

3.2.11. τ_c : Критические сдвиговые напряжения

3.2.12. P_i : Нагрузка в i -ой точке графика «нагрузка-относительная деформация»

3.2.13. γ_i : Полная относительная деформация в i -ой точке графика «нагрузка-относительная деформация»

3.2.14. G : модуль сдвига

4 Объект испытаний

Объектами испытаний являются ламинаты ПКМ, армированные углеродными, стеклянными и органическими волокнами.

5 Образцы для испытаний

5.1 Испытания проводить на плоских монолитных (рисунок 1) образцах. Рекомендуемая толщина образцов 2-5 мм.

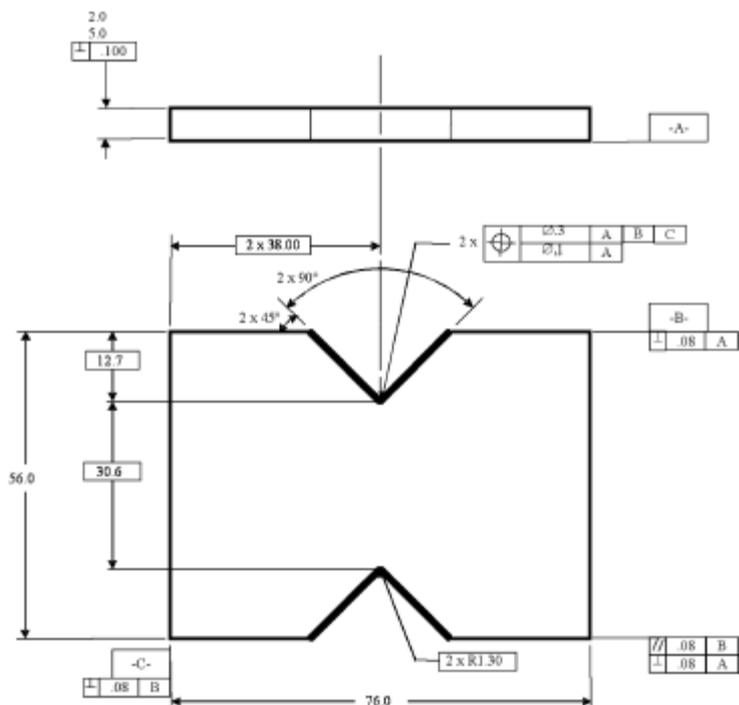


Рисунок 1 – Чертеж образца для испытаний на сдвиг

5.2 Для одних условий испытания количество образцов должно быть не менее шести из одной партии ламината.

5.3 Образцы маркируют в двух местах по диагонали, совпадающей с осью испытательной машины, по разные стороны образца номером партии и порядковым номером образца в партии. 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 и не должна повреждаться во время испытаний.

6 Средства испытаний

6.1 Испытания проводят на испытательной машине с постоянной скоростью движения активного захвата. Скорость нагружения выбирается из расчёта, чтобы время до разрушения образца было около 2-5 мин. Рекомендуемая скорость нагружения 2 мм/мин. Погрешность непрерывной регистрации нагрузки – не более 1 %.

6.2 Для испытаний на сдвиг в плоскости листа применять оснастку, показанную на рисунке 2. Затяжка болтов подбирается из условия отсутствия повреждения ламината и его проскальзывания при испытаниях. Рекомендуемый момент затяжки для образцов толщиной 2-5 мм – 45-55 Н·м. При испытаниях образцов толщиной больше 5 мм допускается использование большего момента затяжки, но в таком случае следует тщательно следить за состоянием болтов и резьбы в оснастке.

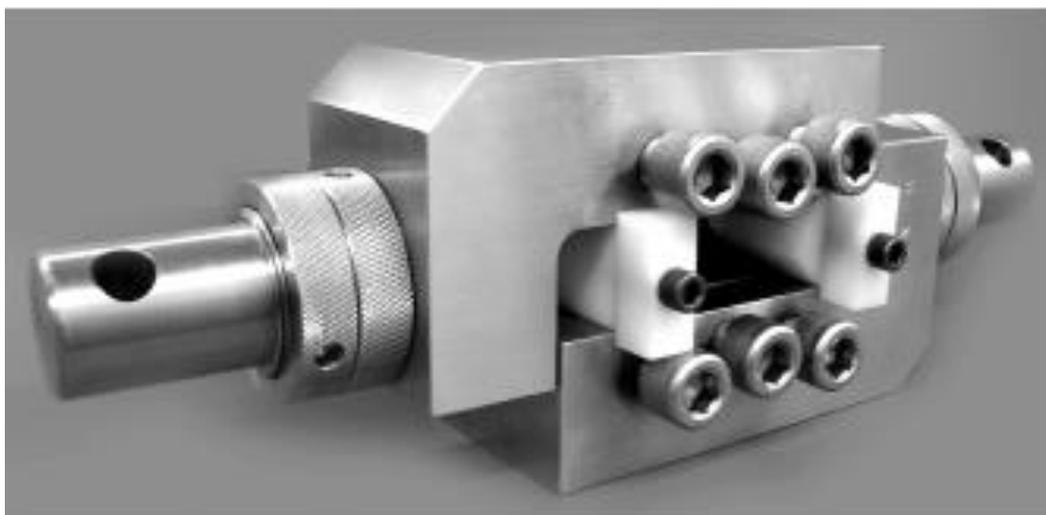


Рисунок 2 – Оснастка для испытания на сдвиг

6.3 При проведении тензометрии наклейка датчиков производится под 45° к продольной оси образца и под 90° друг к другу, как показано на рисунке 3. Предлагается 2 варианта наклейки датчиков: наклейка с обеих сторон (данный способ помогает удостовериться в правильности установки и нагружения образца во избежание его кручения, получение модуля сдвига), наклейка с одной стороны (получение модуля сдвига).

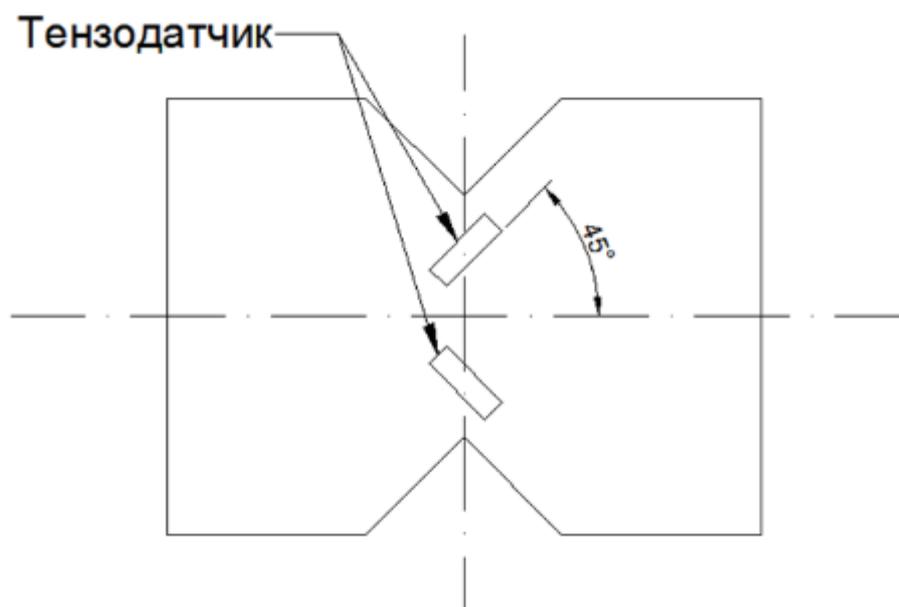


Рисунок 3 – Схема наклейки тензодатчиков

6.4 Температурная камера должна обеспечивать равномерное температурное поле в рабочей зоне образца и его постоянство: $\pm 2^\circ \text{C}$ при температуре от минус 60°C до 200°C .

6.5 Контроль и регистрацию температуры образца при выходе на температурный режим осуществляют в четырёх точках по площади образца термомпарами или терморезисторами в комплекте с соответствующей аппаратурой. Показывающие приборы (например, потенциометры для термопар ГОСТ 9245 должны быть класса точности не ниже 0,5. Контроль температуры в момент нагружения осуществлять с помощью двух термодатчиков, закреплённых прижимами на образце на противоположных сторонах.

6.6 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.

6.7 Все средства измерений и испытательная машина должны быть поверены Государственной или ведомственной метрологической службой и иметь действующие клейма или свидетельства.

7 Кондиционирование образцов

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

В протоколе по испытаниям должны быть описаны условия кондиционирования образцов с указанием содержания в образцах влаги. Если регламентированного кондиционирования не проводилось, то в отчёте по испытаниям необходимо указать – образцы некондиционированные, содержание влаги неизвестно.

8 Метод испытаний

8.1 Все образцы пронумеровать в двух местах по разные стороны образца.

8.2 Перед испытанием образцы кондиционировать в соответствии с разделом 7.

8.3 Измерить действительную толщину образца в четырёх точках рабочей зоны.

8.4 Испытания в нормальных условиях проводить при стандартной лабораторной атмосфере по ГОСТ 12423.

8.5 При нагреве или охлаждении температуру, скорость нагрева и время выдержки при заданной температуре перед испытаниями устанавливают в соответствии с техническим заданием на испытания. При отсутствии задания скорость нагрева принимают равной скорости нагрева при прессовании материала, рекомендованной разработчиком препрега, а время выдержки – из условия достижения равномерного температурного поля в рабочей зоне образца с отклонением $\pm 2^\circ \text{C}$.

8.6 Нагружение во время тензометрии проводить с заранее выбранным шагом. После окончания тензометрии нагружать образец с заданными техническими условиями скоростью перемещения активного захвата. В протокол занести максимальную нагрузку P_c , предшествующую разрушению образца

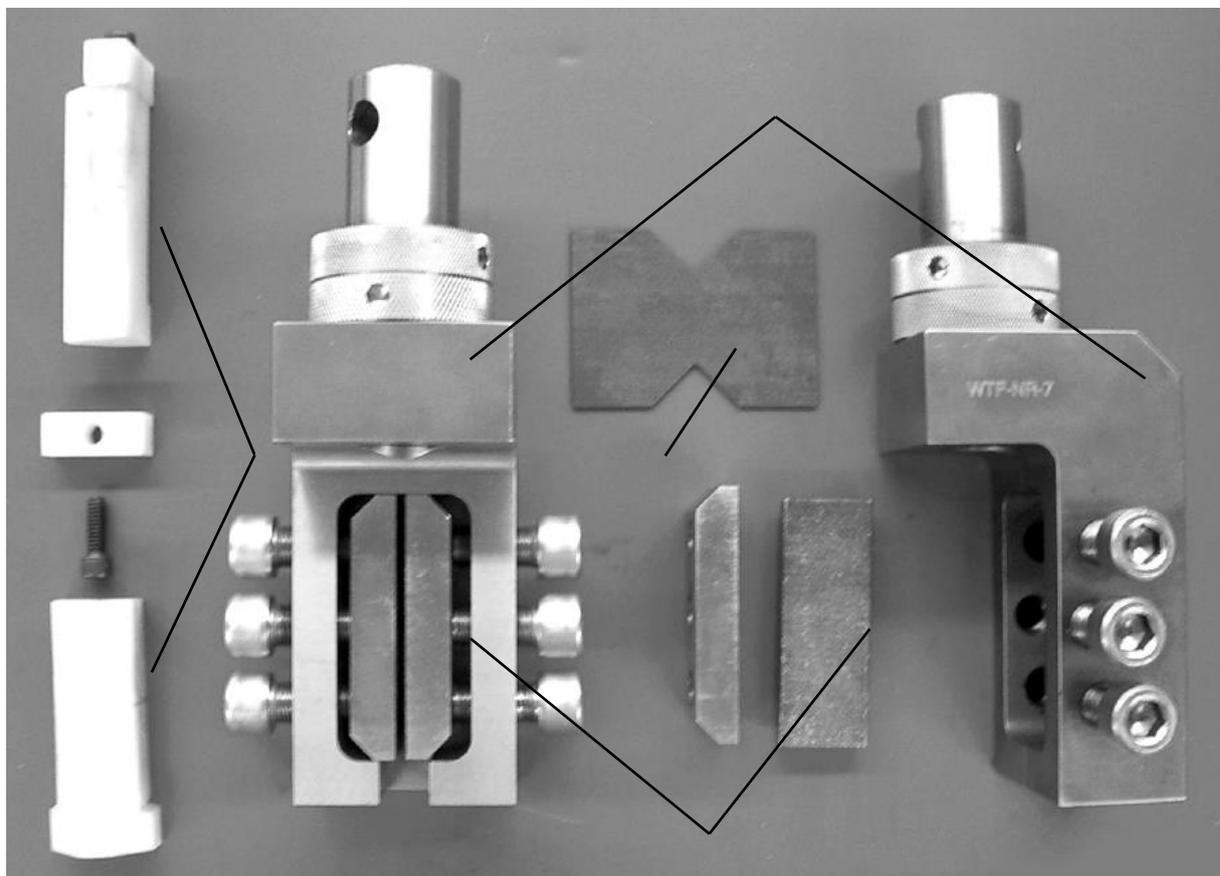


Рисунок 4 – Оснастка для испытаний на сдвиг в разобранном состоянии: 1 – оснастка, 2 – зажимные губки, 3 – пластиковые направляющие, 4 – образец

8.7 Образец короткой стороной помещается между губками одной из половинок оснастки без затяжки губок, см. рисунок 4. После этого к вырезам образца с двух сторон прижимаются пластиковые направляющие: образец выравнивается по меткам на направляющих, направляющие выравниваются по меткам на оснастке. Производится последовательная затяжка болтов до необходимого момента затяжки с постоянным контролем параллельности губок. Аналогичным способом устанавливается вторая половинка оснастки. Готовая оснастка устанавливается на

испытательную машину, проверяется момент затяжки болтов, после чего вынимаются пластиковые направляющие. Характерным признаком того, что образец смонтирован правильно, является отсутствие каких-либо зазоров между половинками оснастки.

8.8 Затяжку болтов до необходимого момента так же можно проводить непосредственно на испытательной машине, предварительно закрепив образец в оснастке и удостоверившись в его устойчивости.

8.9 Провести серию испытаний образцов путём растяжения их с заданной скоростью перемещения активного захвата до потери несущей способности. При испытании непрерывно измерять и регистрировать нагрузку, время процесса нагружения и кривую «нагрузка – перемещение активного штока».

8.10 В протокол испытаний записать разрушающую нагрузку и диаграмму «нагрузка – перемещение активного штока».

9 Обработка результатов испытаний

9.1 Подсчитать номинальную толщину образца:

$$h_n = \delta_{1n} \cdot n_\delta .$$

9.2 Подсчитать действительную толщину слоя для каждого образца:

$$\delta_1 = \frac{h}{n_\delta} .$$

9.3 Подсчитать критические сдвиговые напряжения по формуле:

$$\tau_c = \frac{P_c}{F}$$

9.4 Модуль сдвига G определяется по формуле

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} , \text{ где}$$

$\Delta\tau$ - разность сдвиговых напряжений, полученных в i -ых точках кривой «нагрузка-относительная деформация»

$\Delta\gamma$ - полная относительная деформация $\gamma_i = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}|$

9.5 Подсчитать среднее значение и коэффициент вариации по ГОСТ 14359 для толщины слоя, напряжений по образованию макротрещины и по полному разрушению.

9.6 Заполнить протоколы результатов испытаний по форме, изложенной в разделе 12.

10 Оформление результатов испытаний

В отчёт вносят следующие сведения.

10.1 Описание испытываемых партий материала.

10.2 Дата проведения испытания.

10.3 Средства для проведения испытания.

10.4 Фамилия лица, проводившего испытание.

10.5 В протоколе испытаний (раздел 12) для каждого образца должно быть указано:

- ширина рабочей зоны образца;
- толщина слоя в материале;
- номинальная толщина слоя (устанавливается при формировании расчётных характеристик монослоя);
- толщина образца;
- номинальная толщина образца;
- нагрузка разрушения;
- напряжения разрушения;
- модуль сдвига;
- вид разрушения.

11 Требования безопасности

11.1 Предусмотреть меры безопасности (щитки и т.п.) от осколков при работе с хрупкими материалами.

11.2 Механическую обработку выполнять в соответствии с техническими регламентами (ТР–1.4.1773).

11.3 Обеспечить безопасность работы с электронагревательными приборами в соответствии с правилами работы на испытательных машинах.

11.4 Машины, на которых проводятся испытания материалов, выделяющих продукты разложения при высоких температурах, должны иметь местную вентиляцию ГОСТ 12.4.021.

Приложение А

(рекомендуемое)

Испытатель

Адрес Телефон Телефакс	Аккредитация		
	Номер	Дата	Организация

Заказчик:

Организация	Адрес	Телефон	Фамилия, И.О., должность

Протокол № от

1 Образцы для испытания:

Изготовитель	Накладная	Дата изготовления	Дата получения

1.1 №чертежа:

1.2 Тип и маркировка образца:

1.3 Материал образцов (марка, номинальная толщина слоя δ_{1n} и образца t_n ; число n_b и укладка слоёв относительно оси образца [α_i]_{sk})

1.4 Состояние образцов:

2. Результаты испытаний на: (вид нагружения, температура испытания)

№ обр.	b , м	h , м	δ_b , м	P_c , Н	σ_c , МПа при δ_{1n}	G , ГПа	Вид разрушения
Ср.зн							
К.вар.							

Исполнители и дата

Приложение Б
Эскиз оснастки для испытаний на сдвиг

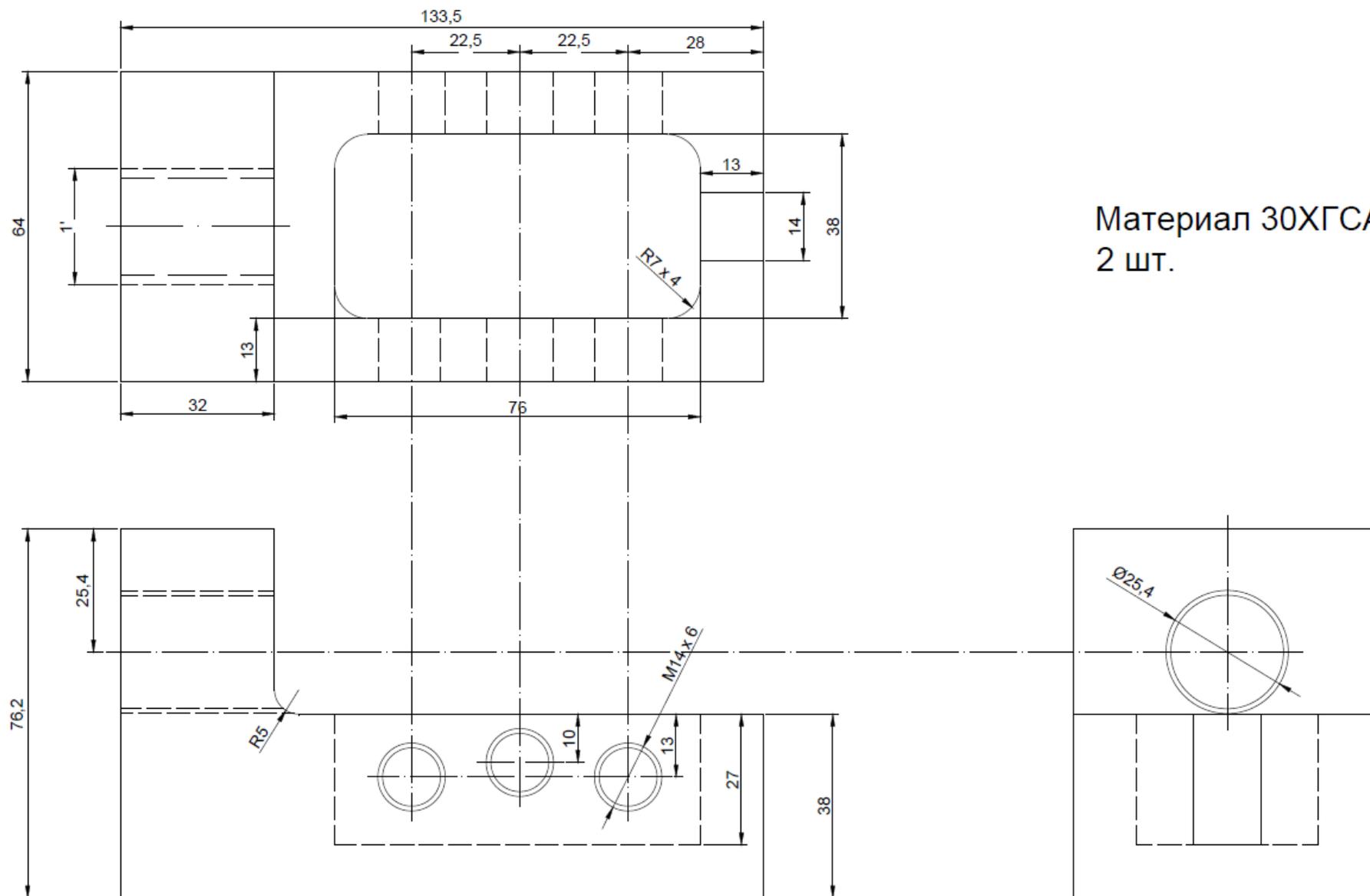
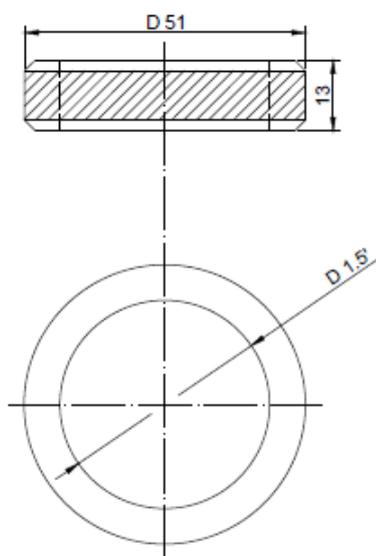


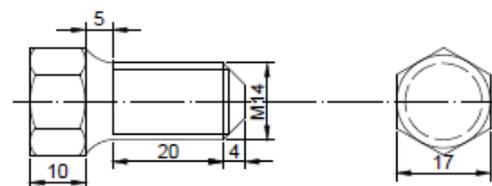
Рисунок 1 – Оснастка для испытаний на сдвиг

Гайки фиксатор



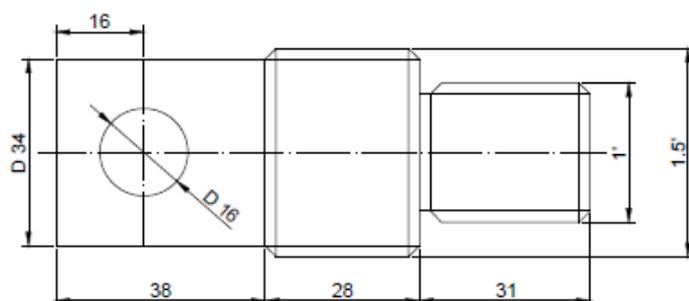
Материал 30ХГСА
4 шт.

Болты



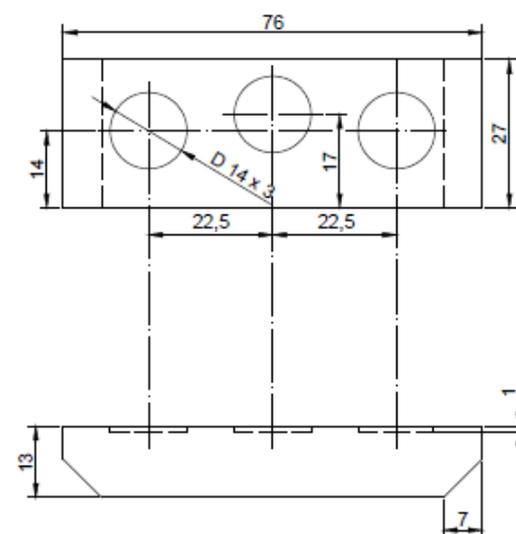
Материал 30ХГСА
12 шт.

ОСЬ



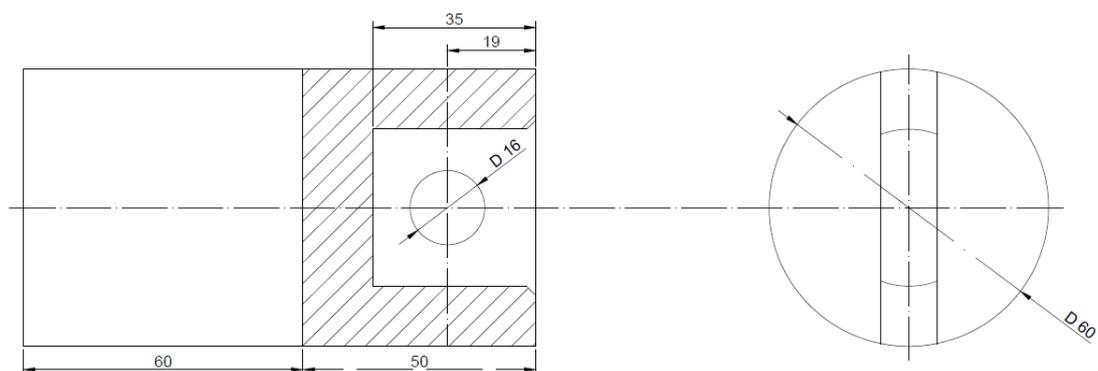
Материал 30ХГСА
2 шт.

ГУБКИ



Материал ХГВ
4 шт.

Рисунок 2 – Детали оснастки на сдвиг



Материал 30ХГСА

4 шт.

Рисунок 3 – приспособление для захвата оснастки в губках испытательной машины

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Проект методики для определения зависимости нагрузка-овализация

Стандарт испытаний. Определения овализации отверстий при статическом и циклическом нагружении» (проект)

часть 1 Определения овализации отверстий при статическом нагружении

1 Область применения

Данный раздел стандарта устанавливает метод определения прочности при смятии и характеристик диаграммы «нагрузка – овализация отверстия» при растяжении и сжатии образцов ламината из полимерного композиционного материала (ПКМ) в условиях нормальной (20 ± 5 °С), повышенной (до 160 °С и с возможным предварительным влагонасыщением образца) и пониженной (до минус 60 °С) температур при монотонном статическом нагружении до полного разрушения. Вид ПКМ ограничен ламинатами на основе непрерывных армирующих волокон с полимерной матрицей, у которых укладка симметрична по толщине сечения и сбалансирована относительно направления приложения испытательной нагрузки. Номенклатура ламинатов и их толщин, к которым применим данный метод испытаний, определены в разделе 7.

Характеристики и свойства, определяемые рассматриваемым методом испытаний, вводят в технические условия на материал, используют при паспортизации, создании баз данных, в расчётах на прочность, а также в исследованиях и разработках при создании авиационной техники.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 5378-88 Угломеры с нониусом. Технические условия

ГОСТ 8074–82 Микроскопы инструментальные. Типы, основные параметры и размеры.

Технические требования

ГОСТ 12423–66 Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)

ГОСТ 14359–69 Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования

ГОСТ Р 51254-99 Инструмент монтажный для нормированной затяжки резьбовых соединений.

Ключи моментные. Общие технические условия

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов по указателю “Национальные стандарты”, составленному на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями.

3.1 полимерный композиционный материал (ПКМ): Материал конструкционного назначения, состоящий из высокопрочных волокон (наполнителя) и полимерной матрицы (отверждённого связующего).

3.2 ламинат ПКМ: Материал, отформованный в плоской форме и состоящий из ряда уложенных слоёв армирующего наполнителя (лент однонаправленных волокон и/или ткани), помещённого в полимерную матрицу.

3.3 **укладка слоёв ПКМ:** Закономерность в чередовании ориентаций слоёв наполнителя относительно принятой трёхмерной системы координат.

3.4 **слой ПКМ:** Единичный слой ПКМ, толщина которого равна толщине ламината, отнесённой к числу уложенных в нём слоёв одного и того же наполнителя.

3.5 **партия материала: Материал, изготовленный на одном оборудовании по одному и тому же технологическому процессу из одних и тех же партий компонентов.**

3.6 **испытание (эксперимент):** Осуществление какого-нибудь определенного комплекса условий, который может быть воспроизведен сколь угодно большое число раз с целью воздействия на продукцию и изучения её поведения в данных условиях.

3.7 **окружающая среда:** Условия испытаний (температура, влажность, свет, радиация, микроорганизмы и т.д.).

3.8 **овализация отверстия:** Отношение взаимного смещения по центру отверстия соединённых пластин к диаметру отверстия.

3.9 **нестеснённое разрушение соединения:** Процесс разрушения образца от смятия (сдвига, разрыва) при беспрепятственном выдавливании материала из под крепёжного элемента в боковых зазорах в двухсрезном (односрезном) соединении.

3.10 **стеснённое разрушение соединения:** Процесс разрушения образца при нулевых боковых зазорах в двухсрезном (односрезном) соединении.

3.11 **податливость:** Отношение взаимного смещения по центру отверстия соединённых пластин к нагрузке, вызвавшей это смещение

4 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

4.1 $[\alpha'_i]_{SN}$ или $[\alpha'_i]_{NS}$: Укладка слоёв в ПКМ, где

α - угол ориентации слоя относительно продольной оси образца;

i - число рядом лежащих слоёв с одним углом ориентации;

j - индекс материала слоя (для ПКМ, содержащих разные наполнители);

N - количество симметрично набранных пакетов;

S - симметричное повторение набранных пакетов.

4.2 δ_i , мм: Действительная (средняя) толщина слоя в ламинате.

4.3 δ_{iN} , мм: Номинальная толщина слоя в ламинате, устанавливаемая разработчиком ПКМ.

4.4 n_δ : Число слоёв в ламинате.

4.5 h_n , мм: Номинальная толщина образца из ламината.

4.6 h , мм: Реальная толщина образца.

4.7 b , мм: Ширина образца (в рабочей зоне).

4.8 d , мм: Диаметр отверстия.

4.9 Δ , мм: Зазор между отверстием и крепёжным элементом.

4.10 D , мм: Диаметр болта или штифта.

4.11 h_g , мм: Глубина зенковки.

4.12 h_r , мм: Глубина западания головки потайного крепежа (положительное значение) или высота её выступа (отрицательное значение) относительно плоскости образца.

4.13 Δ_o , мм: Показание индикатора при касании его головки поверхности образца рядом с потайной головкой крепежа.

4.14 Δ_r , мм: Показание индикатора при касании его головки поверхности потайной головки крепежа.

4.15 \bar{b} : Относительная ширина образца.

4.16 \bar{d} : Относительный диаметр отверстия.

4.17 \bar{h}_g : Относительная глубина зенковки.

4.18 L , мм: Длина образца.

4.19 e , мм: Расстояние от центра отверстия до ближайшей поперечной грани образца.

4.20 ζ , мм: Зазор между пластинами в соединении.

4.21 s , мм: Длина накладок.

4.22 $\Delta_{\text{н}}$, мм: Величина зазора между отверстием и болтом, принятая равной взаимному смещению соединённых пластин в сечении по центру отверстия при изменении контактного напряжения от минус 10 МПа до 10 МПа.

4.23 $\sigma_{\Delta_{\text{дк}}}$, МПа: Напряжения смятия соответствующих овализации к%.

4.24 $P_{\Delta_{\text{дк}}}$, Н: Нагрузка соответствующих овализации к%.

4.25 $\Delta_{\text{до}}$, %: Овальзация отверстия, равная остаточному взаимному смещению соединённых пластин в сечении по центру отверстия без учёта величины зазора между отверстием и болтом, отнесённое к диаметру отверстия.

4.26 $C_{\Delta_{\text{дк}}}$, мм/Н: Податливость соединения, соответствующая овализации к%.

4.27 $\Delta_{\Delta_{\text{дк}}}$, мм: Взаимное смещение соединяемых элементов, соответствующее овализации к%.

5 Объект испытаний

Объектами испытаний являются образцы механического соединения плоских пластин ПКМ или пластины ПКМ с металлическими(-ой) пластинами(-ой). Виды соединения:

- одноточечное двухсрезное соединение;
- одноточечное безызгибное односрезное соединение;
- двухточечное односрезное соединение внахлёт.

Факторы, влияющие на прочность образцов: материал и способ изготовления образцов, укладка слоёв и геометрия образца (диаметр отверстия, отношение диаметра к толщине, отношение ширины к диаметру, отношение расстояния до задней кромки к диаметру, точность и качество разделки отверстия, зазор между крепёжным элементом и отверстием, наличие боковых зазоров между соединёнными пластинами, тип крепёжного элемента и способ его установки, осевое усилие в крепёжном элементе при его установке, глубина зенковки (если потайной крепёжный элемент), прямолинейность образца и равномерность его зажатия в испытательной машине, кондиционирование образцов, условия климатических испытаний, время при температуре испытания, скорость нагружения.

6 Методы испытаний

Метод испытания состоит в нагружении в режиме задаваемой нагрузки или задаваемого перемещения с постоянной скоростью нагружения образца соединения с записью диаграммы «нагрузка – взаимное смещение пластин» до разрушения. При каждом условии нагружения и испытаний (влажность, температура и т.п.) испытывают не менее шести образцов. Образцы для всех условий испытаний изготавливают из одной партии ламината.

7 Образцы для испытаний

7.1 Стандартом предусмотрено проведение испытаний трёх типов образцов.

7.2 При изготовлении образцов из ПКМ для испытаний по настоящему стандарту рекомендуется использовать квазиизотропную укладку [45/-45/0/90]_{SN}. При этом укладка должна быть симметричной по толщине сечения и сбалансированной относительно направления приложения испытательной нагрузки. Рекомендованное максимальное отклонение наполнителя от продольного направления образца - не более 0,5°. Выбор укладки ПКМ должен обеспечивать получение мод разрушения образцов в зоне заполненного отверстия, описанных в 11.4.7.

7.3 Образец Тип 1 (одноболтовой при растяжении). Форма образца для испытаний приведена на рисунке 1. Номинальная толщина образцов - 4 мм с допустимым диапазоном от 3 до 5 мм. Номинальная длина образцов $L=135$ мм. Ширина образца $b=36\pm 1$ мм, диаметр отверстия $d=6^{+0.03}_{-0.00}$ мм. Диаметр крепёжного элемента - $6^{+0.00}_{-0.03}$ мм, если заказчиком не предусмотрены другие посадки крепёжного элемента. Расстояние от центра отверстия до ближайшей поперечной грани образца

$e=18\pm 1$ мм. Зенковка отсутствует. Образец, представленный на рисунке 1, соответствует образцу по стандартам (Методу А).

Образец испытывается при растяжении в стесненном или нестесненном состоянии. Пример оснастки, предназначенной для испытания образца приведён на рисунке 2. При $\zeta=0$ реализуется стеснённое состояние, при котором продукты разрушения остаются в зоне приложения контактных напряжений, при $\zeta=1$ мм – нестеснённое состояние, при котором продукты разрушения могут покидать зону контакта. При $\zeta=0$ крепёжный элемент рекомендуется устанавливать с моментом затяжки от 2,2 до 3,4 Нм.

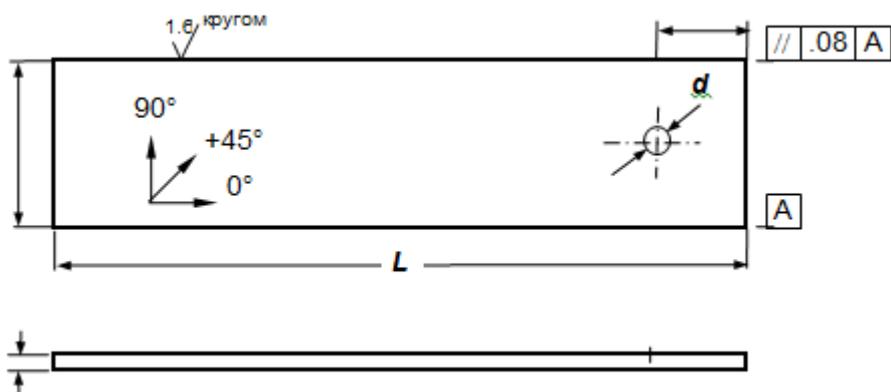


Рисунок 1 – Эскиз образца для испытаний Тип 1 (двухсрезное соединение)

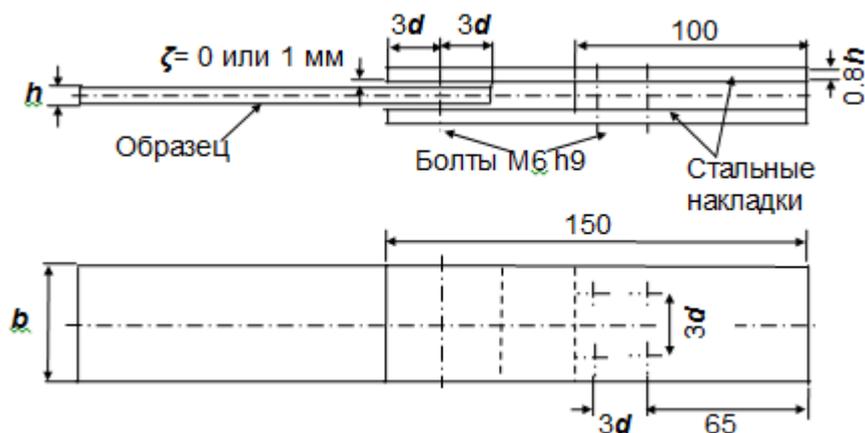


Рисунок 2 – Эскиз образца Тип 1 с оснасткой для нагружения

7.4 Образец Тип 2 (односрезный, при растяжении или сжатии). Форма образца для испытаний приведена на рисунке 3. Номинальная толщина образцов - 4 мм с допустимым диапазоном от 3 до 5 мм. Номинальные размеры образцов $L=210$ мм, $s=110$ мм. Ширина образца $b=36\pm 1$ мм, диаметр отверстия $d=6^{+0.03}_{-0.00}$ мм. Диаметр крепёжного элемента - $6^{+0.00}_{-0.03}$ мм, если заказчиком не предусмотрены другие посадки крепёжного элемента. Желательно для изготовления образца использовать материал одной плиты или панели с целью получения постоянной толщины образца по его длине. Рекомендуемый момент затяжки крепёжных элементов – от 2,2 до 3,4 Нм. Наличие и параметры зенковки определяются целями испытаний. Образец, представленный на рисунке 3, соответствует образцу по Методу В [1]. Образец испытывается при растяжении и сжатии. Для исключения изгибных напряжений и потери устойчивости образца возможно применение специальной противоизгибной оснастки.

Накладки соединить с образцом с помощью клея, механические свойства и теплостойкость которого должны быть соизмеримы со свойствами испытываемого материала в условиях его испытаний. Условия полимеризации клея не должны оказывать влияния на свойства испытываемого материала. Толщина клеевого шва не должна превышать 0,25 мм, а разнотолщинность по площади

склейки и от наклейки к наклейке – $\pm 0,03$ мм. Клеевой валик по периметру накладок должен быть удалён.

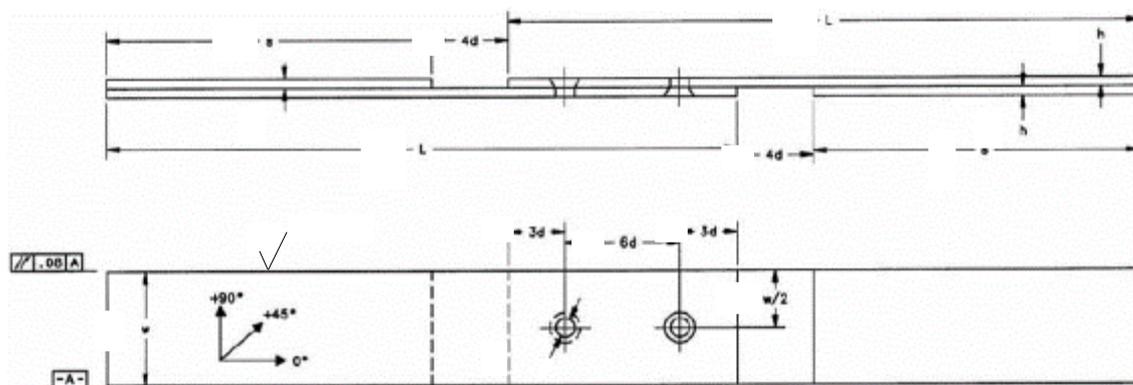


Рисунок 3 – Эскиз образца для испытаний Тип 2 (односрезное соединение внахлёт)

7.5 Образец Тип 3 (односрезный, при растяжении или сжатии). Форма образца для испытаний приведена на рисунке 4. Номинальная толщина образцов - 4 мм с допустимым диапазоном от 3 до 5 мм. Номинальные длина образцов - 162 мм. Ширина образца $b=36\pm 1$ мм, диаметр отверстия $d=6^{+0,03}_{-0,00}$ мм. Диаметр крепёжного элемента $D=6^{+0,00}_{-0,03}$ мм, если заказчиком не предусмотрены другие посадки крепёжного элемента. Рекомендуемый момент затяжки крепёжных элементов – от 2,2 до 3,4 Нм.

Образец испытывается при растяжении и сжатии. Для исключения изгибных напряжений образца возможно применение специальной оснастки.

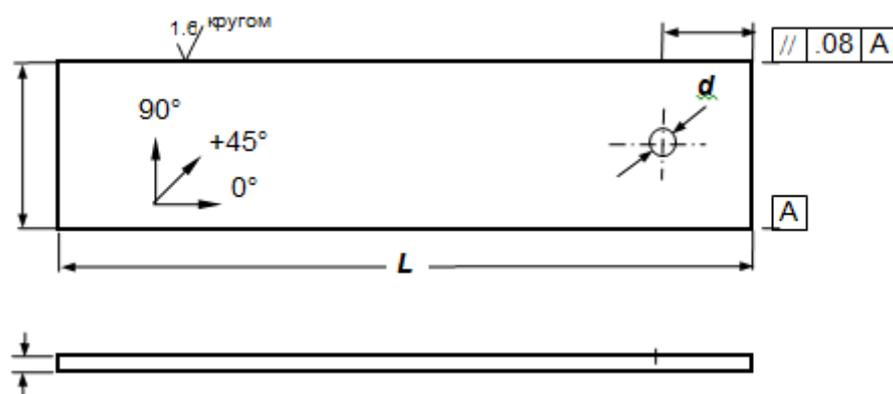


Рисунок 4 – Эскиз образца для испытаний Тип 3 (односрезное соединение)

7.6 Механическую обработку образцов выполнять, руководствуясь рекомендациями [3]. При вырезании образца из панели большого размера наиболее эффективно использование алмазного инструмента. При обработке использовать приемы, исключающие образование зазубрин, подрезов, грубых, неровных поверхностей, а также расслаивание.

7.7 Окончательные размеры получить 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; образуемые ими контуры образца должны находиться в пределах допусков параллельности и перпендикулярности, наряду с ограничениями их шероховатости. В протоколе испытаний указать методы и режимы резки и обработки поверхностей испытываемых образцов.

7.8 Изготовленные образцы маркировать в двух местах по разные стороны от нагружаемого(-ых) отверстия (отверстий) номером партии и порядковым номером образца в партии. Маркировка должна позволять отличать образцы друг от друга и указывать на их происхождение, а также идентифицировать их по условиям испытаний. Маркировка не должна влиять на выполнение и результат испытаний, но и сама при этом не должна повреждаться.

7.9 Особое внимание следует уделять тому, чтобы при изготовлении отверстия не образовалось расслоений или других повреждений ПКМ. Вначале необходимо просверлить отверстие меньшего размера с последующим его доведением до необходимого диаметра с помощью развёрток. В протоколе испытаний указать методы и режимы создания отверстий в испытываемых образцах. Угол и глубина зенковки отверстия обеспечиваются техпроцессом изготовления образцов и должны быть указаны в сопроводительной документации на образец.

7.10 Способ установки болта или штифта в отверстие определяется типом используемого крепёжного элемента, технологией его установки и характеристиками ПКМ. Не рекомендуется повторное использование болтов или штифтов.

7.11 Если крепёжный элемент устанавливается в отверстие с моментом затяжки, последний должен контролироваться с точностью не ниже 10%.

7.12 Рекомендуемый диапазон глубины западания головки потайного крепежа (положительное значение) или высота её выступания (отрицательное значение) относительно плоскости образца h_r - от 0,0 до 0,7 мм.

7.13 Все отклонения от требований к укладке ПКМ, к длине и ширине образца, а также к диаметру отверстия должны быть зафиксированы в протоколе испытаний.

8 Средства испытаний

8.1 Средства измерения геометрии

Для измерения толщины образца используют микрометр со сферическими губками диаметром от 4 до 6 мм. Диапазон измерения - от 0 до 25 мм, точность - до $\pm 0,01$ мм.

Для измерений длины, ширины и других размеров образца используют штангенциркуль с диапазоном измерения от 0 до 300 мм и точностью до $\pm 0,05$ мм.

Для измерения угла зенковки применять угломер по ГОСТ 5378 с ценой деления 2'.

Для измерения диаметров отверстия и размеров крепёжного элемента образца используют микрометр, штангенциркуль, специальные калибры. Возможно применение универсальных инструментальных микроскопов по ГОСТ 8074 с точностью до $\pm 0,001$ мм. Измеряемая величина оценивается как среднее значение по шести измерениям.

Для измерения момента завинчивания гайки применяют моментный ключ по ГОСТ Р 51254 с погрешностью измерения не более 10%.

Для измерения глубины западания (положительное значение) или высоты выступания (отрицательное значение) потайной головки крепежа относительно плоскости образца используют глубиномер или индикатор часового типа с погрешностью не более 0,001 мм, закреплённый на стойке, которая устанавливается на поверочной плите (рисунок 5). Измеряемая величина равна разности показаний индикатора при смещении стойки или образца по поверхности поверочной плиты. Значение h_r равно:

$$h_r = \Delta_o - \Delta_r, \quad (1)$$

где Δ_o – показание индикатора при касании его головки поверхности образца рядом с потайной головкой крепежа, мм;

Δ_r – показание индикатора при касании его головки поверхности потайной головки крепежа, мм.

Значение h_r оценивается как среднее по шести измерениям в различных точках потайной головки.

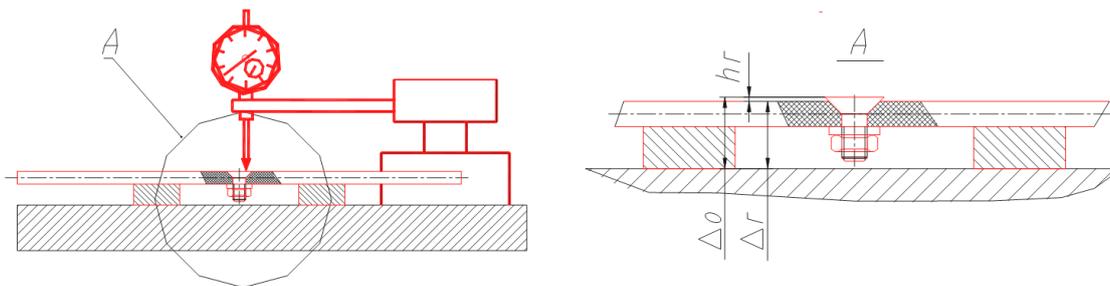


Рисунок 5 – Схема измерения глубины западания или высоты выступания потайной головки крепежа относительно плоскости образца

8.2 Испытательная машина, позволяющая осуществлять растяжение или сжатие образца с постоянной скоростью и обеспечивать измерение нагрузки и перемещения с точностью до $\pm 1\%$ от измеренной величины.

Основные элементы и узлы испытательной машины:

- неподвижная траверса с захватом для образца;
- активный (подвижный) захват образца, установленный на силовозбудителе;
- силовозбудитель – устройство, предназначенное для перемещения активного захвата с управляемой скоростью по отношению к неподвижной траверсе и способное преодолевать при этом сопротивление деформации образца;
- силоизмеритель – устройство, позволяющее измерять и регистрировать нагрузку, создаваемую силовозбудителем при деформировании 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, датчика перемещения активного захвата, что позволяет строить диаграммы «нагрузка – перемещение».

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

Распределенное усилие, которым захваты удерживают образец, должно быть такой величины, чтобы не только не вызывать разрушения образцов в области зажима, но и не позволять им выскальзываться из захватов. Предотвратить проскальзывание в ряде случаев позволяет снижение давления на образец в захвате и установка тонких прокладок из наждачной шкурки или двусторонней наждачной бумаги с зернистостью 80 мкм, помещаемых внутрь захвата между губками и образцом.

8.3 Устройства для фиксации образца при нагружении в условиях сжатия.

При нагружении в условиях сжатия применяют специальные приспособления для исключения потери устойчивости образца. Приспособление не должно препятствовать полной передаче заданной сжимающей нагрузки на образец. В частности, возможно применение обкладок, подкрепляющих образец с двух сторон.

8.4 Термокамера нагревания или охлаждения испытываемого образца.

Термокамера должна обеспечивать в рабочей зоне образца температуру в диапазоне от минус 60 °С до 160 °С с точностью до ± 3 °С в течение периода его температурной стабилизации, а также во время нагружения до разрушения.

8.5 Камера для кондиционирования.

Для кондиционирования образцов в условиях, отличающихся от лабораторных, используют климатическую камеру, позволяющую создавать и поддерживать на заданном уровне температуру в диапазоне от минус 60 °С до 95 °С с точностью до ± 3 °С и относительную влажность от 20% до 98%. Контроль и регулирование условий в камере осуществляют автоматически.

8.6 Измерение температуры в камере и на образце производят термопарами и контрольно-измерительными приборами с погрешностью не более ± 1 °С.

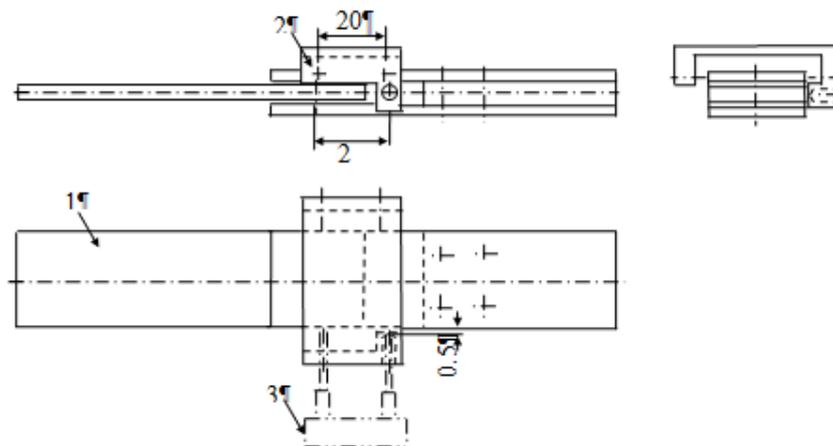
8.7 Каждая партия образцов должна быть испытана при одних и тех же технологических условиях настройки испытательного оборудования и технологического оснащения.

8.8 Допускается замена средств измерения и испытания другими, имеющими метрологические характеристики не хуже указанных.

8.9 Средство измерения взаимного смещения пластин.

Для измерения взаимного смещения пластин на образцах Типа 1 и Типа 2 необходимо использовать экстензометры с ножками, имеющими игольчатые опоры, и обладающие измерительной базой 25 мм. По измеряемому диапазону абсолютных деформаций (допустимому приращению измерительной базы) и точности они должны соответствовать классу В1. Калибровку экстензометров в требуемом диапазоне измерений проводят калибратором с ценой деления 0,001 [4]. В случаях, когда величина систематической погрешности измерений, допускаемой для экстензометров класса В1, оказывается неприемлемой, применять экстензометры класса А. Экстензометр должен быть безынерционным в пределах реализуемых скоростей нагружения, а масса экстензометра не должна приводить к недопустимым деформациям изгиба образца.

Экстензометр устанавливается на образец таким образом, что одна его ножка располагается на пластине ПКМ в сечении по центру отверстия, а другая ножка - на съёмном кронштейне, закреплённом на ответной пластине соединения также в сечении по центру отверстия соединения. Для предотвращения смещения кронштейна относительно сечения по оси отверстия соединения изгибная жёсткость двух винтов, установленных в сечении по центру отверстия, должна быть существенно выше жёсткости двух винтов, установленных в сечении, проходящем на расстоянии 20 мм от вышеупомянутого. Эскиз кронштейна и его расположения на образце двухсрезного соединения (Тип 1) дан на рисунке 6.



1 – образец

2 – кронштейн

3 – экстензометр

Рисунок 6 – Эскиз двухсрезного образца с кронштейном

Эскиз приспособления для испытаний односрезного безыгибного соединения (Тип 3) дан на рисунке 7. Схема установки экстензометра для образца Тип 3 в составе приспособления для испытаний представлена на рисунке 8.

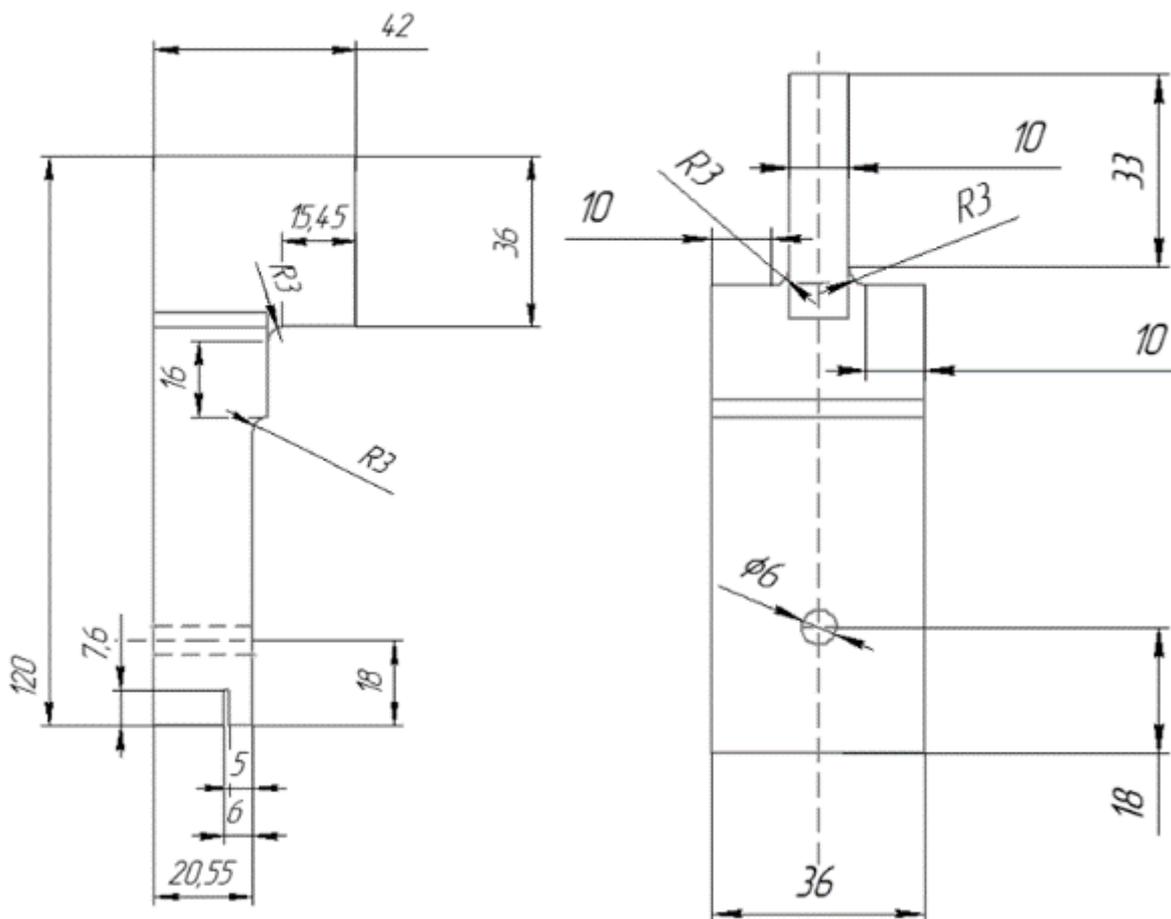


Рисунок 7 – Эскиз приспособления для испытания односрезного образца в условиях безызгибного осевого нагружения:

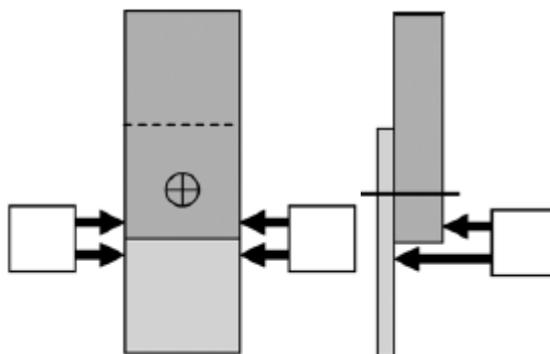


Рисунок 8 – Варианты установки экстензометра для образца Тип 3.

9 Поверка испытательного оборудования

Поверку, градуировку и аттестацию испытательной машины осуществляют в соответствии с Методическими указаниями [4]. Точность всех измерительных приборов, оборудования и аппаратуры должна удостоверяться свидетельствами о поверке с действующими сроками разрешения на использование.

10 Кондиционирование образцов

Кондиционирование образцов перед испытаниями проводят в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423, если в нормативно-технической документации на испытания нет

других указаний. Кондиционирование образцов, заключающееся в равновесном влагонасыщении при заданном уровне относительной влажности и температуры, выполняют в специализированных камерах (см. 8.5). В тех случаях, когда заказчик не регламентировал условий кондиционирования, образцы считают готовыми к испытанию в состоянии поставки.

В протоколе по испытаниям описывают условия кондиционирования образцов с указанием содержания в образцах влаги. Если регламентированного кондиционирования не проводилось, то в отчёте по испытаниям указывают: «Образцы некондиционированные, содержание влаги неизвестно».

11 Порядок выполнения работ

11.1 Параметры, определяемые перед испытаниями:

Способ отбора образцов, тип и геометрия образца, тип и материал крепёжного элемента, момент затяжки и осевое усилие сжатия образца крепёжным элементом, способ очищения и образцы-свидетели кондиционирования (если требуются).

11.2 Основные требования:

11.2.1 Любые неумышленные или преднамеренные отклонения от процедуры проведения испытаний регистрируют в протоколе испытаний.

11.2.2 Если должны быть установлены плотность материала, объёмное содержание наполнителя и пор, тогда должны быть испытаны соответствующие образцы, вырезанные из той же панели, что и образцы для прочностных испытаний.

11.2.3 Образцы хранят в условиях заданной окружающей среды вплоть до испытаний.

11.2.4 Перед испытаниями (до кондиционирования) измеряют ширину образцов и толщину в вершинах отверстия. Также измеряют диаметр отверстия, диаметр крепёжного элемента, глубину и угол зонковки, глубину западания и высоту выступания потайной головки, расстояние кромки отверстия до ближайшей грани образца, зазор между отверстием и крепёжным элементом.

11.2.5 Поверхность отверстия, крепёжный элемент и зоны прилегания его головок должны быть очищены. Если требуется смазка резьбы, то её применяют только для гайки. Не допускается попадание смазки на поверхности отверстия и прилегания головок крепёжного элемента. Способ очищения и тип смазки регистрируют в протоколе испытаний.

11.2.6 Сборка композитной пластины с крепёжным элементом и шайбой (при её наличии) выполняют в соответствии с процедурой, указанной Заказчиком.

11.3 Установка болта.

Если применяется болт, то для завинчивания гайки используют динамометрический ключ с точностью задания момента кручения 10% по ГОСТ Р 51254.

11.4 Проведение испытаний

11.4.1 Образец устанавливают в захватах испытательной машины. При зажатии образца следят за тем, чтобы середина губок у обоих захватов совпала с продольной осью образца. Образцы зажимают распределённым усилием такой величины, чтобы не вызывать разрушения образцов в области зажима и не позволять им выскользывать из захватов..

11.4.2 При наличии на образец устанавливают приспособление, исключающее его изгиб и потерю устойчивости.

11.4.3 На испытательной машине устанавливают скорость нагружения от 5 до 15 МПа/с. При испытаниях в режиме заданного перемещения требуемую скорость перемещения активного захвата подбирают по результатам испытаний первого образца. Величина перемещения активного захвата после разрушения образца при испытаниях по режиму заданного перемещения или заданной нагрузки, после которого испытательная машина должна прекратить нагружение, не должна превышать величину от 1 до 1.5 мм.

11.4.4 Нагревают или охлаждают образец до требуемой температуры испытаний. Контроль температуры осуществляют с помощью термопар по ГОСТ 12423, закреплённых на образце в рабочей зоне с двух сторон рядом с отверстием. Длительность процесса нагревания или охлаждения подбирают экспериментально посредством создания в контролируемой зоне образца условий стационарного теплообмена при заданной температуре и сохранения этих условий в течение 2 мин, когда температура практически не меняется и находится в пределах регламентированной погрешности ± 3 °С. Если нагревание и охлаждение не требуется, то испытания проводят в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423.

11.4.5 Нагружают образец с заданной скоростью до разрушения, регистрируя нагрузку, перемещение активного захвата, показания экстензометров (при их наличии) и время процесса нагружения. Для образцов Типа 1 и Типа 3 используется следующая последовательность действий при испытаниях:

- нагружение образца до напряжений смятия минус 10 МПа (сжатие), разгрузка, растяжение до контактного напряжения 10 МПа (растяжение), разгрузка. По полученной диаграмме (пример показан на рисунке 9), определяется величина зазора между отверстием и болтом Δ_H , принятая равной взаимному смещению соединённых пластин в сечении по центру отверстия. Если приложенного усилия недостаточно для взаимного смещения пластин, следует повторить данный шаг, увеличив напряжения смятия;
- нагружение на линейном участке диаграммы «нагрузка – смещение» с последующей разгрузкой;
- если разрушение не произошло, то растяжение до овализации отверстия около 2% с последующей разгрузкой;
- если разрушение не произошло, то растяжение до овализации отверстия около 6% с последующей разгрузкой.

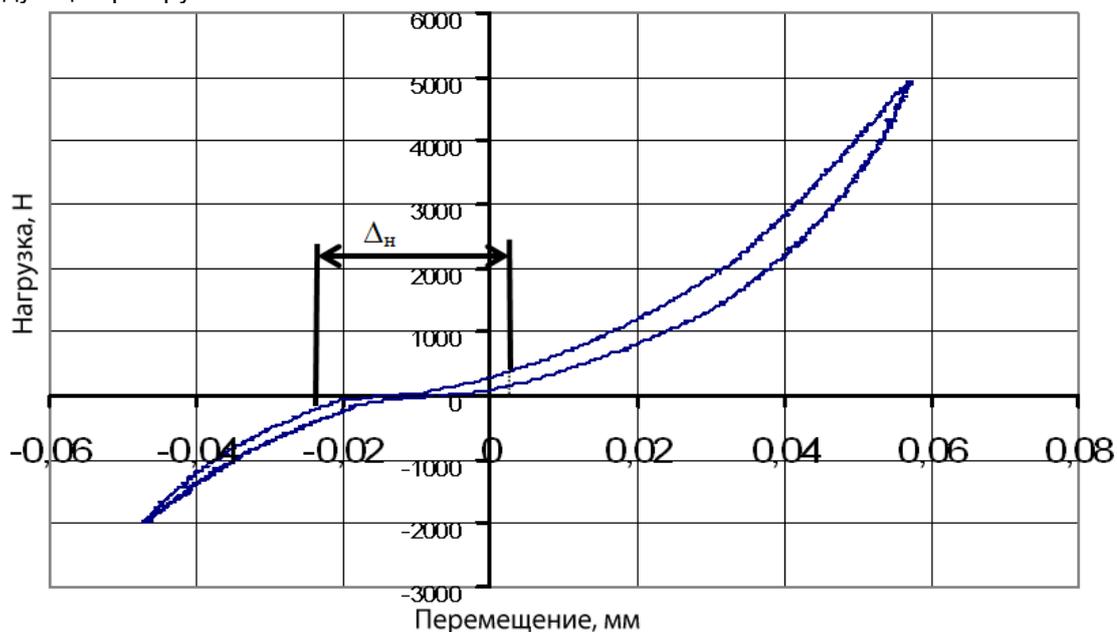


Рисунок 9 – Диаграмма «нагрузка – смещение» на начальном участке нагружения одноточечного болтового соединения

Для образцов Типа 2 испытания заключаются в растяжении (сжатии) с постоянной скоростью образца с записью диаграммы «нагрузка – перемещение подвижного захвата машины» в следующей последовательности:

- растяжение до остаточной овализации отверстия около 2% с последующей разгрузкой;
- если разрушение не произошло, то растяжение до овализации отверстия около 6% с последующей разгрузкой.

Не рекомендуется доводить нагружение до полного разрушения образца, т.к. это может привести к невозможности определения начальной формы разрушения.

11.4.6 Регистрацию усилия в зависимости от перемещения подвижного захвата или показания экстензомера проводят постоянно или выполняют через равные интервалы времени. Для данного метода испытаний рекомендуемая скорость опроса показаний экстензомера (датчика перемещения подвижного захвата) устанавливается из расчёта получения в результате минимум 300 точек на каждый измеряемый параметр (датчик) во время единичного нагружения одного образца. Если в процессе нагружения обнаружено появление переходной зоны или начальное повреждение слоёв, то необходимо зарегистрировать значения усилия и характер повреждения, соответствующие этим событиям. В протоколе испытаний отразить метод, используемый для определения начальных разрушений.

Помимо данных, получаемых из эксперимента и являющихся исследуемыми механическими свойствами образца, строят диаграмму «нагрузка – перемещение», которая используется для определения параметров соединения, а также может быть использована для выяснения причин выпадения отдельных результатов испытаний и проблем, связанных с зажатием и выскальзыванием образца из захватов.

11.4.7 Формы разрушения.

Регистрируют форму, зону и место разрушения для каждого образца. Для описания формы разрушения используют трёхпозиционный буквенный код [1], описанный в таблице 1. Примеры кодированного описания форм разрушения представлены на рисунке 10.

Таблица 1

Первая позиция кода		Вторая позиция кода		Третья позиция кода	
Тип разрушения	Обозначение	Зона разрушения	Обозначение	Место разрушения	Обозначение
Смятие пластины	B	1-ое отверстие	1	Пластина со стороны головки болта (болт-заклёпки)	B
Расклинивание пластины	C	2-ое отверстие	2	Пластина со стороны гайки (закрывающей головки болт-заклёпки)	N
Разрушение пластины от растяжения в сечении нетто	L	Оба отверстия	B	Головка болта (болт-заклёпки)	H
Срез пластины	S	1-ый крепёжный элемент	3	Гайка болта (закрывающая головка болт-заклёпки)	C
Вырыв пластины	T	2-ой крепёжный элемент	4	Тело крепёжного элемента	S
Расслоение пластины	D	Оба крепёжных элемента	F	Резьба болта	T
Проваливание сквозь пластину	P			Непригодное разрушение	I
Пластическое деформирование крепёжного элемента	Y			Неизвестное	U
Изгиб крепёжного элемента	E				
Растяжение крепёжного элемента	T				
Сдвиг крепёжного элемента	S				
Множественное разрушение	M(xyz)				
Другие разрушения	O				

ВП	СП	ЛП	СП
ТП	ДП	РПВ	УЗН
УЗН	УЗТ	ЕЗН	ЕЗС
ТЗН	ТЗТ	СЗС	СЗТ

Рисунок 10 – Примеры форм разрушения соединений

12 Анализ результатов испытаний

12.1 Значения параметров не рассчитывают для образцов, разрушение которых произошло в результате наличия явного дефекта, если только оценка влияния таких дефектов не является целью испытаний. Каждый отбракованный образец заменяют новым из той же партии и проводят повторные испытания при тех же условиях кондиционирования и испытания.

12.2 Разрушения образцов вне зоны отверстия являются незачётными. Если изломы значительной части образцов из выборки расположены вне этой зоны, то необходимо проверить условия приложения усилия к материалу образца. При этом следует обращать внимание на соосность нагружения, давление в захватах, конусность толщины образца в зоне захвата, шероховатость краёв образца после механической обработки, правильность установки оснастки.

12.3 Для качественной оценки равномерности зажатия образца в губках испытательной машины проверяют их отпечаток на поверхностях образца.

13 Обработка результатов испытаний

13.1 Определить номинальную толщину образца ламината:

$$h_n = n_\delta \delta_{1n}, \quad (2)$$

где h_n – номинальная толщина ламината, мм;

δ_{1n} – номинальная толщина слоя, устанавливаемая разработчиком ПКМ, мм;

n_δ – число слоёв в ламинате.

13.2 Определить реальную толщину слоя для каждого образца испытываемого ламината:

$$\delta_1 = \frac{h}{n_\delta}, \quad (3)$$

где h – средняя измеренная толщина образца ламината из ПКМ, мм;

δ_1 – реальная толщина слоя образца, мм.

13.3 Вычислить зазор между отверстием и крепёжным элементом:

$$\Delta = d - D, \quad (4)$$

где Δ - зазор между отверстием и крепёжным элементом, мм;

d – реальный диаметр отверстия, мм;

D – реальный диаметр болта, мм.

13.4 Для каждого образца по диаграмме «нагрузка – смещение» определить усилие на образец $P_{\Delta_{dk}}$ и взаимное смещение соединяемых элементов $\Delta_{\Delta_{dk}}$ для овализации отверстия Δ_{do} , равной 0%, 2%, 4% и 6%. При определении $P_{\Delta_{dk}}$ и $\Delta_{\Delta_{dk}}$ необходимо из взаимного смещения элементов вычесть смещение, связанное с выборкой зазора, как показано на рисунке 11.

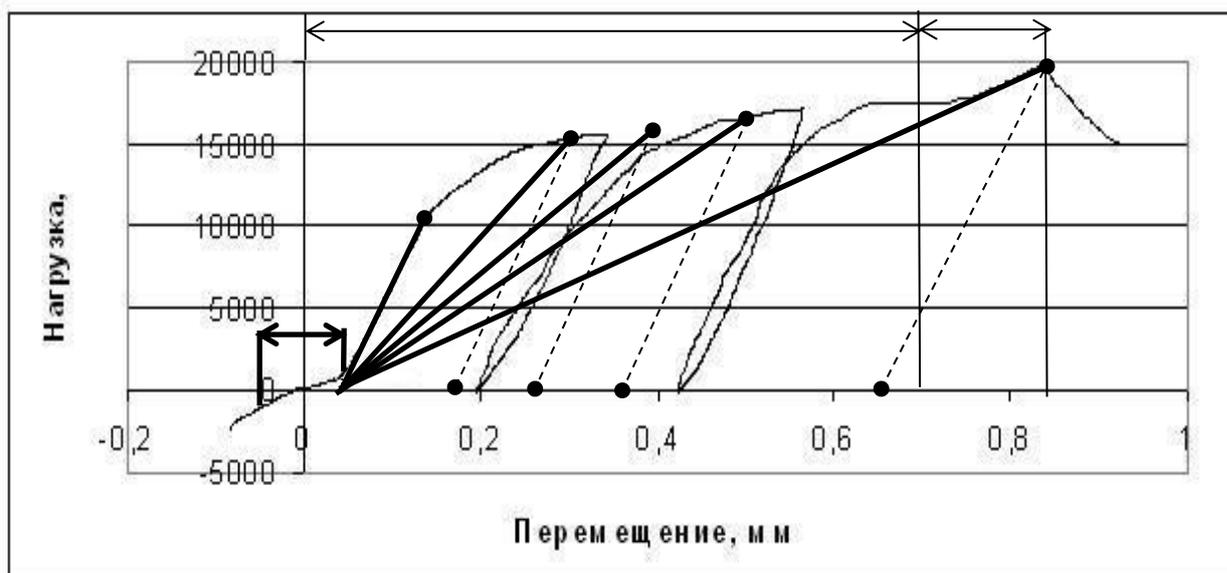


Рисунок 11 – Определение значений нагрузки и податливости, соответствующих заданной овализации отверстия

13.5 Для каждого образца рассчитать напряжения смятия соответствующих овализации отверстия 0%, 2%, 4% и 6% по формуле (5):

$$\sigma_{\Delta_{dk}} = \frac{P_{\Delta_{dk}}}{dh_n}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\Delta_{dk}}$ - напряжения смятия соответствующих овализации $k\%$, МПа;

$P_{\Delta_{dk}}$ - нагрузка соответствующих овализации $k\%$, Н.

13.6 Для каждого образца рассчитать податливость соединения, соответствующую овализации отверстия 0%, 2%, 4% и 6% по формуле (6):

$$C_{\Delta_{dk}} = \frac{\Delta_{\Delta_{dk}}}{P_{\Delta_{dk}}}, \quad (6)$$

где $C_{\Delta_{dk}}$ - податливость соединения, соответствующая овализации $k\%$, мм/Н;

$\Delta_{\Delta_{dk}}$ - взаимное смещение соединяемых элементов, соответствующее овализации $k\%$, мм.

13.7 Рассчитать относительную ширину образца, диаметр отверстия и глубину зенковки для каждого образца:

$$\bar{b} = \frac{b}{d}, \quad \bar{d} = \frac{d}{h}, \quad \bar{h}_s = \frac{h_s}{d}, \quad (7)$$

где \bar{b} – относительная ширина образца, мм;

\bar{d} – относительный диаметр отверстия, мм;

\bar{h}_z – относительная глубина зенковки, мм;

h_z – глубина зенковки, мм.

13.8 Рассчитать выборочные среднее, стандартное отклонение и коэффициент вариации по ГОСТ 14359 для всех полученных значений и с точностью до трех значащих цифр занести в протокол испытаний.

14 Оформление результатов испытаний

Протокол испытаний включает следующие сведения.

14.1 Ссылка на настоящий стандарт и основание для проведения испытаний.

14.2 Марка ПКМ, формула укладки, номинальная толщина слоя, ссылка на технические условия и на паспорт материала.

14.3 Данные об изготовителе, номер партии или серии ПКМ, источник поступления материала, дата изготовления, номер сертификата или паспорта.

14.4 Изготовитель образцов для испытаний и дата их изготовления.

14.5 Дата испытаний.

14.6 Образцы: метод отбора, геометрия, методы и режимы резки и обработки поверхностей образцов, схема и способ маркировки, диаметр отверстия. Болт или штифт: тип и материал, диаметр, метод установки, момент затяжки (если есть), шайбы и гайки (если есть), тип смазки.

14.7 Количество испытанных образцов (количество отбракованных образцов и причины их отбраковки).

14.8 Параметры и результаты кондиционирования; условия пребывания образцов до испытания с указанием содержания в них влаги.

14.9 Марка и максимальное усилие испытательной машины; тип и конструкция захватов.

14.10 Относительная влажность и температура воздуха в испытательной лаборатории.

14.11 Условия испытаний, скорость нагружения, температура образца.

14.12 Формы разрушений, выявленные у каждого образца, фотографии.

14.13 Значения зазора между отверстием и крепёжным элементом, западания (выступания) потайной головки, глубины и угла зенковки, нагрузка разрушения каждого образца.

14.14 Среднее выборочное значение, стандартное отклонение и коэффициент вариации для каждой экспериментальной характеристики ПКМ.

14.15 Отклонения от требований настоящего стандарта.

14.16 Фамилии и должности персонала, проводившего испытания.

15 Требования безопасности

Данная методика не содержит предписаний по технике безопасности и охране здоровья.

Если таковые окажутся необходимыми 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 защиты от осколков при работе с хрупкими материалами;
- приёмы безопасной работы с электроприборами, нагревателями и испытательными машинами;
- обеспечение экологической безопасности при испытании материалов, выделяющих продукты разложения при повышенных температурах.

часть 2 Определения овализации отверстий при циклическом нагружении

Объект испытаний

Данный раздел стандарта устанавливает метод определения овализации отверстия при циклическом нагружении и получения зависимости «овализация – наработка» для ламинатов из полимерного композиционного материала (ПКМ) в условиях нормальной (20 ± 5 °С), повышенной (до 160 °С) и пониженной (до минус 60 °С) температур при». Вид ПКМ ограничен ламинатами на основе непрерывных армирующих волокон с полимерной матрицей, у которых укладка симметрична по толщине сечения и сбалансирована относительно направления приложения испытательной нагрузки. Номенклатура ламинатов и их толщин, к которым применим данный метод испытаний, определены в разделе 7.

Характеристики и свойства, определяемые рассматриваемым методом испытаний, вводят в технические условия на материал, используют при паспортизации, создании баз данных, в расчётах на прочность, а также в исследованиях и разработках при создании авиационной техники.

Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 5378-88 Угломеры с нониусом. Технические условия

ГОСТ 8074–82 Микроскопы инструментальные. Типы, основные параметры и размеры. Технические требования

ГОСТ 12423–66 Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)

ГОСТ 14359–69 Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования

ГОСТ Р 51254-99 Инструмент монтажный для нормированной затяжки резьбовых соединений. Ключи моментные. Общие технические условия

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов по указателю “Национальные стандарты”, составленному на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

Термины и определения

В данной части настоящего стандарта применены следующие термины с соответствующими определениями.

3.1 полимерный композиционный материал (ПКМ): Материал конструкционного назначения, состоящий из высокопрочных волокон (наполнителя) и полимерной матрицы (отвержденного связующего).

3.2 ламинат ПКМ: Материал, отформованный в плоской форме и состоящий из ряда уложенных слоёв армирующего наполнителя (лент однонаправленных волокон и/или ткани), помещённого в полимерную матрицу.

3.3 укладка слоёв ПКМ: Закономерность в чередовании ориентаций слоёв наполнителя относительно принятой трёхмерной системы координат.

3.4 слой ПКМ: Единичный слой ПКМ, толщина которого равна толщине ламината, отнесённой к числу уложенных в нём слоёв одного и того же наполнителя.

3.5 партия материала: Материал, изготовленный на одном оборудовании по одному и тому же технологическому процессу из одних и тех же партий компонентов.

3.6 испытание (эксперимент): Осуществление какого-нибудь определенного комплекса условий, который может быть воспроизведен сколь угодно большое число раз с целью воздействия на продукцию и изучения её поведения в данных условиях.

3.7 окружающая среда: Условия испытаний (температура, влажность, свет, радиация, микроорганизмы и т.д.).

3.8 **овализация отверстия:** Отношение взаимного смещения по центру отверстия соединённых пластин к диаметру отверстия.

3.9 **нестеснённое разрушение соединения:** Процесс разрушения образца от смятия (сдвига, разрыва) при беспрепятственном выдавливании материала из под крепёжного элемента в боковые зазоры двухсрезного (односрезного) соединения.

3.10 **стеснённое разрушение соединения:** Процесс разрушения образца при нулевых боковых зазорах в двухсрезном (односрезном) соединении.

3.11 **податливость:** Отношение взаимного смещения по центру отверстия соединённых пластин к нагрузке, вызвавшей это смещение

Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

- 4.1 $[\alpha'_i]_{SV}$ или $[\alpha'_i]_{NS}$: Укладка слоёв в ПКМ, где
 α - угол ориентации слоя относительно продольной оси образца;
 i - число рядом лежащих слоёв с одним углом ориентации;
 j - индекс материала слоя (для ПКМ, содержащих разные наполнители);
 N - количество симметрично набранных пакетов;
 S - симметричное повторение набранных пакетов.
- 4.2 δ_1 , мм: Действительная (средняя) толщина слоя в ламинате.
- 4.3 δ_{1n} , мм: Номинальная толщина слоя в ламинате, устанавливаемая разработчиком ПКМ.
- 4.4 n_δ : Число слоёв в ламинате.
- 4.5 h_n , мм: Номинальная толщина образца из ламината.
- 4.6 h , мм: Реальная толщина образца.
- 4.7 b , мм: Ширина образца (в рабочей зоне).
- 4.8 d , мм: Диаметр отверстия.
- 4.9 Δ , мм: Зазор между отверстием и крепёжным элементом.
- 4.10 D , мм: Диаметр болта или штифта.
- 4.11 h_s , мм: Глубина зенковки.
- 4.12 h_r , мм: Глубина западания головки потайного крепежа (положительное значение) или высота её выступания (отрицательное значение) относительно плоскости образца.
- 4.13 Δ_o , мм: Показание индикатора при касании его головки поверхности образца рядом с потайной головкой крепежа.
- 4.14 Δ_r , мм: Показание индикатора при касании его головки поверхности потайной головки крепежа.
- 4.15 \bar{b} : Относительная ширина образца.
- 4.16 \bar{d} : Относительный диаметр отверстия.
- 4.17 \bar{h}_s : Относительная глубина зенковки.
- 4.18 L , мм: Длина образца.
- 4.19 e , мм: Расстояние от центра отверстия до ближайшей поперечной грани образца.
- 4.20 ζ , мм: Зазор между пластинами в соединении.
- 4.21 s , мм: Длина накладок.
- 4.22 Δ_n , мм: Величина зазора между отверстием и болтом, принятая равной взаимному смещению соединённых пластин в сечении по центру отверстия при изменении контактного напряжения от минус 10 МПа до 10 МПа.
- 4.23 $\sigma_{\Delta_{dk}}$, МПа: Напряжения смятия соответствующих овализации $k\%$.
- 4.24 $P_{\Delta_{dk}}$, Н: Нагрузка соответствующих овализации $k\%$.
- 4.25 Δ_{do} , %: Овализация отверстия, равная остаточному взаимному смещению соединённых пластин в сечении по центру отверстия без учёта величины зазора между отверстием и болтом, отнесённое к диаметру отверстия.

- 4.26 $C_{\Delta_{dk}}$, **мм/Н**: Податливость соединения, соответствующая овализации k%.
- 4.27 Δ_{dk} , **мм**: Взаимное смещение соединяемых элементов, соответствующее овализации k%.
- 4.28 f , **Гц**: Частота циклов.
- 4.29 P_{max} , **Н**: максимальное значение нагрузки цикла.
- 4.30 P_{min} , **Н**: минимальное значение нагрузки цикла.
- 4.31 σ_{max} , **МПа**: Максимальное напряжение цикла (брутто).
- 4.32 σ_{min} , **МПа**: Минимальное напряжение цикла (брутто).
- 4.33 σ_m , **МПа**: Среднее напряжение цикла (брутто).
- 4.34 σ_a , **МПа**: Амплитуда напряжения цикла (брутто).
- 4.35 R : Коэффициент асимметрии цикла.
- 4.36 V_{cy} , σ_{cy} , **МПа**: Напряжение статического разрушения образца.
- 4.37 σ_c , **МПа**: Напряжение брутто статического разрушения образца с ударным повреждением при скорости равномерного нагружения σ' .
- 4.38 σ , **МПа**: Экстремальное значение цикла.

Объект испытаний

5.1 Объектами испытаний являются образцы механического соединения плоских пластин ПКМ или пластины ПКМ с металлической пластиной. Вид соединения:

- одноточечное безызгибное односрезное соединение (Тип 3 из части 1);

5.2 Факторы, влияющие на результаты эксперимента: материал и способ изготовления образцов, укладка слоёв и геометрия образца (диаметр отверстия, отношение диаметра к толщине, отношение ширины к диаметру, отношение расстояния до задней кромки к диаметру, точность и качество разделки отверстия, зазор между крепёжным элементом и отверстием, наличие боковых зазоров между соединёнными пластинами, тип крепёжного элемента и способ его установки, осевое усилие в крепёжном элементе при его установке, глубина зенковки (если потайной крепёжный элемент), прямолинейность образца и равномерность его зажатия в испытательной машине, кондиционирование образцов, условия климатических испытаний, время при температуре испытания, частота нагружения.

Методы испытаний

Метод испытания состоит из трех этапов и основные процедуры описаны в части 1:

- 6.1 Нагружение образца с целью определения начальных зазоров;
- 6.2 Циклическое нагружение образца;
- 6.3 Измерение с помощью экстензометра величины взаимного смещения пластин через выбранное количество циклов нагружения с последующим определением величины овализации отверстия.

Образцы для испытаний

7.1 Образец применяемый для определения овализации отверстия при циклическом нагружении соответствует образцу Типу 3 из части 1.

Средства испытаний

- 8.1 Средства испытаний описаны в части 1.

Поверка испытательного оборудования

Проверка испытательного оборудования производится в соответствии п. 9 части 1

Кондиционирование образцов

Кондиционирование образцов описано в разделе 10 части 1.

Порядок выполнения работ

- 11.1 Параметры, определяемые перед испытаниями описаны в части 1.
- 11.2 Основные требования описаны в части 1.
- 11.3 Установка болта.

Если применяется болт, то для завинчивания гайки используют динамометрический ключ с точностью задания момента кручения 10% по ГОСТ Р 51254. При циклических испытаниях рекомендуется устанавливать болт с моментом затяжки 1.5-2.5 Нм.

11.4 Проведение испытаний

11.4.1 Образец устанавливают в захватах испытательной машины. При зажатии образца следят за тем, чтобы середина губок у обоих захватов совпала с продольной осью образца. Образцы зажимают распределённым усилием такой величины, чтобы не вызывать разрушения образцов в области зажима и не позволять им выскальзывать из захватов.

11.4.2 При необходимости, на образец устанавливают приспособление, исключающее его изгиб и потерю устойчивости.

11.4.3 На испытательной машине устанавливают скорость нагружения от 5 до 15 МПа/с для квазистатического нагружения, циклическое нагружение должно производиться с рекомендуемой частотой не более 3 Гц.

11.4.4 Нагревают или охлаждают образец до требуемой температуры испытаний. Контроль температуры осуществляют с помощью термодатчиков по ГОСТ 12423, закреплённых на образце в рабочей зоне с двух сторон рядом с отверстием. Длительность процесса нагревания или охлаждения подбирают экспериментально посредством создания в контролируемой зоне образца условий стационарного теплообмена при заданной температуре и сохранения этих условий в течение 2 мин, когда температура практически не меняется и находится в пределах регламентированной погрешности ± 3 °С. Если нагревание и охлаждение не требуется, то испытания проводят в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423.

11.4.5 Для образцов Типа 3 используется следующая последовательность действий при испытаниях:

- нагружение образца до напряжений смятия минус 10 МПа (сжатие), разгрузка, растяжение до контактного напряжения 10 МПа (растяжение), разгрузка. По полученной диаграмме (пример показан на рисунке 9 в части 1), определяется величина зазора между отверстием и болтом Δ_{μ} , принятая равной взаимному смещению соединённых пластин в сечении по центру отверстия. Если приложенного усилия недостаточно для взаимного смещения пластин, следует повторить данный шаг, увеличив напряжения смятия;
- циклическое нагружение образца выбранным числом циклов, которое меньше базы испытаний (рекомендуется получать не менее 4 точек с измеренной овализацией в процессе испытания образца);
- если разрушение не произошло, то, по процедуре, описанной в части 1, замеряется (экстензометром) овализация образца при данной наработке;
- если разрушение не произошло, то испытания продолжают до следующего замера овализации.

11.4.6 Если в процессе испытаний разрушился болт, то разрешается его замена на идентичный, не разрушенный болт с последующим замером овализации перед продолжением циклических испытаний. Замена болта должна быть отражена в протоколе испытаний.

Анализ результатов испытаний

12.1 Значения параметров не рассчитывают для образцов, разрушение которых произошло в результате наличия явного дефекта, если только оценка влияния таких дефектов не является целью

испытаний. Каждый отбракованный образец заменяют новым из той же партии и проводят повторные испытания при тех же условиях кондиционирования и испытания.

12.2 Для качественной оценки равномерности зажатия образца в губках испытательной машины проверяют их отпечаток на поверхностях образца.

Обработка результатов испытаний

13.1 По результатам измерения в процессе циклических испытаний взаимного смещения пластин, вычисляются значения овализации отверстия при наработке, которая соответствует моменту измерения.

13.2 Используя полученные данные, строится график подобный графику на рис. 1. Экспериментальные точки аппроксимируются функцией (как правило, степенной или логарифмической), которая наилучшим образом описывает полученную зависимость. При необходимости, можно разбить график на участки для лучшей аппроксимации и для каждого участка использовать свою функцию. Как правило, таких участков 2.

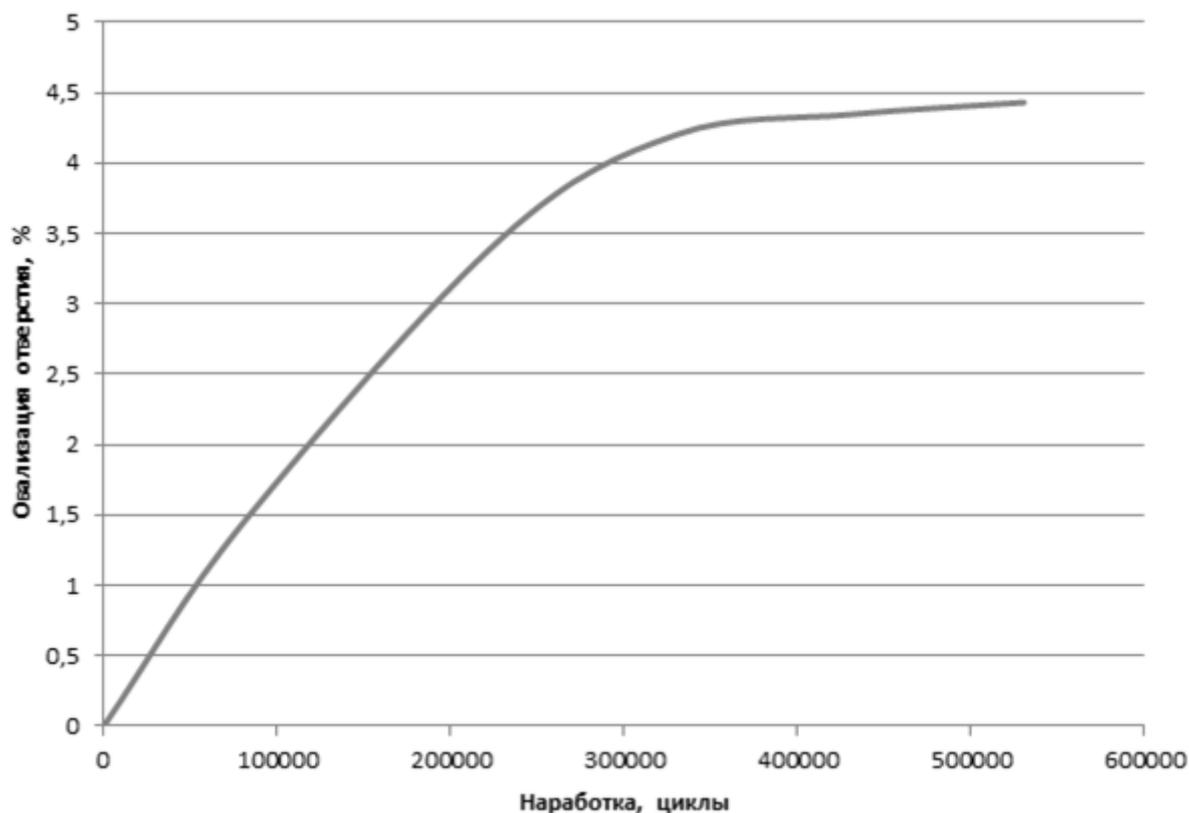


Рисунок 1 – Пример графика зависимости «овализация-наработка» с уравнением функции, которая данный график описывает

Оформление результатов испытаний

Дополнительно к данным из части 1, для циклического нагружения, в протоколе необходимо указать следующие данные:

- 14.1 Нарботку каждого образца;
- 14.2 Параметры цикла нагружения (максимальную, минимальную нагрузку и контактные напряжения цикла);
- 14.3 Нарботки при которых были произведены замеры овализации отверстия.

Требования безопасности

Данная методика не содержит предписаний по технике безопасности и охране здоровья.

Если таковые окажутся необходимыми 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 защиты от осколков при работе с хрупкими материалами;
- приёмы безопасной работы с электроприборами, нагревателями и испытательными машинами;
- обеспечение экологической безопасности при испытании материалов, выделяющих продукты разложения при повышенных температурах.

Библиография

- | | | |
|-----|-------------------------|--|
| [1] | ASTM
D5961/D5961M–10 | Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates |
| [2] | TP 1.4.1773–87 | Механическая обработка деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов. Типовые операции технологических процессов |
| [3] | ASTM E 83 | Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems – Практикум по классификации и поверке экстензометрических систем (аутентичный перевод) |
| [4] | РД 50–482–84 | Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки |