

На правах рукописи



СУЛТАНОВА Альбина Руслановна

**Технология обработки отверстий в смешанных пакетах
при сборке крупногабаритных узлов
на модульном оборудовании**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: **Громашев Андрей Геннадьевич**, доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Российской инженерной академии, главный технолог АО «АэроКомпозит» (г. Москва)

Официальные оппоненты: **Вермель Владимир Дмитриевич**
доктор технических наук, заслуженный машиностроитель РФ, начальник научно-технического центра научно-производственного комплекса, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (г. Москва)

Илюшкин Максим Валерьевич
кандидат технических наук, Заместитель генеральный директора по науке АО «Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства» (АО «Ульяновский НИАТ») (г. Ульяновск)

Ведущая организация: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ) (г. Казань)

Защита состоится «23» апреля 2026 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 при ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» и на официальном сайте университета www.istu.edu.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНИТУ; Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Н.В. Вулых; e-mail: vulix2011@yandex.ru, тел.: 8 (3952) 40-51-17.

Автореферат разослан «9» марта 2026 года

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



Н.В. Вулых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие метода модульной сборки авиационных конструкций типа кессон крыла из крупногабаритных деталей и сборочных единиц (ДСЕ) (композитные панели, композитные лонжероны, металлические нервюры и металлические кронштейны) выдвинуло на передний план решение задачи исключения этапа предварительного многопереходного сверления и сборки на технологический крепеж конструкций перед герметизацией топливно-воздушных отсеков за счет повышения эффективности процессов образования окончательных отверстий за один-два перехода в крупногабаритных узлах со смешанными пакетами (СП) с последующей разборкой и возвратным точным позиционированием собираемых ДСЕ с постановкой окончательного крепежа в герметизируемые пакеты. На решение данной задачи направлены разрабатываемые в диссертации методы и технические средства, которые в конечном итоге позволяют обеспечить необходимое качество отверстий и выполнения соединений в СП, а также повышение производительности процессов сборки герметичных топливно-воздушных отсеков и агрегатов на примере кессонов крыла гражданского самолета.

Степень разработанности темы исследования. Проанализировав ряд источников по теме исследования, было выявлено, что процесс обработки отверстий в полимерных композиционных материалах (ПКМ) и их конструктивных сочетаниях с деталями из металлических сплавов изучался многими авторами. Так в работах Криворучко Д.В. рассмотрен ряд методов обработки отверстий в СП, содержащих слои ПКМ, титановые или алюминиевые сплавы. Автор Иванов Ю.Н. в своих работах приводит результаты оптимизации процесса сверления, позволившие установить режимы резания для обработки отверстий девятого качества точности в трехслойном СП, состоящим из двух слоёв титанового сплава и слоя из ПКМ. Автор Чащин Н.С. описывает оптимизацию процесса развёртывания отверстий в СП из углепластика, титановых и алюминиевых сплавов, на основе которой найдены: эффективные режимы резания и рациональные методы охлаждения зоны резания.

В этих и других трудах не рассматривается обработка отверстий с помощью автоматизированных сверлильных машин с ЧПУ при сборке на модульном оборудовании, что имеет влияние на еще один немаловажный параметр – точность геометрического положения рассверливаемого отверстия в собираемых деталях.

Существует ряд способов сборки консолей крыла, описанные в работах Акопян Г. Х., Халилова А. С., Калимуллина Р.Г. Однако эти способы не обеспечивают возвратное точное позиционирования деталей с сохранением точности обработанных отверстий по девятому качеству.

Целью диссертационной работы является обеспечение собираемости герметичных конструкций из крупногабаритных ДСЕ из ПКМ и металлических сплавов при сборке на модульном оборудовании с выполнением механических соединений с образованием отверстий окончательного диаметра с помощью автоматизированной сверлильной машины с ЧПУ.

Достижение этой цели возможно при решении **следующих задач**.

1. Установить взаимосвязь технологических процессов обработки окончательных отверстий за один-два перехода и автоматизированного позиционирования ДСЕ с условием разборки пакета и последующего точного позиционирования собираемых деталей при выполнении сборки крупногабаритных узлов со смешанными пакетами на модульном оборудовании, обеспечивающем необходимое качество изделий и эффективность процесса сборки крупногабаритных узлов.

2. Рассчитать предельные отклонения геометрического положения базовых точек, необходимых для привязки автоматизированной сверлильной машины к конструкции собираемого узла.

3. Рассчитать предельные отклонения геометрического положения обработанных отверстий при разборке пакета собираемого узла и обратном точном позиционировании деталей в сборочное положение.

4. Определить параметры режимов резания при обработке отверстий различного диаметра в смешанных пакетах с различными комбинациями слоев на автоматизированной сверлильной машине.

5. Провести исследования процесса обработки отверстий в крупногабаритном узле на автоматизированном сверлильном оборудовании при модульной сборке.

6. Провести исследования повторяемости положения собираемых деталей и точности отверстий после разборки пакета и обратного точного позиционирования деталей.

Методология и методы исследования. Теоретическая база исследования построена на научных основах технологии машиностроения, теории размерных цепей, математической статистики, теории планирования эксперимента и оптимизации технологических процессов. Данные экспериментальных исследований получены с помощью современных методов измерения. Исследование точности положения отверстий проводилось с помощью лазерного трекера, измерение точности отверстий проводилось с помощью нутромера микрометрического трехточечного, измерение шероховатости отверстий проводилось с помощью контактного и оптического профилометров.

Научная новизна работы

1. Впервые установлена взаимосвязь технологических процессов обработки отверстий в окончательный размер за один-два перехода и автоматизированного позиционирования ДСЕ с требованиями условий разборки пакета и последующего точного позиционирования собираемых деталей при

выполнении сборки крупногабаритных конструкций со смешанными пакетами на модульном оборудовании, обеспечивающем необходимое качество изделий и эффективность процесса получения крупногабаритных сборочных конструкций.

2. Предложена математическая модель привязки автоматизированной сверлильной машины к собираемой конструкции в виде зон с набором базовых точек и разработан метод определения предельных отклонений геометрического положения базовых точек для привязки оборудования к собираемой конструкции при модульной сборке агрегатов.

3. Обоснована возможность определения расчётным путем предельных отклонений геометрического положения окончательно обработанных отверстий при разборке собираемого пакета для обратного точного позиционирования деталей в заданное положение с целью обеспечения собираемости конструкции методом модульной сборки.

4. Определены режимы резания, необходимое количество технологического крепежа, позволяющие выполнять отверстия окончательного размера (диаметра) в смешанных пакетах деталей (ПКМ+металл) за минимальное количество переходов с помощью автоматизированной сверлильной машины с ЧПУ при сборке на модульном оборудовании.

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлена взаимосвязь режимов обработки отверстий с условиями позиционирования инструмента относительно деталей собираемого пакета при сборке с применением автоматизированного модульного оборудования, позволяющая выполнять отверстия в окончательный размер по 9-му качеству с точностью геометрического положения отверстий до 0,5 мм с последующей разборкой и обратным точным позиционированием собираемых деталей смешанного пакета.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Представленные способы и технические средства выполнения технологических процессов сборки и образования точных отверстий окончательного диаметра за минимальное количество переходов в смешанных пакетах в условиях применения модульного сборочного оборудования с ЧПУ легли в основу разработки технологических инструкций и технических рекомендаций для технологического процесса модульной сборки, внедренного при сборке кессонов крыла гражданского самолета.

2. Использование данных технологических инструкций и технических рекомендаций в реальном сборочном производстве обеспечило сокращение цикла и трудоемкости сборки сборочных единиц со смешанными пакетами (детали ПКМ+металл) типа кессон крыла гражданского самолета.

3. Разработан и защищен патентом РФ на изобретение способ модульной сборки стыковой нервюры самолета для соединения консолей крыла с центропланом и устройство для осуществления способа.

4. Разработан и защищен патентом РФ на изобретение способ модульной сборки кессона консоли крыла самолета с деталями из углеродных полимерных материалов и металлов и сборочная линия с устройствами для осуществления способа.

Положения, выносимые на защиту.

1. Технологические рекомендации по процессу сборки крупногабаритных узлов со смешанными пакетами, которые обеспечивают повышение эффективности процесса сборки и качества изделий за счет технологии обработки отверстий, а также точного позиционирования ДСЕ с условием разборки пакета и возвратным точным положением собираемых деталей.

2. Расчет предельных отклонений геометрического положения базовых точек, необходимых для привязки автоматизированной сверлильной машины к собираемой конструкции.

3. Расчет предельных отклонений геометрического положения обработанных отверстий при разборке пакета и обратном точном позиционировании собираемых деталей.

4. Методика исследования процесса обработки отверстий в крупногабаритных узлах на автоматизированном сверлильном оборудовании при модульной сборке.

5. Параметры режимов резания при обработке отверстий различного диаметра в смешанных пакетах деталей из ПКМ и металлов с различными комбинациями слоев.

6. Результаты исследований процесса обработки отверстий в крупногабаритном узле.

7. Параметры зоны для привязки при обработке отверстий с помощью автоматизированного станка с ЧПУ при сборке на модульном оборудовании для достижения точности геометрического положения в собираемом узле обработанного отверстия до 0,5 мм.

8. Результаты исследования повторяемости положения и точности окончательно обработанных отверстий после разборки пакета и обратного точного позиционирования собираемых деталей.

Достоверность подтверждена сходимостью результатов экспериментальных и производственных испытаний. Обоснованность выводов подтверждается опытом практической реализации результатов исследования в производстве. Экспериментальные результаты получены с использованием современного высокоточного аналитического оборудования: лазерного трекера, нутромера микрометрического трехточечного, профилометра.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на X Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (ИРНИТУ, г. Иркутск, 21.05-26.05.2018 г.), на XII Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (ИРНИТУ, г. Иркутск, 27.05-01.06.2019 г.), на XIV Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (ИРНИТУ, г. Иркутск,

21.09-26.09.2020 г.), на Международной конференции «Композитные материалы и конструкции» (МАИ, г. Москва, 10.11.2020 г.), на XV Всероссийской научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (ИРНИТУ, г. Иркутск, 22.12.2020 г.).

Публикации. Результаты работы отражены в 8 публикациях. В журналах из рекомендуемого ВАК Перечня опубликовано 2 статьи; 1 статья - в международном журнале, индексируемом в международной реферативной базе Scopus; получено два патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация имеет введение, четыре глав, заключение, список литературы, насчитывающий 119 источников, и 14 приложений. Работа содержит 18 таблиц и 74 рисунка. Общий объем работы 171 страница.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана краткая характеристика состояния проблемы, обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

В **главе 1** приведены конструктивные особенности крупногабаритных узлов со смешанными пакетами, содержащими композиционные материалы и металлические сплавы. Проведен анализ типовых составов смешанных пакетов и размеров отверстий (рисунок 1). Наиболее типовые конструктивные решения СП крупно габаритных герметичных топливно-воздушных отсеков и агрегатов представлены в таблице 1.

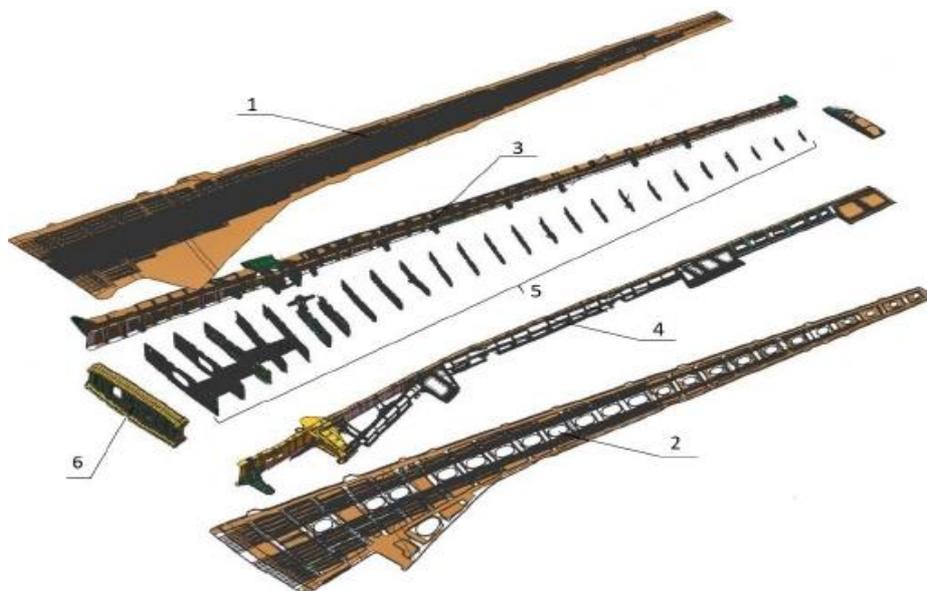


Рисунок 1 – Кессон крыла гражданского самолета:

- 1 – панель верхняя; 2 – панель нижняя; 3 – передний лонжерон;
4 – задний лонжерон; 5 – нервюры; 6 – бортовая нервюра.

Таблица 1 – Типовые составы СП крупно габаритных герметичных топливно-воздушных отсеков и агрегатов

№ п/п	Состав пакета	Место расположения
1	ПКМ+Al	Наиболее часто встречается в местах соединения панелей кессона крыла с нервюрами.
2	Al+ПКМ	Чаще всего это места соединения фитингов с лонжеронами.
3	Al+ПКМ+Al	Типовое соединение элементов каркаса кессона с лонжеронами и каркасом носовой или хвостовой части крыла.
4	ПКМ+Ti	Места соединения панелей кессона крыла с поясами заднего лонжерона
5	Ti+ПКМ	Места соединения накладки с нижней панелью кессона крыла
6	Ti+ПКМ+Ti	Зона стыка консолей крыла и центроплана, а также зона балки траверсы.
7	Ti+ПКМ+Al	Узлы навески пилона на панель кессона крыла.
8	Al+ПКМ+Ti	Место соединения кронштейна под обтекатель балки закрылка, панели и стыкового фитинга.
9	ПКМ+Ti+Al	Места соединения нижней панели кессона крыла, накладки и нервюры
10	Ti+ПКМ+Ti+Al	Места соединения накладки, нижней панели кессона крыла, пояса корневой части лонжерона и фитинга.

ПКМ – композиционный материал с полимерной матрицей; **Ti**– титановый сплав; **Al**– алюминиевый сплав

Рассмотрены методы сборки авиационных конструкций. Рассмотрены особенности технологии обработки отверстий в смешанных пакетах. Проведен анализ технологических процессов по обработке отверстий в смешанных пакетах. Рассмотрены методы исследования качества отверстий при обработке смешанных пакетов и контроля положения отверстий.

Определена цель и поставлены задачи исследования.

Глава 2 посвящена технологии модульной сборки. В ней описан принцип модульной сборки авиационных конструкций и оборудование для его реализации (рисунок 2).

Описана технологическая последовательность обработки отверстий под выполнение механических соединений при сборке на автоматизированном модульном оборудовании.

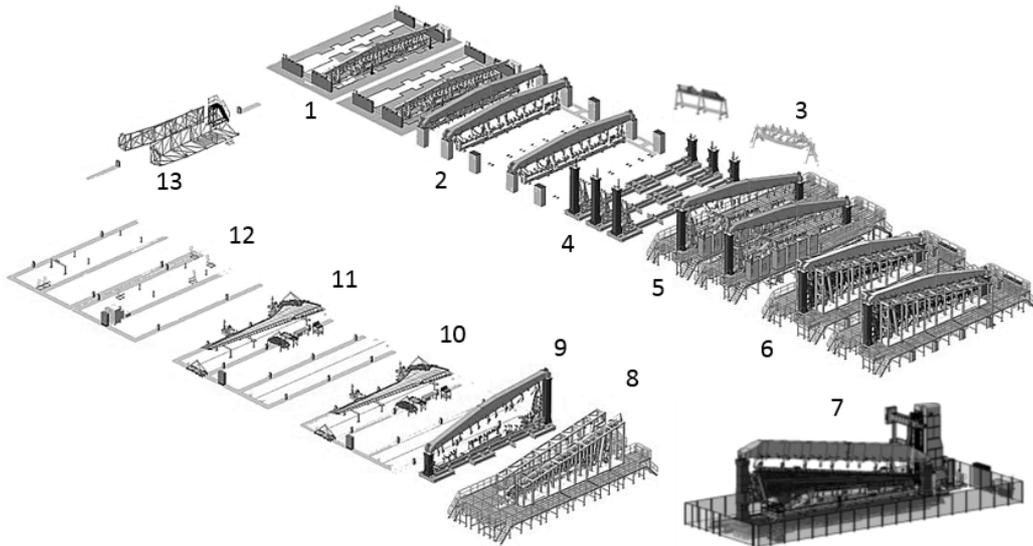


Рисунок 2 – Линия сборки консоли крыла

- 1** – станция сборки заднего лонжерона и ХЧК; **2** – станция сборки переднего лонжерона и НЧК; **3** – станция сборки бортовой нервюры; **4** – участок установки мобильных модулей на мобильную раму; **5** – станция сборки внутреннего каркаса кессона консоли крыла; **6** – станция предварительной установки панелей кессона крыла; **7** – станция автоматического сверления панелей кессона крыла; **8** – станция окончательной установки панелей кессона крыла и выполнения соединений; **9** – участок разборки оснастки и выемки кессона из мобильной рамы; **10** – станция окончательной сборки и монтажа систем в конструкцию консоли крыла; **11** – станция испытания систем и контроля герметичности кессона крыла; **12** – станция контроля геометрии; **13** – участок упаковки и отгрузки.

Приведены расчеты точности геометрических параметров ОЧК, в том числе расчет предельных отклонений геометрического положения базовых точек, необходимых для привязки автоматизированной сверлильной машины и расчет предельных отклонений геометрического положения просверленных отверстий при разборке пакета и обратном точном позиционировании.

Для определения ожидаемой геометрической точности замыкающего звена использовался метод «максимума-минимума»:

$$\Delta_{o_{\Delta}} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \cdot \Delta_{o_i}$$

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \cdot \frac{\delta_i}{2},$$

где $\Delta_{o_{\Delta}}$ – координаты середины поля допуска и δ_{Δ} – половины величины допуска.

В расчетах были учтены допустимые предельные отклонения параметров точности СЧ кессона крыла и элементов стапеля сборки ОЧК.

Исследованы размерные цепи положения базовых отверстий по осям X, Y, Z и их погрешности. Установлено, что предельные отклонения геометрического положения базовых точек (базовых отверстий), необходимых для привязки автоматизированной сверлильной машины, не превышают 1,7 мм, что соответствует рекомендациям для работ на автоматизированной сверлильной машине.

Проведенные автором экспериментальные исследования размерных цепей положения обработанных отверстий при разборке пакета и обратном позиционировании показали, что предельные отклонения по координатам X и Z равны нулю, а предельные отклонения по координате Y равны 0,05 мм.

Глава 3 посвящена методике экспериментального исследования технологии обработки отверстий в крупногабаритном узле со смешанными пакетами при сборке на модульном оборудовании. В данной главе описаны методика и условия проведения эксперимента по подбору режимов резания на образцах, имитирующих типовые смешанные пакеты. Изложены методика и условия проведения эксперимента по исследованию процесса выполнения отверстий в крупногабаритном узле. А также приведена методика и условия проведения эксперимента по исследованию повторяемости положения и точности отверстий после разборки пакета и обратном точном позиционировании.

Для проведения исследований по подбору режимов резания были изготовлены 21 пластина размером 300×210 мм (рисунок 3).

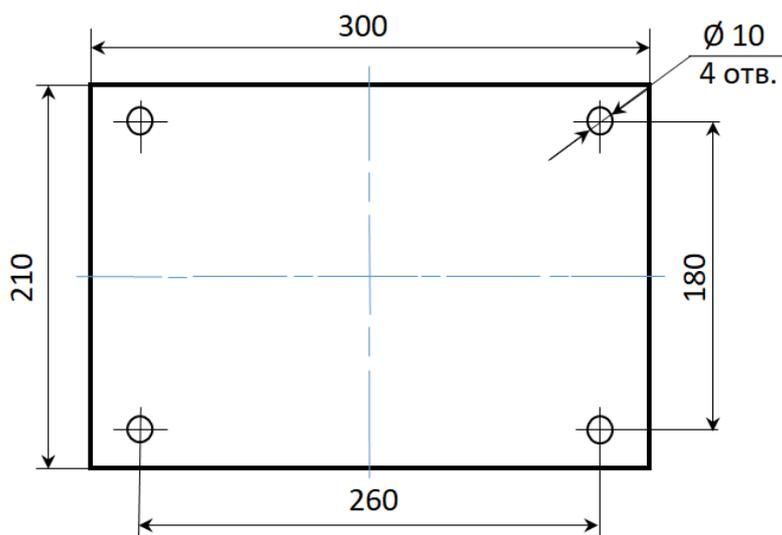


Рисунок 3 – Эскиз пластины

Из пластин было собрано 8 образцов, имитирующих смешанные пакеты кессона крыла. Последовательность слоев в образцах указана в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры образцов для проведения испытаний

№ образца	I слой		II слой		III слой		IV слой	
	Материал	Толщина, мм						
1	ПКМ	17	Al	5	–	–	–	–
2	ПКМ	17	Ti	5	–	–	–	–
3	ПКМ	17	Ti	10	–	–	–	–
4	ПКМ	17	Ti	10	Al	5	–	–
5	Ti	5	ПКМ	17	–	–	–	–
6	Ti	5	ПКМ	17	Ti	10	–	–
7	Ti	5	ПКМ	17	Al	10	–	–
8	Ti	5	ПКМ	17	Ti	10	Al	5

Один из самых сложных пакетов с точки зрения обработки отверстий отображен на рисунке 4.

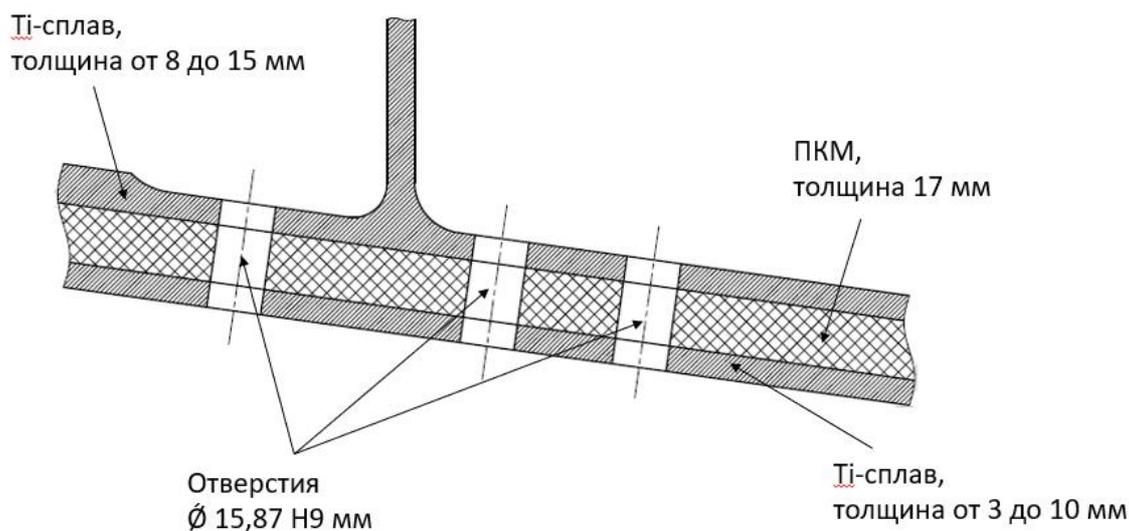


Рисунок 4 – Типовой смешанный пакет в зоне установки балки траверсы

Сверление образцов с целью определения режимов резания осуществлялось на станции сверления линия сборки консоли крыла с помощью автоматизированной сверлильной машины в специальной зоне для сверления образцов (рисунок 5).

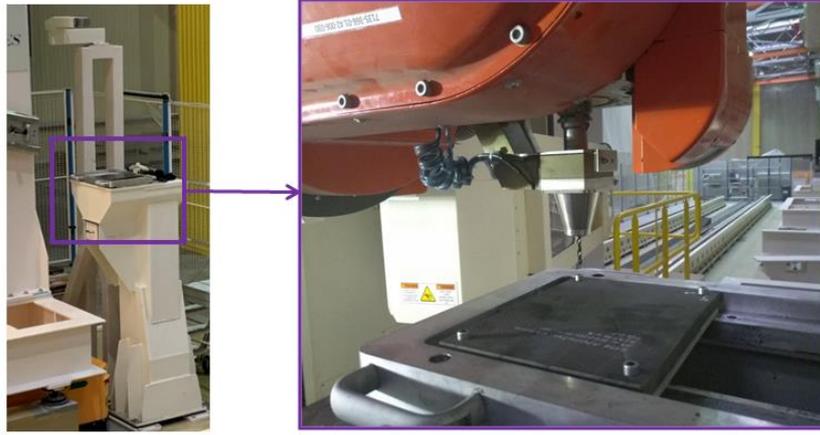


Рисунок 5 – Зона обработки отверстий в образцах

Для исследования технологии обработки отверстий в крупногабаритной конструкции при сборке на модульном оборудовании был собран образец кессона габаритами 17765x3050x438 мм (рисунок 6), имитирующий кессон крыла гражданского самолета – тестовый кессон (рисунок 7).

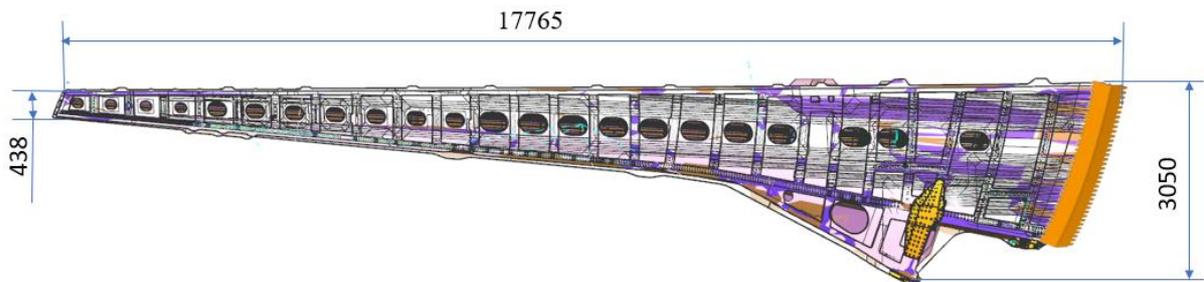


Рисунок 6 – Габариты тестового кессона



Рисунок 7 –Тестовый кессон

Тестовый кессон состоит из НЧК, ХЧК, нервюр (включая бортовую и концевую), а также верхней и нижней панелей ОЧК и был собран в мобильной раме (рисунок 8).

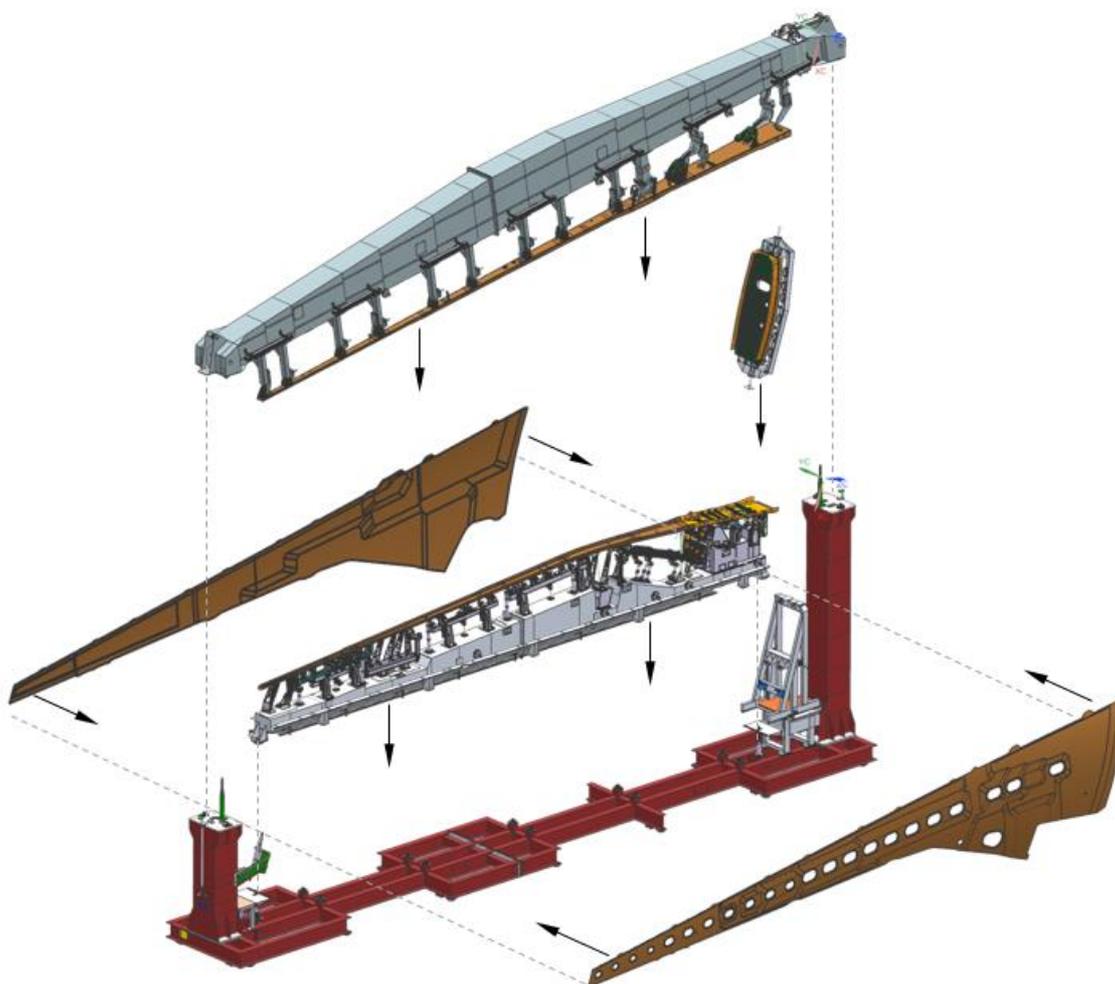


Рисунок 8 – Схема технологии модульной сборки тестового кессона

В деталях каркаса были заблаговременно выполнены отверстия диаметром 3,1 мм, которые при дальнейших операциях сборочного процесса будут играть роль базовых отверстий (базовые точки) и отверстий под установку технологического крепежа.

Для решения задачи плотного сжатия пакета при сборке тестового кессона было проведено исследование по подбору количества технологического крепежа.

Для исследования процесса обработки отверстий в крупногабаритной конструкции с применением режимов, полученных ранее при обработке отверстий в образцах, в тестовом кессоне были определены координаты отверстий соответствующих диаметров в соответствующих пакетах.

Карта обработки отверстий делится на зоны обработки отверстий (рисунок 9), в которые к координатам отверстий для обработки добавляются координаты базовых отверстий для привязки.

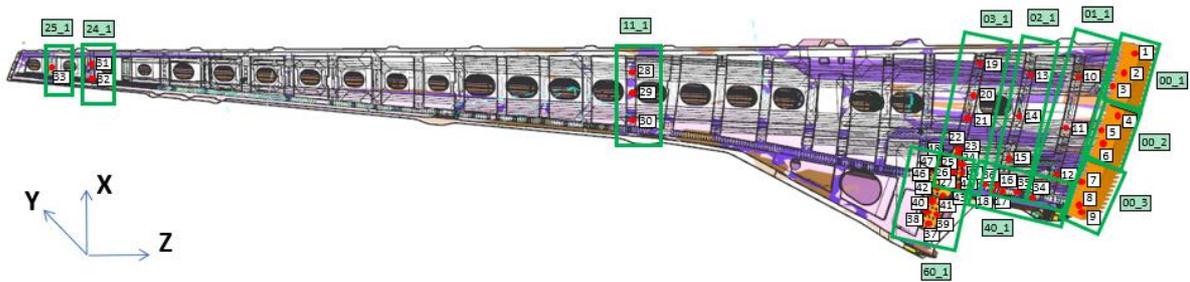


Рисунок 9 – Эскиз зон обработки отверстий в тестовом кессоне

Расположение базовых отверстий, отверстий для установки технологического крепежа, а также отверстий для обработки в типовых зонах изображено на рисунке 11.

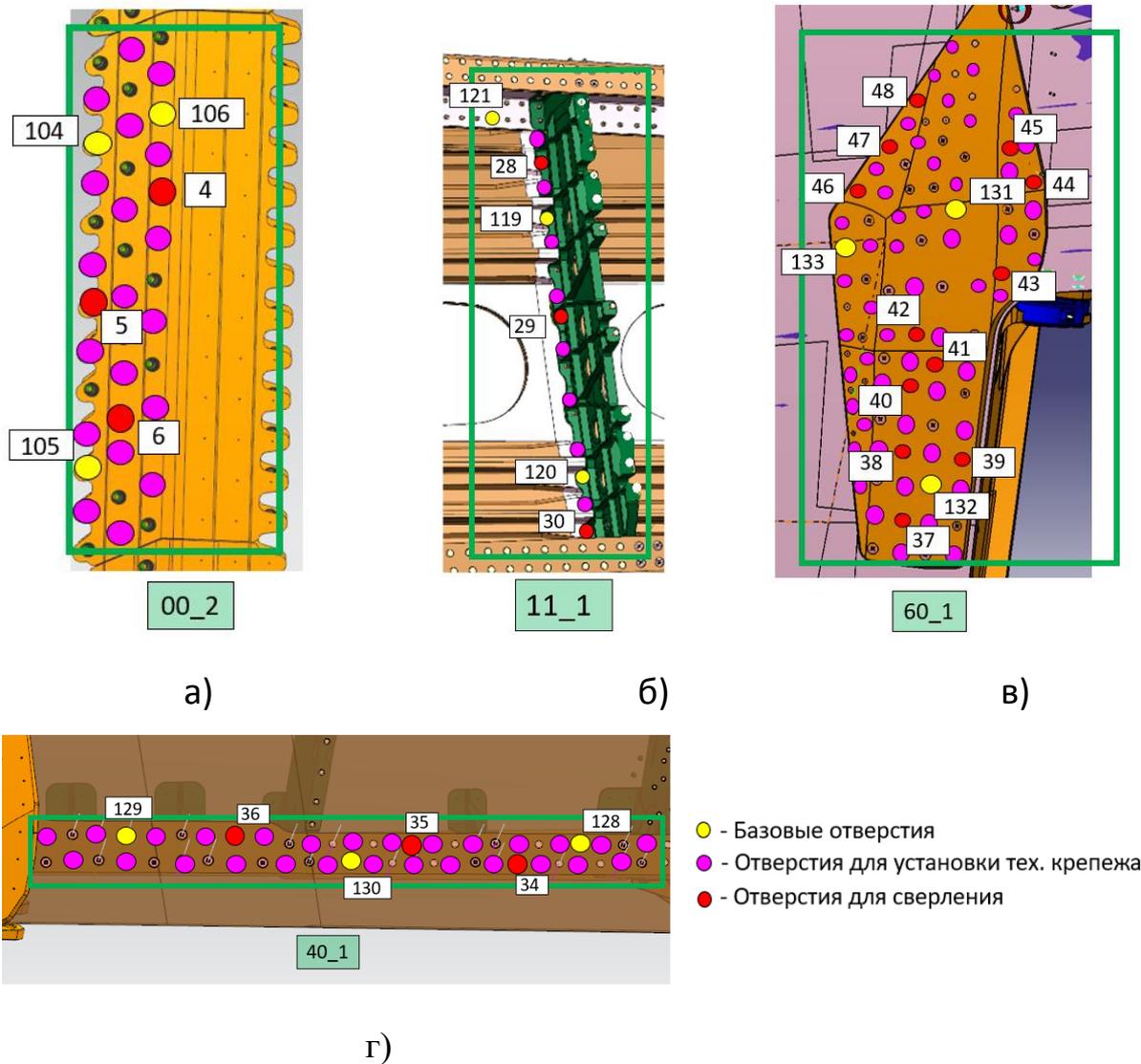


Рисунок 9 – Типовые зоны обработки отверстий в тестовом кессоне.

- а) для нервюр; б) для накладок бортовой нервюры;
- в) для балки траверсы; г) для пояса заднего лонжерона.

При исследовании технологии обработки отверстий в крупногабаритном узле для подбора габаритного размера длины зоны привязки в качестве образцов были взяты нервюры №1, 2 и 3, которые являются длинномерными деталями. Данные нервюры были поделены на подзоны в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 – Деление на зоны длинномерных нервюр

№ Нервюры	Количество зон	Длина зоны, мм
3	1	1 500
2	2	1 200; 1 050
1	3	900; 800;700

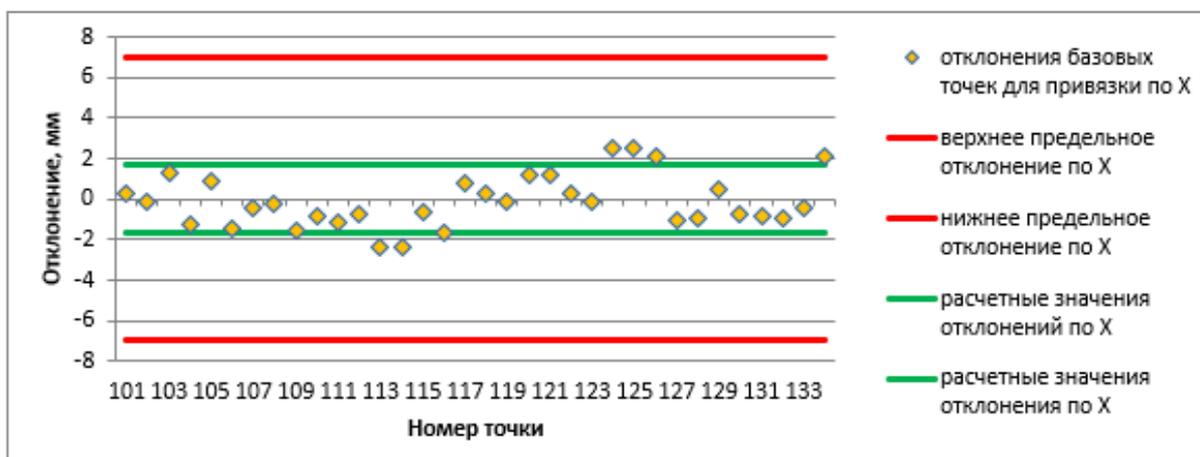
В главе 4 описаны результаты экспериментальных исследований, проведенным по методикам, описанным в третьей главе.

В ходе проведения эксперимента по подбору режимов резания были определены значения следующих параметров: частота вращения, подача, величина выхода сверла из слоя, величина заглубления и вывода на прерывистом цикле сверления, а также процент подачи СОТС.

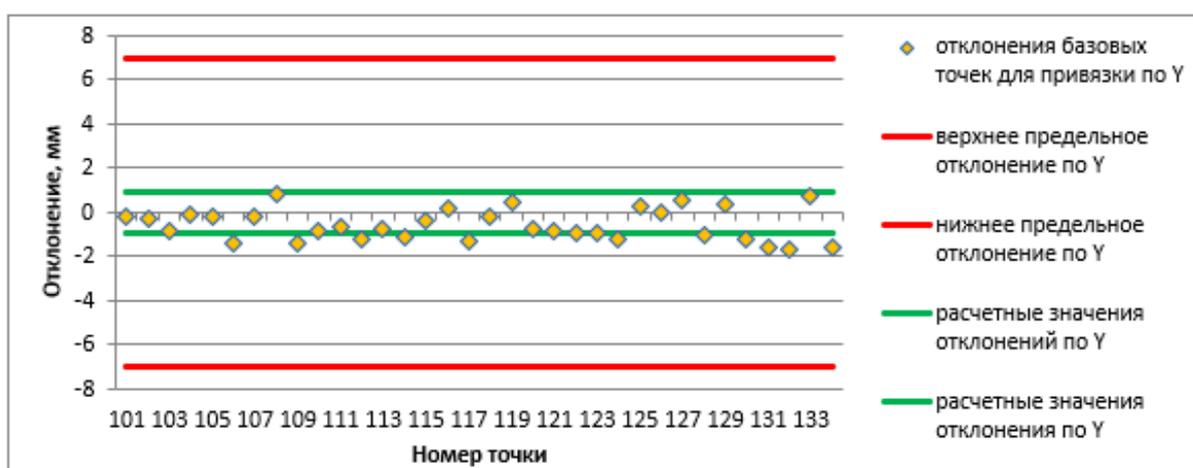
Экспериментальным путем определено, что для обработки отверстий в пакетах ПКМ+Al достаточно одного перехода сверления комбинированным инструментом на автоматизированном сверлильном оборудовании для получения заданной точности. При обработке отверстий в пакетах, где сочетаются композиционный материал и титан для получения заданной точности минимально необходимое количество переходов – два: один – сверление, второй – развертывание.

В ходе проведения исследований по подбору количества технологического крепежа экспериментальным путем определено, что для получения качественных отверстий в смешанных пакетах крупногабаритной конструкции по типу кессон крыла гражданского самолета необходимо устанавливать 50% технологического крепежа.

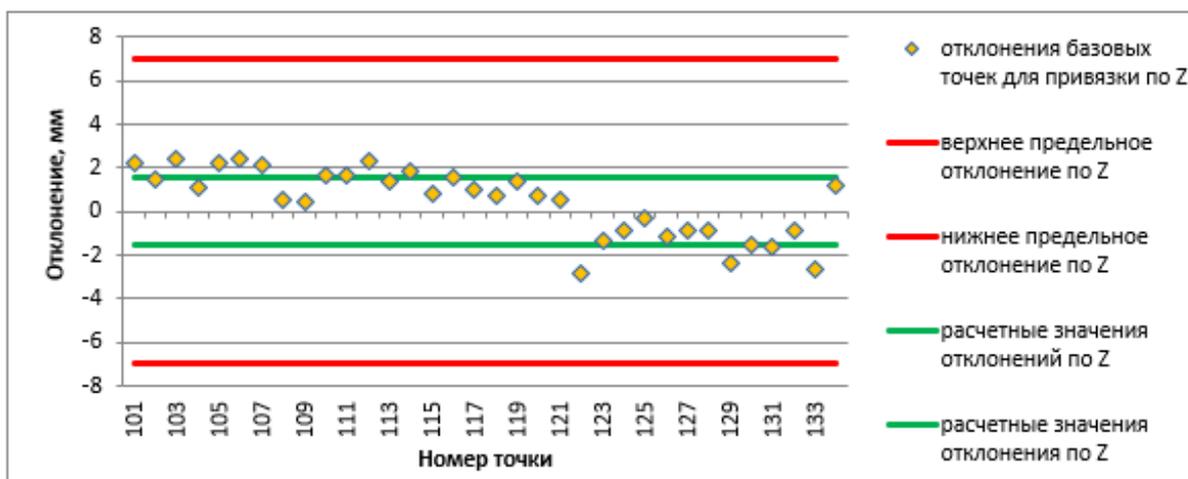
В ходе проведения эксперимента по исследованию процесса обработки отверстий в крупногабаритном узле были определены значения фактических отклонений положения базовых точек для привязки. На рисунке 10 показаны графики фактических отклонений положения базовых точек для привязки по координатам (X, Y, Z).



а)



б)

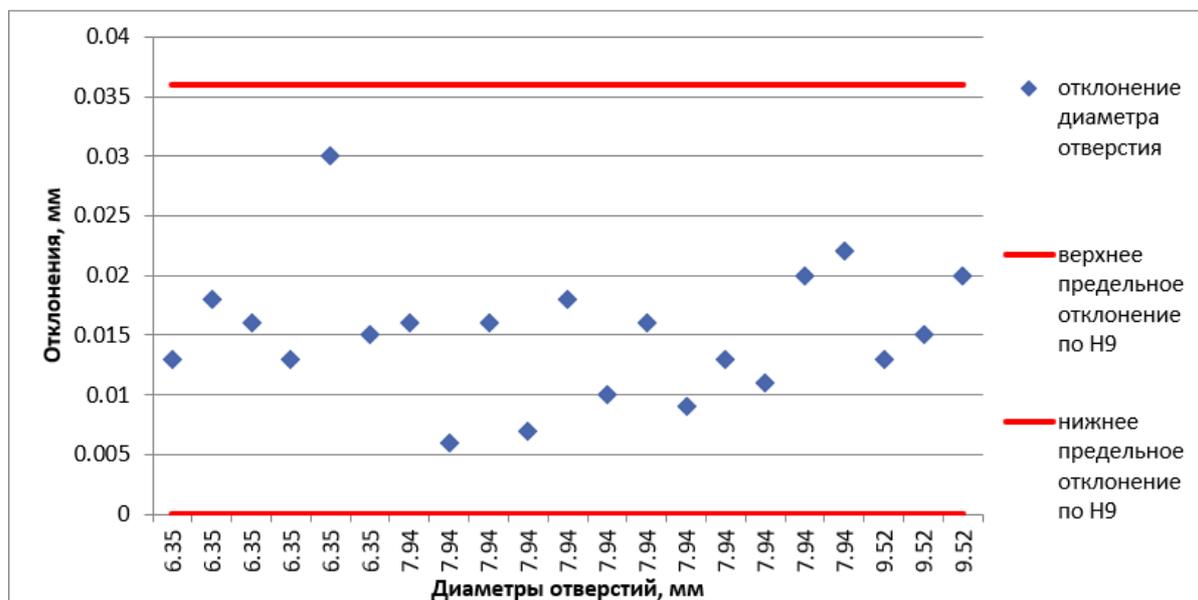


в)

Рисунок 10 – Фактические отклонения базовых точек для привязки: а) – по координате X; б) – по координате Y; в) – по координате Z.

По графикам видно, что значения фактических отклонений больше расчетных. Это связано с тем, что при сборке тестового кессона базовые отверстия для привязки выполнялись по разметке и сверлились вручную. При этом все фактические отклонения находятся в поле допуска.

Были исследованы качество обработанных отверстий, шероховатость и глубина зенковки (рисунки 11, 12, 13).



а)



б)

Рисунок 11 – Максимальные фактические отклонения диаметров в пакете:

а) – для диаметров 6,35; 7,94; 9,52;

б) – для диаметров 11,11; 12,7; 14; 14,29; 15,87

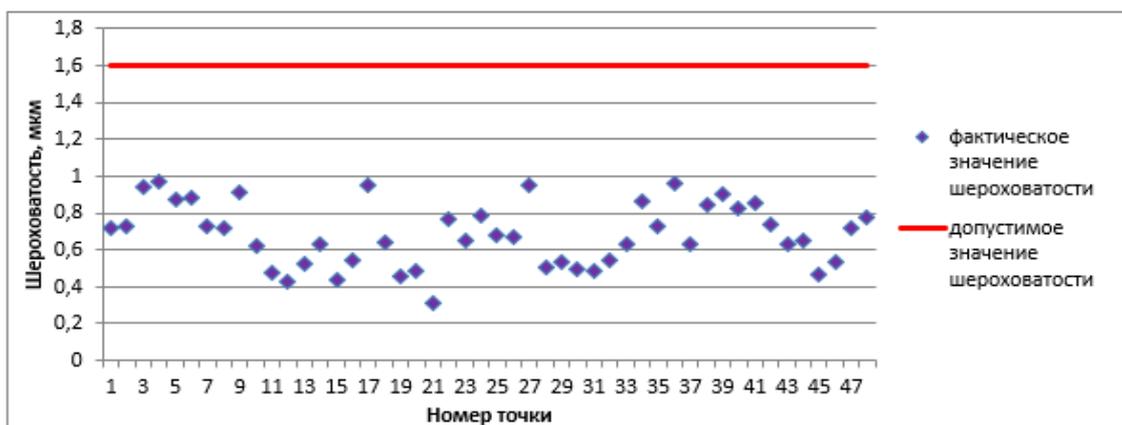


Рисунок 12 – Фактические отклонения шероховатости в металлическом слое

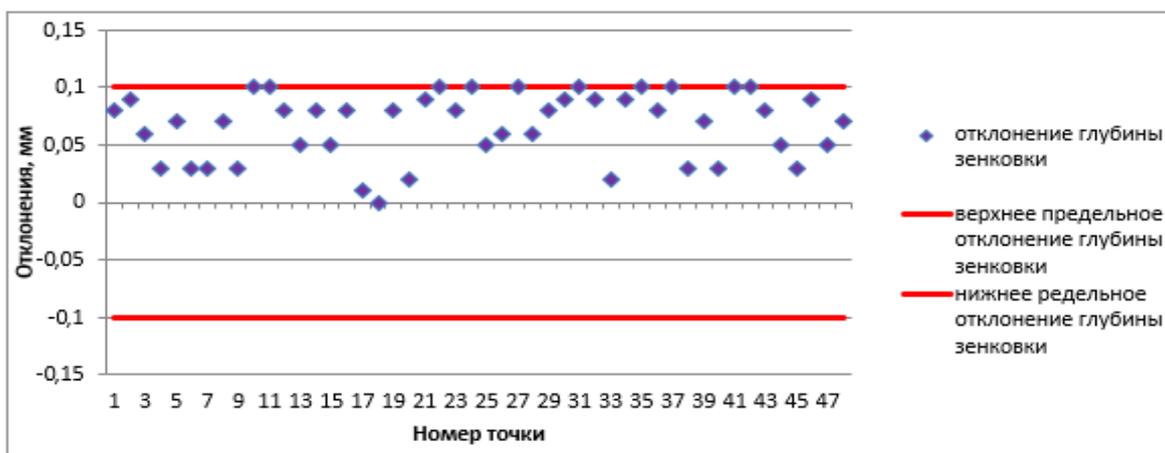


Рисунок 13 – Фактические отклонения глубины зенковки

Для определения отклонений фактического положения обработанного отверстия необходимо произвести замер минимального расстояния от центра отверстия до обреза детали в элементах каркаса (рисунок 14).

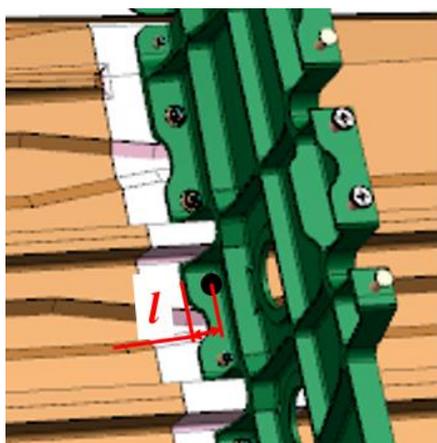


Рисунок 14 – Минимальное расстояние от отверстия до обреза в полке нервюры (l)

Наиболее критичными местами являются полки нервюр и лонжеронов.

На рисунке 15 показаны фактические отклонения положения обработанных отверстий от обрезов деталей каркаса.

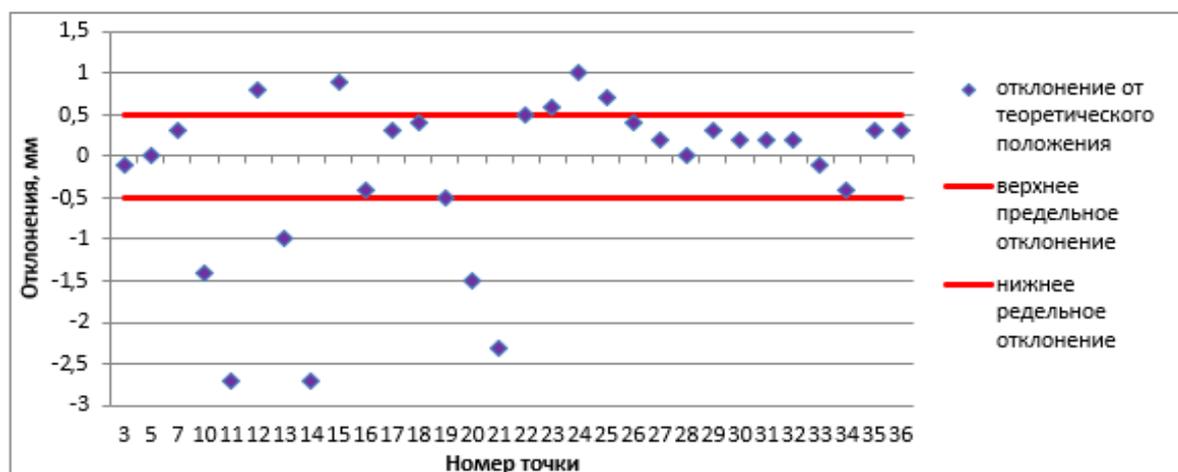
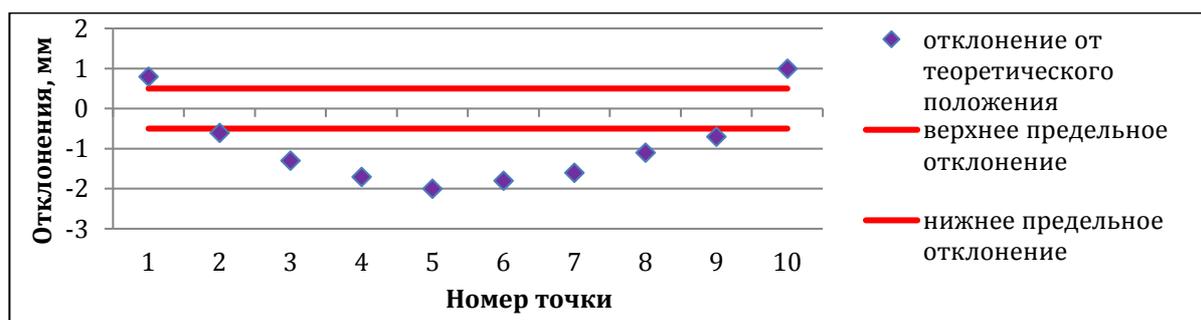


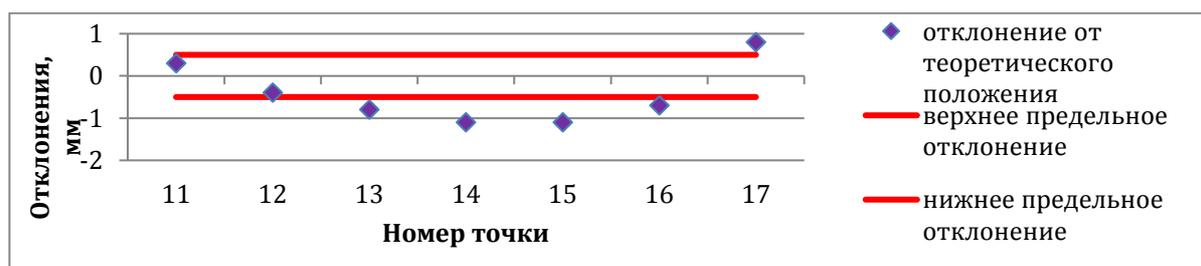
Рисунок 15 – Фактические отклонения положения обработанных отверстий от обрезов деталей каркаса

Проанализировав полученные значения отклонений положения обработанного отверстия от теоретического, можно сделать вывод, что точки № 4-9, 13-15, 17-19 не соответствуют заданным требованиям. Эти точки принадлежат нервюрам 1,2,3. Данные нервюры являются длинномерными деталями, которые могут иметь свои деформации. Соответственно, данные детали дополнительно необходимо делить на подзоны.

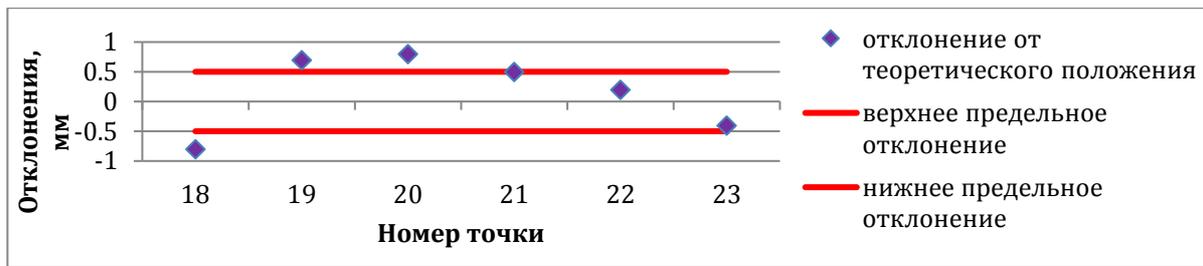
В ходе проведения эксперимента были определены значения отклонений положения обработанных отверстий в каждой зоне исследуемых нервюр. На рисунке 16 показаны фактические отклонения положения обработанных отверстий от обрезка нервюры.



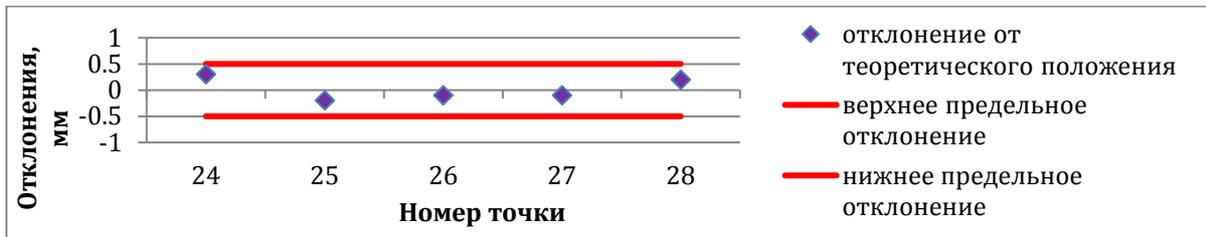
а)



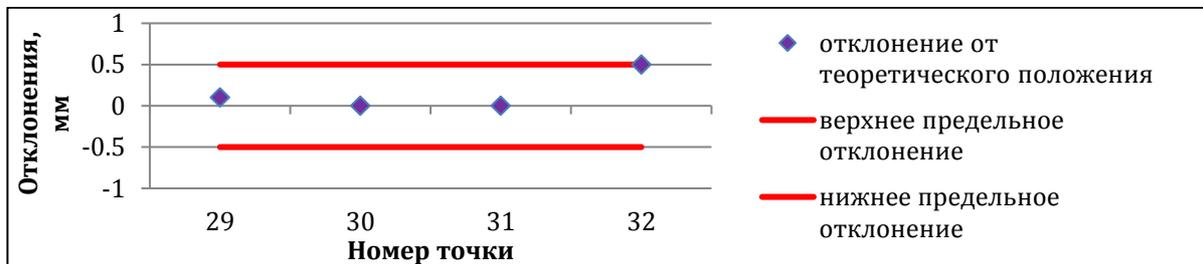
б)



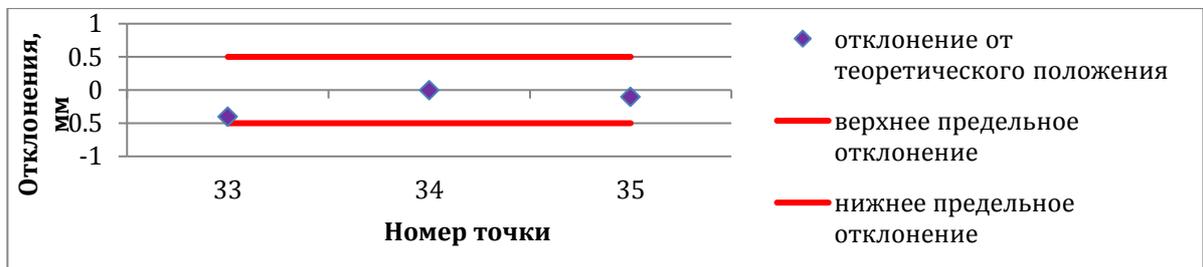
в)



г)



д)



е)

Рисунок 16 – Фактические отклонения положения обработанных отверстий от обреза:

- а) – для зоны длиной 1500 мм; б) – для зоны длиной 1200 мм;
 в) – для зоны длиной 1050 мм; г) – для зоны длиной 900 мм;
 д) – для зоны длиной 800 мм; е) – для зоны длиной 700 мм

Проанализировав полученные результаты можно сделать вывод, что для достижения точности положения отверстия 0,5 мм, длина подзоны не должна превышать 1 м.

Полученные результаты следует применять для следующего цикла обработки отверстий, в котором после перестановки технологического крепежа в обработанные отверстия происходит обработка освободившихся и базовых отверстий в окончательный диаметр.

На основании результатов экспериментальных исследований повторяемости положения и точности отверстий после разборки пакета и обратном точном позиционировании можно сделать вывод, что модульная сборка гарантирует повторяемость положения и точность отверстий после разборки пакета и обратном точном позиционировании.

Полученные результаты позволили разработать директивный технологический процесс сборки крупногабаритных узлов со смешанными пакетами на модульном оборудовании.

Данный технологический процесс внедрен в реальное агрегатно-сборочное производство для сборки и выполнения механических соединений в кессоне крыла гражданского самолета (рисунки 17 и 18).



Рисунок 17 – Консоль крыла перспективного гражданского среднемагистрального самолета в мобильной раме



Рисунок 18 – Процесс обработки отверстий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная для авиационной и машиностроительной отраслей научно-техническая задача, направленная на повышение эффективности процессов образования окончательных отверстий за один-два перехода в крупногабаритных узлах со смешанными пакетами с последующей разборкой и возвратным точным позиционированием собираемых ДСЕ с постановкой окончательного крепежа в герметизируемые пакеты.

В результате исследования получены научные и практические результаты:

1. Произведен расчет предельных отклонений геометрического положения базовых точек, необходимых для привязки автоматизированной сверлильной машины к конструкции собираемого узла.

2. Произведен расчет предельных отклонений геометрического положения обработанных отверстий при разборке пакета собираемого узла и обратном точном позиционировании деталей в сборочное положение.

3. Определены режимы резания, позволяющие выполнять отверстия в смешанных пакетах за минимальное количество переходов.

4. Определено количество технологического крепежа, которое бы обеспечивало плотность сжатия пакета в крупногабаритном узле при обработке отверстий на автоматизированных сверлильных машинах с ЧПУ.

5. На основе экспериментальных исследований установлено, что для обеспечения точности геометрического положения отверстий 0,5 мм длинномерные детали необходимо делить на подзоны длиной не более 1 м.

6. Выявлено, что технология обработки отверстий на автоматизированных сверлильных машинах с ЧПУ позволяет с помощью комбинированного инструмента сверлить отверстия окончательного диаметра за один-два перехода в крупногабаритных узлах со смешанными пакетами по заранее запрограммированному маршруту обработки отверстий, обеспечивая точность диаметра отверстия, а также точность его геометрического положения.

7. Экспериментальные исследования доказывают, что при обработке отверстий в смешанных пакетах на автоматизированном станке с ЧПУ и сборке на модульном оборудовании при соблюдении рекомендованных режимов резания, при установке 50% технологического крепежа, при делении длинномерных деталей на подзоны не более 1 м, при привязке с помощью рототрансляции можно добиться точности отверстия Н9, шероховатости в металлическом слое Ra 1,6 мкм, а также точности геометрического положения отверстий 0,5 мм.

8. Экспериментальные исследования доказывают, что технология сборки на модульном оборудовании позволяет выполнять отверстия в окончательный диаметр с точностью по 9-му качеству с последующей разборкой и обратным точным позиционированием пакета, то есть перед процессом герметизации.

9. Разработанный и внедренный в агрегатно-сборочное производство технологический процесс выполнения механических соединений в пакетах из композиционных и металлических сплавов при сборке на модульном оборудовании обеспечивает повышение эффективности процесса сборки и качества изделий за счет технологии обработки отверстий, а также точного позиционирования ДСЕ с условием разборки пакета и возвратным точным положением.

10. В качестве рекомендаций по дальнейшей разработке темы можно выделить следующие направления:

– использование одних и тех же базовых отверстий для нескольких зон обработки отверстий;

– объединения деталей в одну зону с целью минимизации циклов обработки отверстий.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ, ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ

1. Султанова, А. Р. Исследование качества герметизации конструкций с деталями из полимерных композиционных материалов при сборке и установке крепежа по неотвержденному внутришовному герметику / А. Р. Султанова, А. А. Сафронов, А. Г. Громашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23, № 5(148). – С. 884-894.

2. **Sultanova A. R.** Machining of holes in a large hybrid structure during its assembly using modular equipment/ A. G. Gromashev, **A. R. Sultanova** // *iPolytech Journal*. – 2025. – Vol. 29, No. 4. – P. 438-452.

Статья в международном издании, включенном в международную реферативную базу данных Scopus

3. **Sultanova A. R.** A study of cutting forces when drilling CFRP/Ti stacks / Y. N. Ivanov, N. S. Chashhin, **A. R. Sultanova** // *Journal of Physics: Conference Series, Moscow*, – Moscow, 2021. – P. 012035.

Статьи в других изданиях

4. Султанова, А. Р. Подготовка отверстий в смешанных пакетах для выполнения соединений деталей крыла самолета МС-21 / А. Р. Султанова, А. Г. Громашев // *Авиационная промышленность*. – 2021. – № 1. – С. 30-35.

5. Султанова, А. Р. Модульный принцип сборки авиационных конструкций и оборудование для его реализации / А. Г. Громашев, А. Р. Султанова, Е. В. Масохин // *Авиационная промышленность*. – 2021. – № 3-4. – С. 58-65.

Статьи, входящие в сборники конференций

6. Султанова, А. Р. Сверление отверстий в смешанных пакетах на примере крыла самолета МС-21 / А. Р. Султанова, А. Г. Громашев // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сборник статей XV Всероссийской научно-технической конференции (г. Иркутск, 22 декабря 2020 года). – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – С. 216-223.

Патенты на изобретение

7. Патент № 2749432 С1 Российская Федерация, МПК В64F 5/10, В25В 11/02, В64С 1/26. Способ модульной сборки стыковой нервюры самолета для соединения консолей крыла с центропланом и устройство для осуществления способа: № 2020100086: заявл. 10.01.2020: опубл. 10.06.2021 / А. Г. Громашев, А. И. Гайданский, А. Р. Султанова [и др.]; заявитель Акционерное общество «АэроКомпозит».

8. Патент № 2774870 С1 Российская Федерация, МПК В64F 5/00, В64F 5/10, В23Р 21/00. Способ модульной сборки кессона консоли крыла самолета с деталями из углеродных полимерных композиционных материалов и металлов и сборочная линия с устройствами для осуществления способа: № 2021127387: заявл. 17.09.2021: опубл. 23.06.2022 / А. Г. Громашев, А. И. Гайданский, А. Р. Султанова [и др.]; заявитель Акционерное общество «АэроКомпозит».

Подписано в печать 13.02.2026. Формат 60 x 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 100 экз. Зак.12. Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83