

На правах рукописи



Свиридов Андрей Александрович

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

05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Жуковский 2022

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (г. Жуковский).

Научный руководитель

к.т.н.

Панков Андрей Вячеславович,

Официальные оппоненты:

Батаев Анатолий Андреевич,
д.т.н., профессор, ректор, Федеральное
государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский
государственный технический
университет».

Сергеичев Иван Валерьевич,
к.ф.-м.н., старший преподаватель,
Автономная некоммерческая
образовательная организация высшего
образования «Сколковский институт науки
и технологий».

Ведущая организация

Филиал Публичного акционерного
общества «Ил» – Экспериментальный
машиностроительный завод имени
В.М. Мясищева, Московская обл., г.
Жуковский

Защита диссертации состоится 26 апреля 2022 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=163690.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнялась в обеспечение выполнения требований п.571, п. 613 АП-23,25,27,29 при сертификации авиационной техники Российской Федерации с точки зрения обеспечения ресурса и подтверждения характеристик применяемых материалов. Были решены научно-практические задачи, которые позволили успешно пройти сертификацию в части расчетных характеристик применяемых материалов самолету МС-21-300, вертолетам Ми-38 и Ми-171А2.

Актуальность темы исследования.

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 летной 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 исследования.

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.

Цели и задачи исследования.

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

Для достижения поставленной цели решены следующие **основные 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.

Объект исследования – конструкционные авиационные материалы и их прочностные характеристики;

Предмет 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.

Научная новизна исследования.

Научную новизну работы определяют:

- разработанная методика определения механических свойств авиационных материалов, позволяющие увеличить достоверность получаемых экспериментальных данных и снизить их параметры рассеивания;
- 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;
- подтвержденный рекомендованный диапазон частот нагружения при определении усталостных характеристик современных металлических материалов;
- разработанная 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 и практическая значимость работы.

Теоретическую и практическую значимость работы определяют степень 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.

Методология и методы исследования.

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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика испытаний образцов на прочность при сдвиге в плоскости слоев.
2. Методика испытаний на сдвиг тонких алюминиевых листов.
3. Методика испытаний для определения овализации при статическом и циклическом нагружении.
4. Рекомендации по технологии производства отверстий в элементах авиационной конструкции изготовленных из металлических сплавов и ПКМ.

Степень достоверности и апробация результатов.

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.

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

Автор участвовал с докладами на конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ИМАШ РАН), молодежной конференции ЦАГИ-DLR, ICAS 2016, 2014, Юбилейная конференция СибНИА (2021 г.), 63-я международная конференция МФТИ.

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.

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).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано более 60 работ, отражающие основные положения исследования, в том числе 3 статьи в ведущих научных изданиях, включенных в перечень ВАК и международные системы цитирования Web of Science и Scopus, 53 научно-технических отчета.

Личный вклад автора.

Постановка задач и выбор методов исследования представленных в диссертационной работе, личное участие при проведении большого количества экспериментальных исследований в обеспечение выполнения специальной

квалификации материалов, на основании которого были разработаны новые редакции методик.

Структура и объем работы.

Диссертация объемом 167 страниц включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы из 59 наименований, 2 приложения. В работе содержится 92 рисунка и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность данного направления исследований, продемонстрирован уровень разработанности темы, сформулированы цели и задачи работы. Рассмотрены результаты работы, показана их научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Дано краткое описание диссертации по главам.

В первой главе представлены данные по опыту применения стандартных методик испытания элементарных образцов из ПКМ, показаны границы применимости и пути усовершенствования используемых методик.

В рамках проводимых работ по специальной квалификации было установлено, что стандартные образцы, используемые для получения предела прочности на сдвиг в плоскости листа, не подходят для высокомодульных углепластиков, так как добиться разрушения в зачетной области не представляется возможным, на рисунке 1 представлено незачетное разрушение.

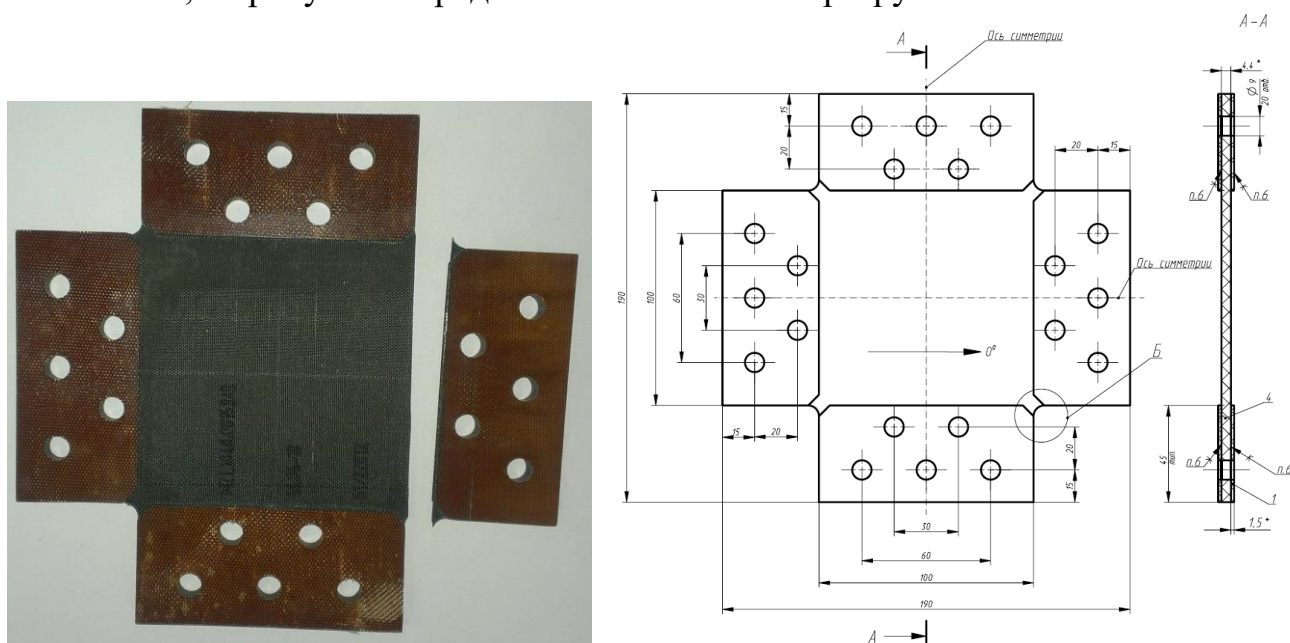


Рисунок 1 – Эскиз образца для определения предела прочности на сдвиг в плоскости листа; незачетное разрушение

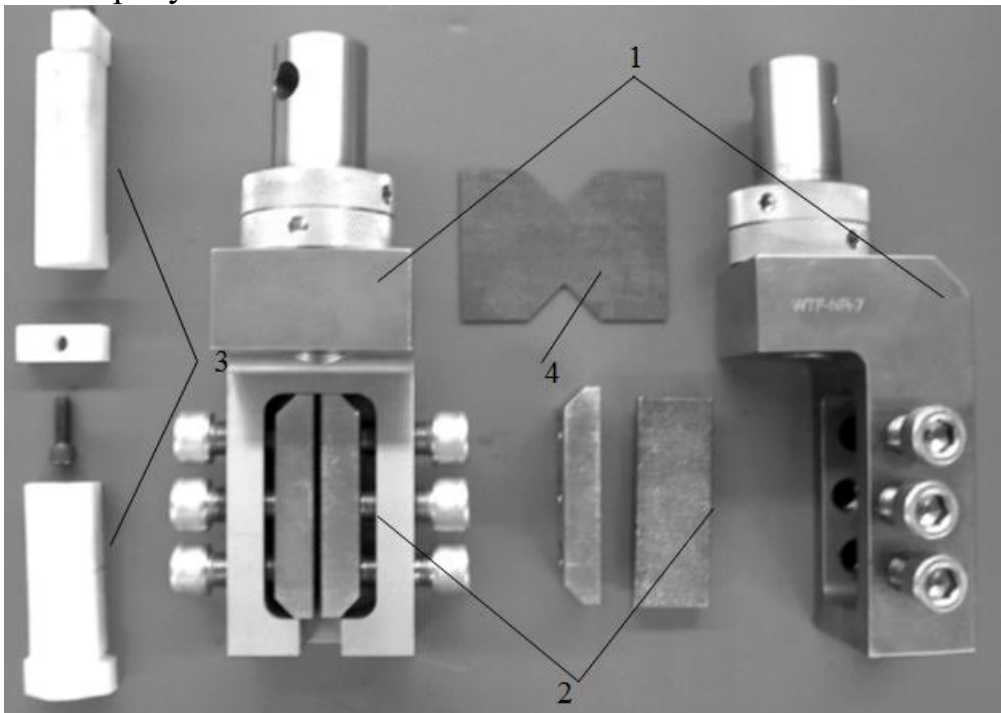
На основании сравнительных испытаний (таблица 1), было принято решение разработать методику на основе ASTM 7078 для ПКМ с высоким пределом прочности на сдвиг ($\tau_{12}=20-50$ кгс/мм²).

Таблица 1 – Сравнительные испытания на сдвиг по различным ASTM

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

По сравнению с ASTM 7078, разработанная методика допускает использование образцов с различными толщинами, даны рекомендации по моменту затяжки болтов, а также используя опыт проведения подобных испытаний, разработан чертеж приспособления с измененными конструкционными материалами, с целью обеспечения больших нагрузок и моментов. Поставляемое зарубежными производителями приспособление для испытаний не подходит для образцов с толщиной более 3-4 мм, так как болты, входящие в комплект, не выдерживают момент затяжки более 50 Нм, который является предельным в ASTM 7078, что в свою очередь не позволяет создать

необходимое давление в захватной части образца. Фотография приспособления представлена на рисунке 2.



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

Проект методики был апробирован и утвержден в виде СТО ФГУП «ЦАГИ», что позволило корректно получать модуль на сдвиг и предел прочности на сдвиг.

Представлены рекомендации по использованию методики ФГУП «ЦАГИ» на сжатие и растяжение взамен методики, разработанной на базе ASTM D 6641. На рисунках 3 и 4 представлены приспособления и чертежи образцов для отечественной и зарубежной методики.

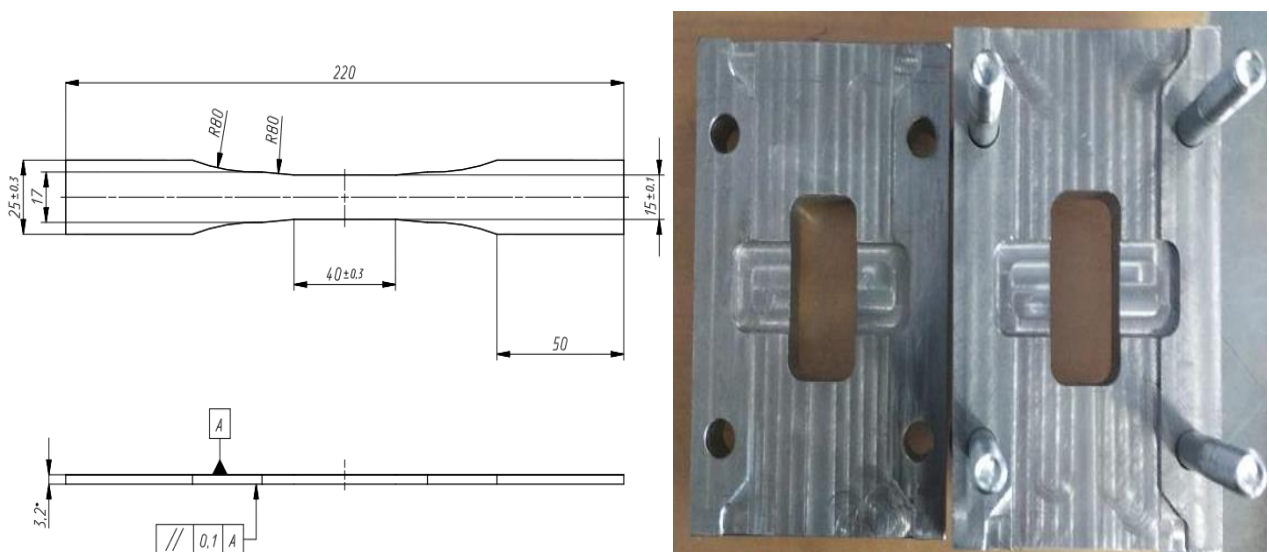


Рисунок 3– Чертеж образца и противоизгибное приспособление для методики ФГУП «ЦАГИ»

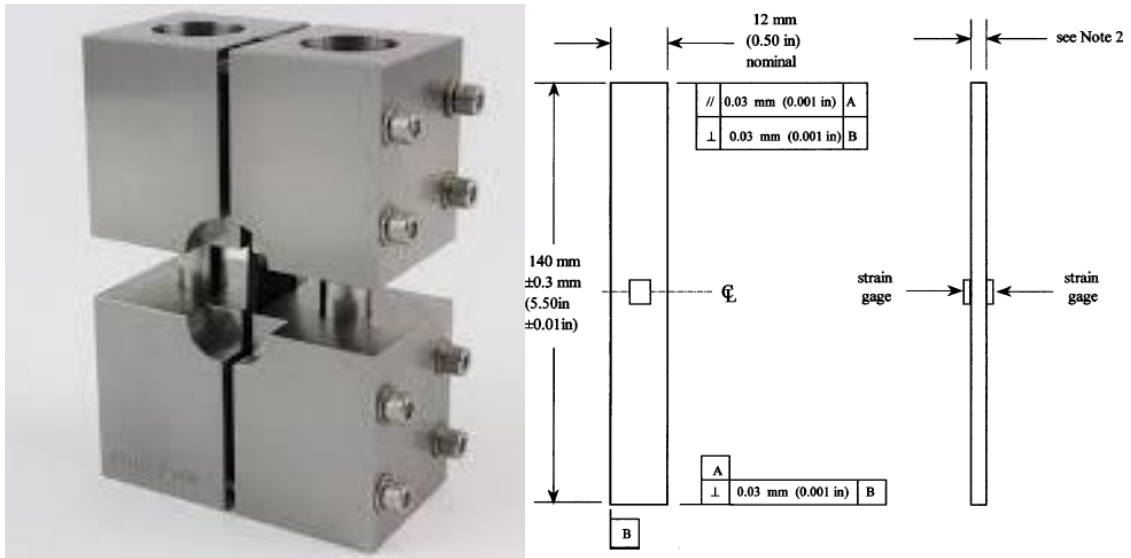


Рисунок 4 – Чертеж образца и противоизгибное приспособление для ASTM D 6641

На основе опыта проведения испытаний показано, что применяемая в ФГУП «ЦАГИ» методика обладает рядом существенных преимуществ: простота и скорость сборки образца перед испытаниями, простая и технологичная конструкция противоизгибного приспособления, возможность испытывать образцы любой толщины, унификация образцов для сжатия и растяжения при определении как характеристик деформируемости, так и прочности.

В главе приводятся основные результаты работы по адаптации зарубежного стандарт ASTM B-831, выпуску проекта методики «Определение предела прочности на сдвиг для тонких алюминиевых листов» и результаты контрольных испытаний. На рисунке 5 представлен эскиз образца, в таблице 2 результаты контрольных экспериментов, включая сравнение двух технологий производства надреза.

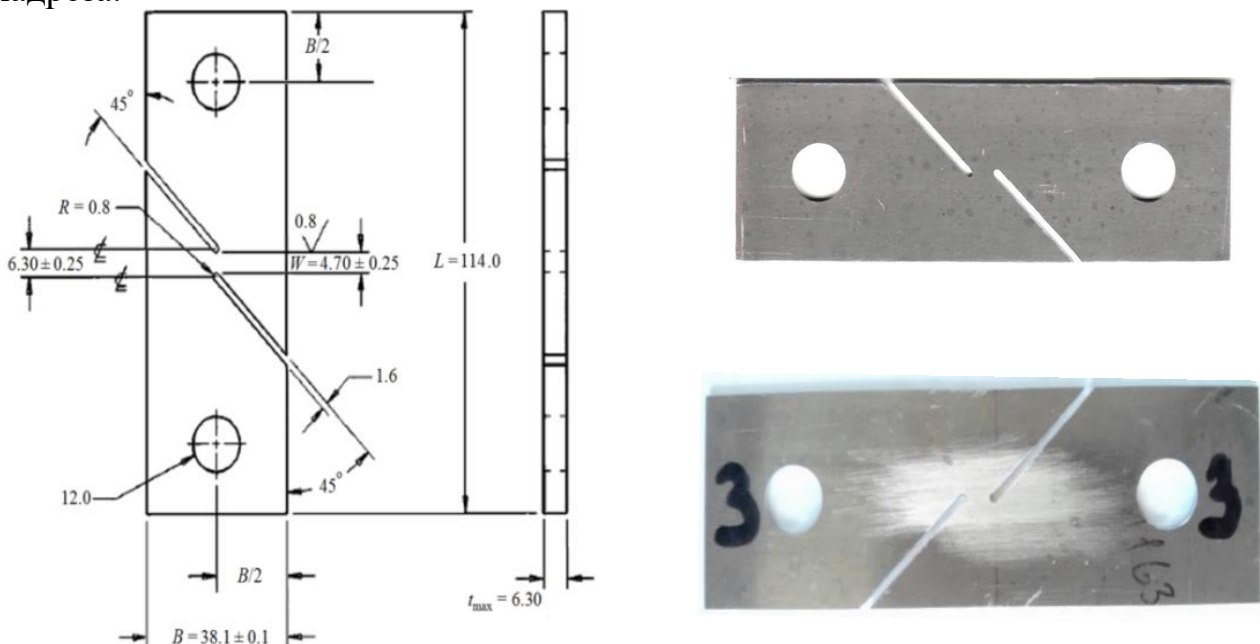


Рисунок 5 – Эскиз образца для методики

Таблица 2 – Результаты контрольных испытаний

№	W, мм	t, мм	V, МПа/с	P_{max} , Н	τ_{cp} , МПа	Примечания
1	4,80	1,67	6,2	2511	313	Надрез выполнен лобзиком
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	Надрез выполнен 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	

В результате данной части работы было показано, что выбранные технологии нанесения надреза равнозначны с точки зрения получаемого результата, разработанная методика позволяет получать данные с приемлемым коэффициентом вариации (1,6 %).

Во второй главе продемонстрированы результаты работ по влиянию технологии производства образцов типа полоса с отверстием на уровень получаемых усталостных характеристик для композитных и алюминиевых материалов, а также приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований в обоснование существенного влияния частоты нагружения образцов в эксперименте на результат.

Для исследования влияния технологии, в частности способа сверления отверстий, на усталостные характеристики для металлических материалов, было выбрано два типовых алюминиевых полуфабриката: плита и прессованный профиль. Было изготовлено по 12 образцов с технологией производства отверстий, которую рекомендует ФГУП «ЦАГИ» (уровень оборотов 1000 об/мин) и реализованной на серийном авиационном заводе (уровень оборотов около 4000-5000 об/мин). На рисунке 6 представлен эскиз образца типа «полоса с отверстием».

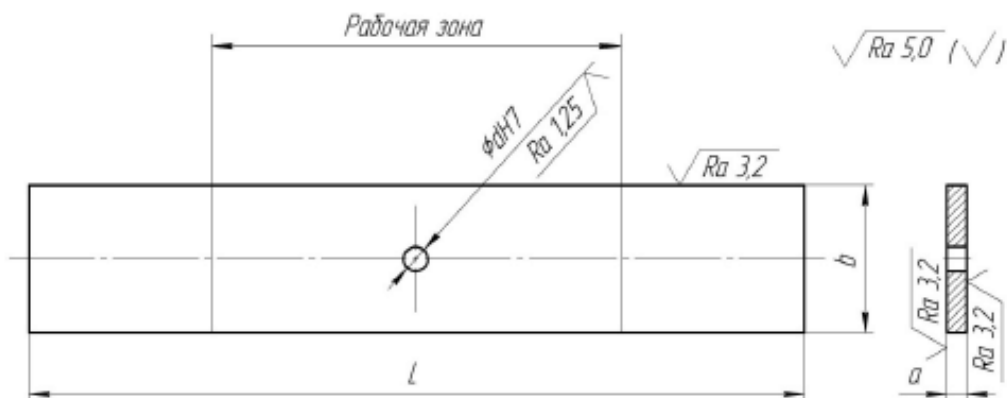


Рисунок 6 – Эскиз образца типа полоса с отверстием

В результате проведения испытаний были получены экспериментальные данные, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Экспериментальные данные по усталости

Полуфабрикат	Средняя долговечность для скорости 1000±200 об/мин (N_1) (ЦАГИ)	Средняя долговечность для скорости 3000-5000 об/мин (N_2) (Завод)	$\left \frac{N_2}{N_1} - 1 \right \times 100\%$
Плита (25 кгс/мм ²)	30399	28037	7,8%
Плита (16 кгс/мм ²)	229331	207435	9,6%
Профиль (19 кгс/мм ²)	64440	75410	17%
Профиль (16 кгс/мм ²)	150696	152248	1%

Анализ экспериментальных данных выполнялся с целью оценки значимости влияния скорости сверления на усталостную долговечность конструкционных металлических материалов. 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 двухвыборочный F -критерий, основанный на отношении оценок дисперсий

$F_3 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$, где $s_1 > s_2$. Результаты этого анализа представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результат проверки гипотезы равенства дисперсий

Полуфабрикат	Эмпирическое значение статистики $F_3 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$	Уровень значимости (вероятность $P(F \leq F_3)$)
Плита (25 кгс/мм ²)	1,42	0,361
Плита (16 кгс/мм ²)	1,52	0,324
Профиль (19 кгс/мм ²)	1,403	0,394
Профиль (16 кгс/мм ²)	3,275	0,137

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

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{s_1^2(n_1 - 1) + s_2^2(n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}}. \text{ Результаты анализа представлены в таблице 5.}$$

Таблица 5 – Результат проверки гипотезы равенства средних

Полуфабрикат	Эмпирическое значение статистики t_3	Уровень значимости (вероятность $P(t \leq t_3)$)
Плита (25 кгс/мм ²)	1,33	0,113
Плита (16 кгс/мм ²)	0,725	0,244
Профиль (19 кгс/мм ²)	1,188	0,14
Профиль (16 кгс/мм ²)	0,64	0,189

По результатам статистического анализа было установлено, что рассматриваемая технология не влияет на получаемые усталостные характеристики, следовательно, может использоваться при производстве образцов для сертификационных испытаний.

В главе показано, что выходить за рамки рекомендаций ФГУП «ЦАГИ» в части частоты нагружения образцов типа «полоса с отверстием» для получения усталостных характеристик металлических материалов и полуфабрикатов недопустимо. Рекомендованная специалистами ФГУП «ЦАГИ» частота испытаний находится в диапазоне 3-10 Гц в зависимости от базы испытаний (от 10^4 – 5×10^5), что обусловлено ранее проведенными испытаниями (рисунок 7). Мотивация разработчиков авиационной техники увеличить частоту испытаний обусловлена желанием существенно сократить сроки проведения работ по специальной квалификации материалов.

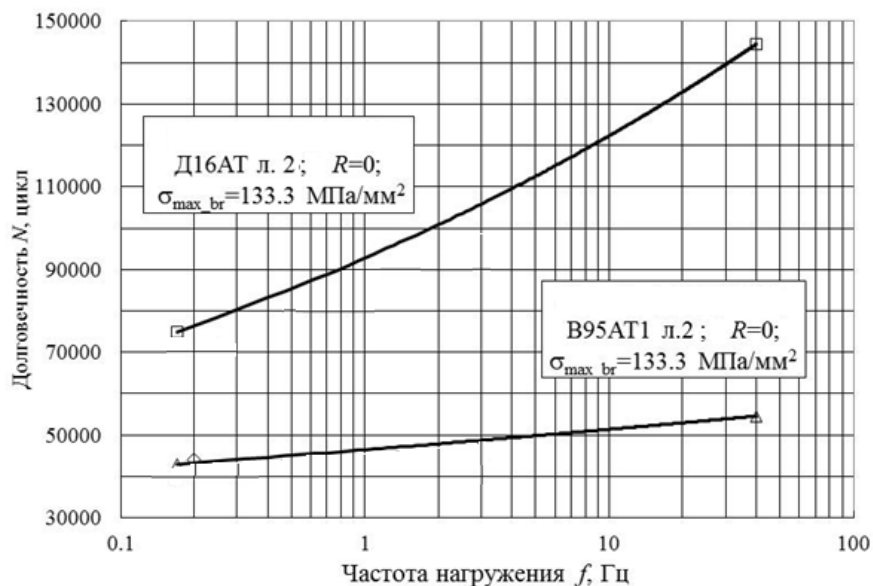


Рисунок 7 – Данные для «старых полуфабрикатов»

В подтверждение рекомендаций ФГУП «ЦАГИ» приводятся результаты испытаний образцов на 40 Гц вырезанных из алюминиевого листа и плиты и сравниваются с ранее полученными результатами для этих же полуфабрикатов на частоте 3-5 Гц. В таблице 6 приводятся уровни нагружения для каждого полуфабриката.

Таблица 6 – Уровни нагружения полуфабрикатов

Полуфабрикат	σ_{max_netto} (кгс/мм ²)	Частота f (Гц)
Плита 50 мм	20, 16, 14	40
Лист 2 мм	20, 16, 13	40

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

Статистика этого критерия:

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

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 имеет распределение как $\frac{N}{N-1} \chi_{k-1}^2$. Уровень значимости

принимался 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.

В результате обработки экспериментальных данных были получены кривые усталости для рассматриваемых полуфабрикатов. Параметры кривых усталости вычислялись по следующим формулам:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \lg \bar{N}_i + m \sum_{i=1}^k n_i \lg \sigma_i}{\sum_{i=1}^k n_i}; \quad m = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \lg \sigma_i \sum_{i=1}^k n_i \lg \bar{N}_i - \sum_{i=1}^k n_i \sum_{i=1}^k n_i \lg \sigma_i \lg \bar{N}_i}{\sum_{i=1}^k n_i \sum_{i=1}^k n_i (\lg \sigma_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^k n_i \lg \sigma_i \right)^2}$$

В таблице 7 представлены параметры кривых усталости, полученные после обработки экспериментальных данных при 40 Гц и 3-5 Гц.

Таблица 7 – Результат сравнения параметров кривых усталости

Полуфабрикат	Параметры КУ 3-5 Гц	Параметры КУ 40 Гц
Плита 50 мм (Д)	$m=5,5; B=12,00$	$m=6,295; B=13,255$
Плита 50 мм (П)	$m=5; B=11,89$	$m=5,574; B=12,198$
Лист 2 мм (Д)	$m=4,68; B=10,89$	$m=7,282; B=14,278$
Лист 2 мм (П)	$m=4,37; B=10,46$	$m=7,187; B=14,06$

По результатам выполнения данной части работ установлено, что частота нагружения существенно влияет на получаемые характеристики усталости, увеличивая долговечность образцов от 1,5 раз. Следует отметить, что такое увеличение уменьшает уровень безопасности конструкции, а при проектировании может привести к существенным просчетам. Рассеяние (логарифма долговечности) экспериментальных результатов так же увеличилось и вышло за рамки принятой величины – 0,15, таким образом, получение результатов на повышенных частотах приводит к разрыву связи характеристик, реализуемых в конструкции при натуральных испытаниях (частота испытаний 0,5 -1 Гц), а также приводит к увеличению соответствующего коэффициента надежности.

В третьей главе приведены результаты исследования влияние различных технологий производства образцов типа полоса с отверстием для композитных полуфабрикатов. Для рассмотрения были выбраны три технологии: стандартная технология производства отверстий; стандартная технология с финишной обработкой отверстия шлифовальным инструментом; технология сверления с полимерной пленкой.

На рисунке 8 представлены качество отверстий при разной технологии.



Стандартная технология

Производство с пленкой

Стандартная+шлиф.
инстр.

Рисунок 8 – Результат производства отверстия по разным технологиям

На основе визуального анализа установлено, что стандартная технология допускает в отверстиях сколы, вырывы материала и иные дефекты, в то время как остальные две не допускают и отверстия получаются без визуально обнаруживаемых дефектов. Для проведения экспериментально-расчетных исследований были изготовлены образцы из углепластика с квазиизотропной

укладкой и вырезкой вдоль 0° и вдоль 90° . В таблице 8 приводятся данные по проведенному эксперименту.

Таблица 8 – Полученные 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. INSTR.- 0	22,49	60,33	0,40	11
Стандартная +шлиф. INSTR. – 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

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.

На рисунке 9 представлено сравнение рассеяния усталостных характеристик для образцов, вырезанных вдоль нулевого направления, с

отверстием, выполненным по разным технологиям. На рисунке 10 представлена зависимость коэффициента надежности от рассеяния и потенциальное его снижение при применении сверления отверстий с полимерной пленкой.

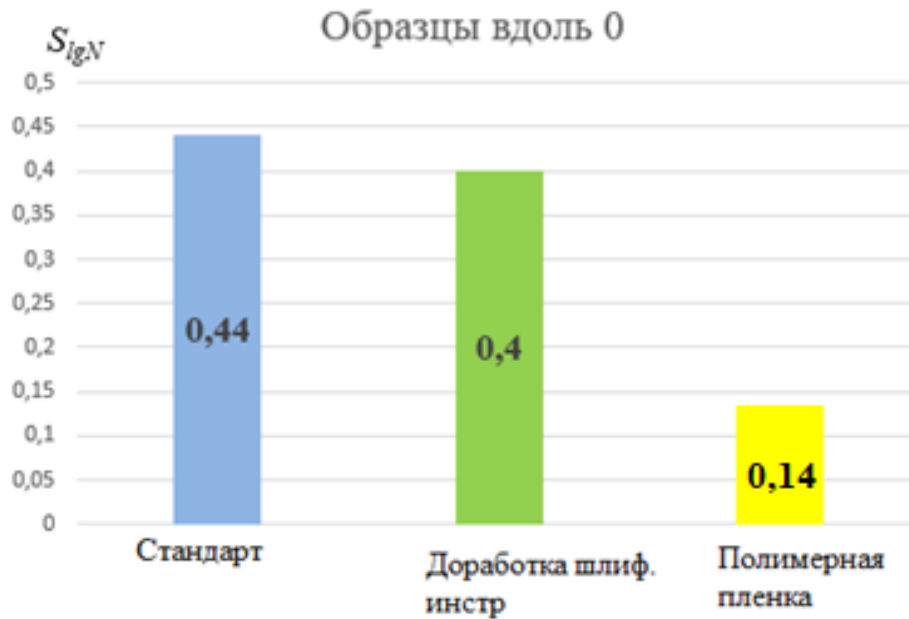


Рисунок 9 – Сравнение полученного рассеяния

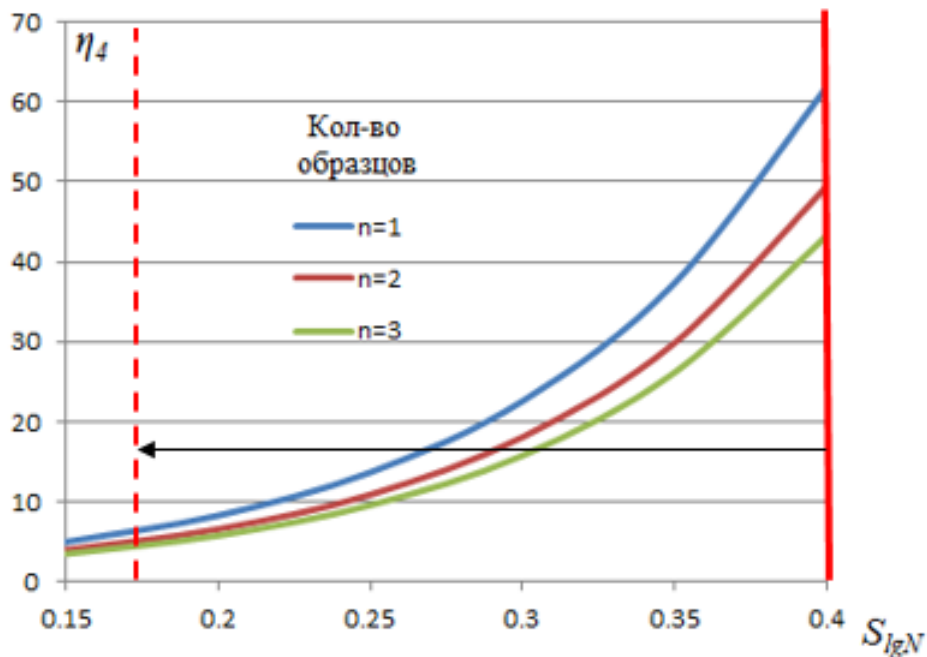


Рисунок 10 – Снижение коэффициента надежности при сверлении отверстий с применением полимерной пленки

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).

В четвертой главе представлены результаты работы по разработке новой редакции методики проведения испытаний для определения степени овализации отверстия. Приводятся результаты конечно элементного моделирования испытаний. Работы выполнялись с целью повышения точности получаемых экспериментальных результатов, упрощения процедуры проведения испытаний. На рисунке 11 представлены старое приспособление для испытаний и получаемые разрушения во вспомогательной пластине, которое вносило существенный вклад в погрешность эксперимента.

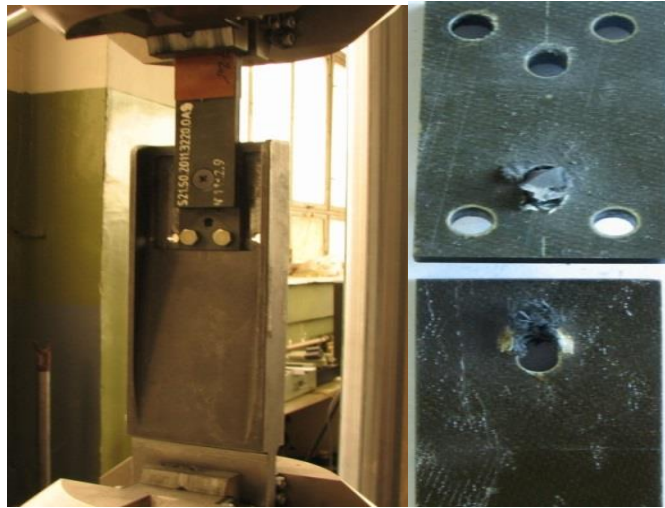


Рисунок 11 – Старое приспособление для испытаний

На рисунке 12 представлен график зависимости овализации от наработки образца в эксперименте, получаемый результат неудовлетворительный, так как из-за большой погрешности фиксировался существенный рост овализации, что не соответствовало реальному состоянию соединения в испытаниях.

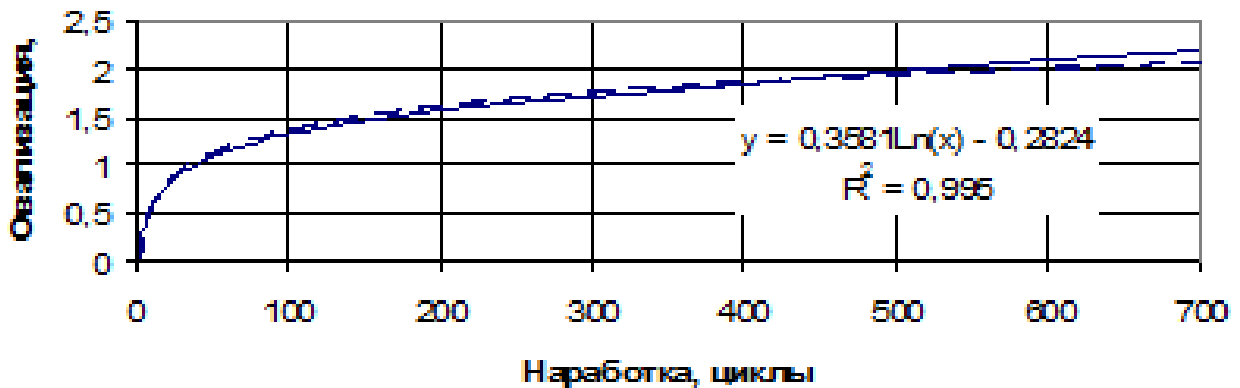


Рисунок 12 – Результат испытаний по старой методике

Несовершенство приспособления для испытания, пластические деформации болта являются, метод фиксации овализации по ходу эксперимента приведены как основные факторы, влияющие на погрешность эксперимента.

Для подтверждения данного предположения было проведено моделирование эксперимента с помощью ПО Abaqus. На рисунке 13 приведена модель образца, на рисунке 14 приведено НДС образца в зоне соединения в процессе испытаний.

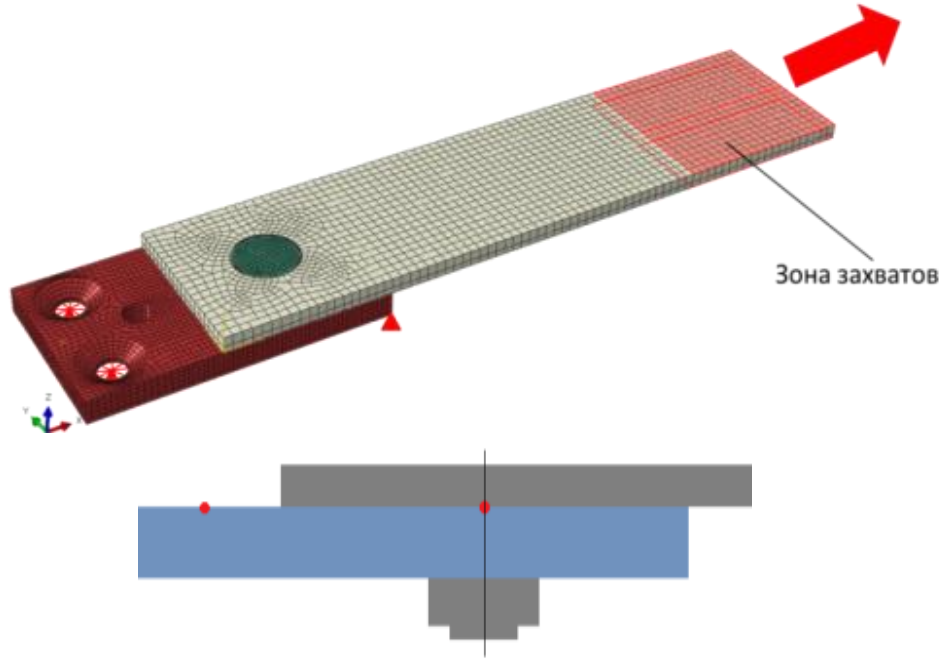


Рисунок 13 – Модель образца в эксперименте и точки фиксации взаимного смещения образца и ответной пластины

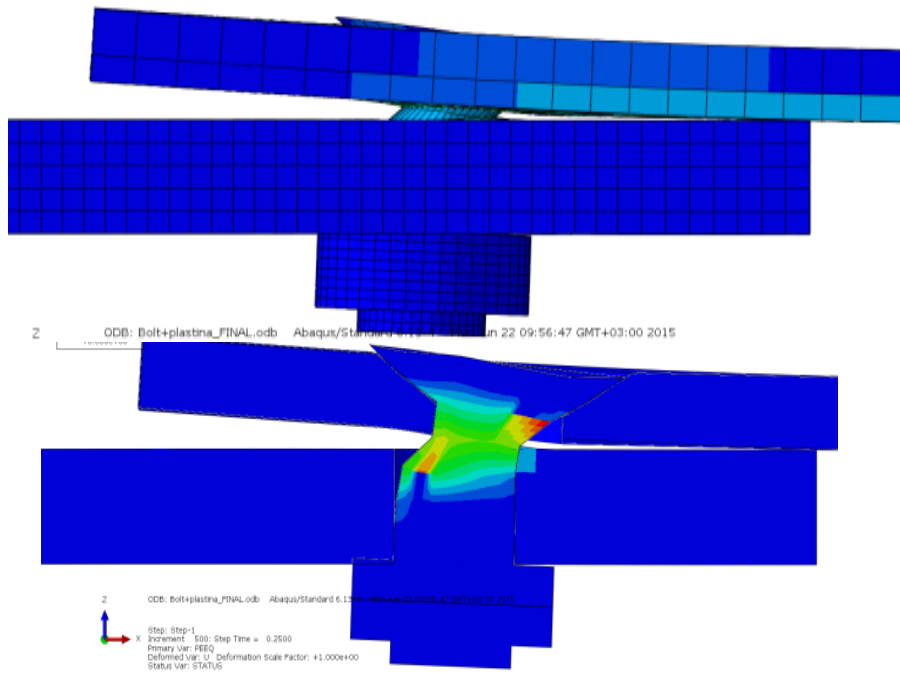


Рисунок 14 – НДС образца в процессе испытаний с демонстрацией пластических деформаций

По результатам расчета были получены график смещения образца представленный на рисунке 15 и результаты получаемой овализации по результатам моделирования (таблица 9).

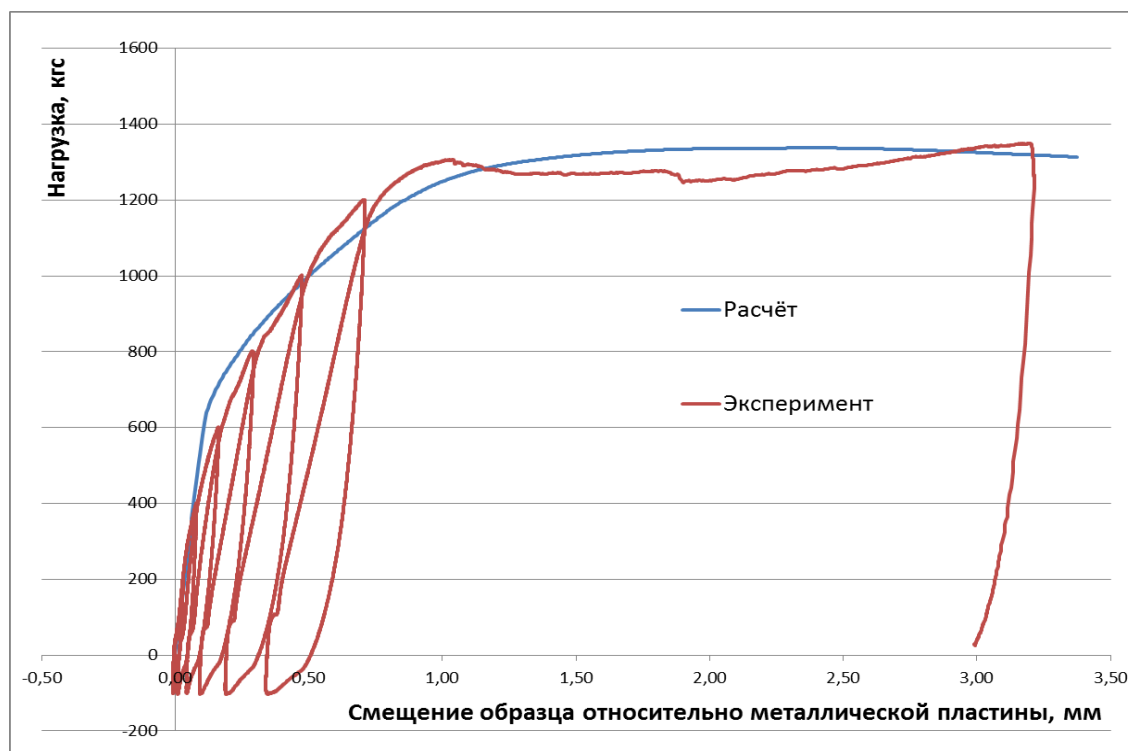


Рисунок 15 – Результат расчета взаимного смещения по сравнению с экспериментом

Таблица 9 – Результаты овализации полученные в эксперименте и расчете

№ цикла	Нагрузка, кгс	Овализация, %		Отклонение
		Расчет	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%

По результатам проведенного анализа методики проведения эксперимента и полученных при моделировании результатов, было разработано новое приспособление, которое позволяет избежать использования ответной пластины, а также минимизировать влияния на результат пластических деформаций болта. На

рисунке 16 представлен эскиз приспособления, а на рисунке 17 образец с новым приспособлением в процессе испытаний.

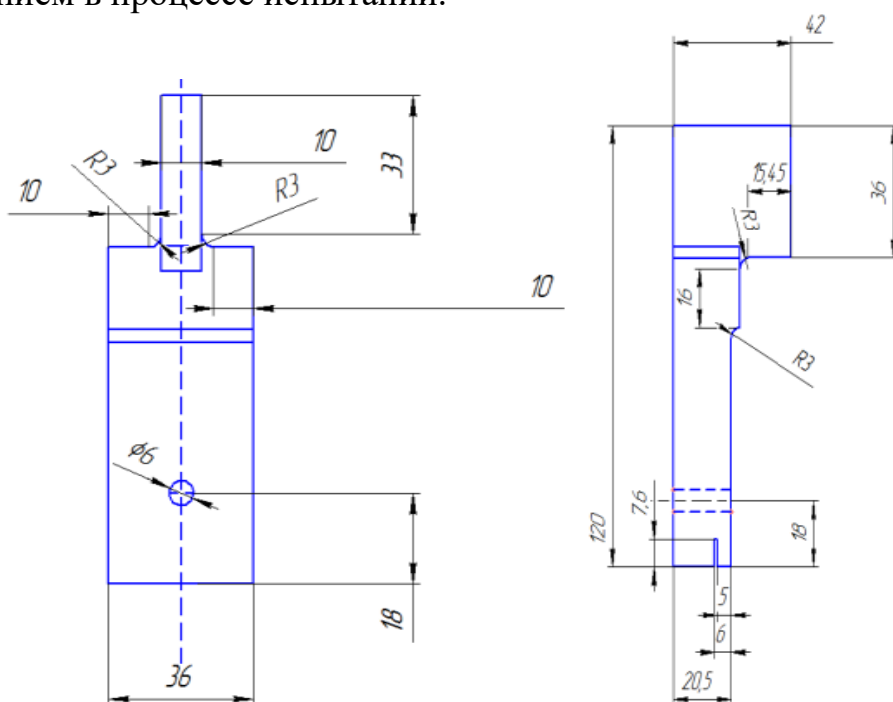


Рисунок 16 – Эскиз нового приспособления и образец с новым приспособлением в процессе проведения эксперимента



Рисунок 17 – Образец с новым приспособлением в процессе проведения эксперимента.

Дополнительно был изменен способ фиксации перемещения образца в процессе испытаний. Ранее использовались данные с испытательной машины, однако погрешность, вносимая конструкцией испытательной машины сопоставима с

фиксируемой величиной. Предложено фиксировать смещение образца экстензометром через 20 000 циклов.

Внесенные коррективы в методику испытаний и выпуск новой ее редакции позволили получить экспериментальные данные, которые отражают реальный процесс деградации отверстия в процессе проведения испытаний, а именно: исключение резкого роста овализации в процессе испытаний, что не подтверждалось разбором образца и замером диаметра отверстия.

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, позволило 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 рассеивание 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах

1. Свиридов А.А. Развитие методов получения механических свойств полимерных композиционных материалов// Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2021. – №37 – С.53-64.
2. Ботвина Л.Р., Нестеренко Г.И., Солдатенков А.П., Демина Ю.А., Свиридов А.А. Исследование особенностей развития малых усталостных трещин в образцах из алюминиевого сплава 2524-T3// Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 7 –С. 39-46.

Другие публикации

3. Борисов М.П., Жаренов И.А., Желонкин С.В., Ковалев Н.И., Свиридов А.А., Фамин К.Ю., Федотов М.А., Щербань К.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния гермофюзеляжа при усталостных испытаниях криволинейных панелей// Прочность конструкций летательных аппаратов. Сборник статей научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов» под редакцией М.Ч. Зиченкова. – Жуковский: ФГУП «ЦАГИ», 2018г. – С. 123-125;
4. Королёва Ю.В., Свиридов А.А., Севастьянов Ф.С. Расчётно-экспериментальное исследование овализации зенкованного отверстия в механическом соединении из ПКМ при статическом и циклическом нагружении// Прочность конструкций летательных аппаратов. Сборник статей научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов» – Жуковский: ФГУП «ЦАГИ», 2017г. – С. 251-255
5. Sviridov A.A., Khlebnikova I.G. Prediction of WFD occurrence in longitudinal joints of a fuselage for commercial airplane// 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences – ICAS-2016, 2016 г. – С. 30-36
6. Konovalov V.V., Sviridov A.A. Small crack in aluminium structures under static and cyclic loading// 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences – ICAS 2014, 2014 г.
7. 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// Сборник Результатов фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения– Москва, 2016 г. – С. 312-323.
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.