

*На правах рукописи*



**Рыбаулин Артем Григорьевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ С ДИСКРЕТНЫМИ СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ  
ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ**

**Специальность 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов  
и аппаратуры»**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Москва – 2017**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор **Сидоренко Александр Сергеевич**

Официальные оппоненты: **Никонов Валерий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации» (ГосНИИ ГА);

**Хроматов Василий Ефимович**, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Ведущая организация: Акционерное Общество «Государственное машиностроительное конструкторское бюро «Вымпел» имени И.И. Торопова»

Защита состоится «05» апреля 2017 г. В 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, Россия, Москва, Волоколамское ш., 4, МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте [http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=75777](http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=75777)

Автореферат разослан «15» февраля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Федотенков Г. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В конструкциях летательных аппаратов (ЛА) часто применяют соединения с помощью точечной сварки. Точечные сварные соединения образуются путем сваривания материалов деталей между собой в отдельных точках и не требуют никаких вспомогательных элементов. Прочность соединения зависит от свариваемых материалов, толщины свариваемых деталей, концентрации напряжений, жесткости, качества проведения сварки. В авиастроении сваривают главным образом детали из стали, алюминиевых, титановых и жаростойких сплавов. Основным преимуществом точечной сварки по сравнению с клепкой является повышение производительности сборки в 3-5 раз, а также то, что сваривание деталей происходит за счет их собственного материала, благодаря чему вес конструкции не увеличивается. С помощью точечной сварки можно соединять детали с существенно различающимися толщинами металла, а также пакет из нескольких листов.

При изготовлении многих узлов авиационных конструкций используется в основном высокопроизводительная автоматическая сварка. Например, у планера широкофюзеляжного самолета общая длина швов, выполненных автоматической дуговой сваркой, составляет многие сотни метров, а число сварных точек, сделанных сварочными автоматами, достигает нескольких тысяч. Надежность и экономичность сварных соединений обуславливают постоянное повышение объема сварочных работ в авиастроении.

Рост скоростей полета современных ЛА, повышение напряженности их конструкций, сопровождающееся увеличением деформаций, привели к необходимости учитывать не только значения нагрузок и их распределение, но и рассматривать динамический характер нагружения конструкции с учетом усталостной долговечности.

Как правило, сварные соединения являются концентраторами напряжений. Характеристики сопротивления усталости соединений за счет концентрации эксплуатационных напряжений в значительной степени зависят от одновременного дополнительного влияния остаточных напряжений. При действии динамических нагрузок, циклически изменяющиеся напряжения могут приводить к образованию трещин и разрушениям. За счет возможных концентраторов напряжений, сварные соединения наиболее чувствительны к действию вибрации.

Развитие в России вопросов сопротивления усталости при случайных нагрузках связано с именами, В. П. Когаева, С. В. Серенсена, Р. М. Шнейдеровича, В. Л. Райхера. В последнее время исследованием вопросов расчета на усталость авиационных конструкций и различных соединений занимались Г. И. Нестеренко, В. Н. Стебнев, В. Е. Стрижиус, С. В. Бутушин, В. В. Никонов, Ю. М. Фейгенбаум. По вопросам случайных колебаний важно отметить таких авторов как: В. В. Болотин, Яап Вайкер, С. Кренделл, Т. Ирвин.

В результате сравнительных испытаний образцов со сварными и заклепочными соединениями на усталость установлено, что предел выносливости точечных сварных соединений может быть ниже предела выносливости аналогичных заклепочных соединений. Эти свойства объясняются значительно более высокой концентрацией напряжений в сварном соединении, а также уменьшением неослабленного сечения листа, связанного с большим поперечным размером сварной точки по сравнению с заклепкой при равной ширине образца. При циклическом нагружении усталостные трещины возникают между свариваемыми листами на контуре сварной точки. В дальнейшем трещина распространяется по толщине в околошовной зоне и выходит на поверхность листов.

Подобные данные могут быть использованы лишь для предварительной оценки прочностных характеристик сварного соединения в реальных конструкциях, так как они получены в основном для плоских

образцов из листового материала и не позволяют оценить влияние изгибной и крутильной жесткости соединяемых конструктивных элементов на прочностные характеристики соединения. Помимо этого, для получения более обоснованных количественных результатов необходимо учитывать механические характеристики материалов соединяемых деталей, а также характеристики материалов в зоне сварного соединения.

Таким образом, для обоснованной оценки динамического состояния, вибрационной прочности конструкций, прочностных характеристик точечного сварного соединения в реальной конструкции следует проводить дорогостоящие экспериментальные исследования на натуральных или модельных конструкциях.

Наиболее сложной задачей здесь является определение характеристик локального напряженно-деформированного состояния (НДС) в зонах сварных точек, а также учет механических и жесткостных свойств материала в этих зонах. В силу высокой сложности и стоимости экспериментальных исследований с использованием натуральных конструкций или физических моделей наиболее рациональным путем решения этой задачи в настоящее время является использование расчетных моделей.

Исследованиями по оценке характеристик прочности точечной сварки, занимались следующие авторы: Г. А. Николаев, А. Н. Дорофеев, В. С. Муратов, Б. Д. Орлов. Исследования НДС и усталостной долговечности сварных точечных соединений принадлежат в основном зарубежным авторам, среди которых можно отметить П. Сальвини, Сунг Хо-Хан, Ф. Куратани, К. Мацубара.

Наибольшую сложность представляет исследование напряженного состояния в зонах сварных точек при случайных вибрациях, характерных для режимов эксплуатации ЛА. Эффективность использования расчетных методов для исследования реальных конструкций и дальнейшая применимость полученных результатов во многом определяются качеством расчетных моделей, т.е. степенью их адекватности реальным конструкциям и

условиям эксплуатационного нагружения, а также возможностью получения необходимого объема достоверных исходных данных.

Разработка методик численного моделирования динамического напряженно-деформированного состояния тонкостенных авиационных конструкций с дискретными сварными соединениями, оценка вибрационной прочности и усталостной долговечности подобных конструкций на различных этапах проектирования конструкции ЛА имеет достаточно большую **значимость** и является **актуальной** задачей в данное время.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время отсутствуют методики, которые позволяют оценить характеристики динамического НДС и усталостной долговечности тонкостенных конструкций, содержащих дискретные сварные соединения, а также учесть изменение жесткостных и механических характеристик материала в зоне сварного шва.

**Целью** диссертационной работы является разработка и реализация комплексной методики численного моделирования динамического НДС несущей тонкостенной конструкции авиационного изделия в зонах дискретных сварных соединений и оценки усталостной долговечности конструкции при действии случайной эксплуатационной вибрации.

Для достижения поставленной цели, необходимо провести разработку методики моделирования напряженного состояния и оценки долговечности тонкостенной авиационной конструкции, содержащей дискретные сварные соединения на основе метода конечных элементов (МКЭ), модального анализа, статистического моделирования, гипотез линейного суммирования и спектрального суммирования усталостных повреждений. Необходимо провести расчетно-экспериментальные исследования характеристик прочности лабораторных образцов с точечными сварными соединениями.

Разрабатываемая методика должна включать следующие особенности: учитывать изменения механических свойств материала в зоне сварного соединения, локальное динамическое НДС в зонах точечных сварных

соединений при действии случайного нагружения, а также подробно моделировать напряженное состояние в наиболее нагруженных зонах точечного сварного соединения.

Для подтверждения корректности численного моделирования конструкции необходимо проводить сопоставление результатов моделирования динамического состояния с данными измерений процессов виброускорений при лабораторных вибрационных испытаниях реального авиационного изделия.

**Объектом исследования** в диссертационной работе является несущая конструкция авиационного изделия, содержащая дискретные сварные соединения. **Предметом исследования** являются характеристики НДС объекта в зонах нерегулярности напряжений и ресурсные характеристики силовой конструкции авиационного изделия при действии заданных вибрационных нагрузок, соответствующих этапу совместной эксплуатации с самолётом-носителем.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в следующем:

- разработана комплексная методика численного моделирования динамического НДС и оценки характеристик усталостной долговечности конструкций авиационных изделий, имеющих дискретные (точечные) сварные соединения, при случайном пространственном возбуждении;
- разработана новая методика конечно-элементного (КЭ) моделирования сварной точки, позволяющая учитывать изменение механических свойств материала конструкции по сечению локальных зон сварных точек в зависимости от величины его твердости;
- сформированы численные модели конструкции, с использованием твердотельных объемных КЭ, позволяющие определять характеристики составляющих ее напряженного состояния и пространственного локального деформирования в зонах нерегулярностей (соединений, резких изменений сечений);

- проведены экспериментальные исследования статического НДС модельных образцов с точечной сваркой при нагружении на срез и отрыв и получено хорошее соответствие результатов численного моделирования и экспериментальных данным по значениям разрушающих нагрузок;
- выполнена реализация разработанной методики, проведены расчетные исследования и получены новые количественные результаты напряженного состояния конструкции реального изделия, имеющего дискретные сварные соединения, при случайном кинематическом нагружении с заданной спектральной плотностью;
- на основе линейной теории суммирования повреждений и гипотезы спектрального суммирования усталостных повреждений получены оценки долговечности реальной конструкции авиационного изделия со сварными соединениями при случайной эксплуатационной вибрации.

**Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы** заключается в том, что:

- разработанные методики конечно-элементного моделирования тонкостенной авиационной конструкции, содержащей точечные сварные соединения, могут применяться для оценки и прогнозирования усталостной долговечности и вибрационной прочности реальных авиационных конструкций с дискретными сварными соединениями;
- разработанные в рамках исследований методики и расчетные модели могут быть использованы для расчета, проектирования и частичной замены испытаний реальных авиационных конструкций, что направлено на сокращение продолжительности и стоимости разработки изделий;
- результаты исследований, содержащиеся в диссертации, реализованы в АО «МКБ «Искра» для получения оценок параметров вибропрочности конструкций реальных авиационных изделий на различных этапах эксплуатации.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы механики деформируемого твердого тела,



теории усталостного разрушения, теории вероятностей и теории случайных функций. Расчет конструкции проводился с применением метода конечных элементов. Для построения геометрической и конечно-элементной модели (КЭМ) использовался программный комплекс SolidWorks. Для решения задач вибрационной прочности – программный комплекс SolidWorks Simulation. Для построения реализаций случайных процессов, а также для схематизации случайных процессов использовался программный комплекс MatLab. Схематизация случайных процессов проходила с применением метода «дождя». Прочие аналитические вычисления проводились с применением программных комплексов MatLab и Microsoft Excel.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- комплексная методика численного моделирования динамического НДС и оценки усталостной долговечности тонкостенной авиационной конструкции, содержащей точечные сварные соединения;
- методика построения КЭМ сварной точки, учитывающей изменение механических свойств материала в зависимости от величины его твердости в зоне сварного соединения;
- результаты модельных экспериментов по определению разрушающих нагрузок для образцов с точечными сварными соединениями;
- количественные и качественные результаты реализации разработанной комплексной методики для определения НДС и оценки долговечности конструкции реального авиационного изделия.

#### **Степень достоверности и апробация результатов:**

- корректность расчетной методики и достоверность полученных результатов моделирования, подтверждены удовлетворительным соответствием расчетных уровней вибрационных ускорений с данными лабораторных вибрационных испытаний реального изделия;
- для определения зон наибольшей изменяемости и значений напряжений проведено моделирование НДС конструкции при действии квазистатического гравитационного ускорения;

- корректность моделирования сварных точек подтверждена соответствием результатов КЭ моделирования и результатов испытаний модельных образцов с дискретными сварными соединениями при статическом нагружении на отрыв и срез;
- достоверность результатов численного моделирования подтверждена сходимостью результатов вычислений при изменении параметров КЭ моделей.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научных симпозиумах, конференциях и семинарах:

- XIX и XXII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. Ярополец, 18-22 февраля 2013 г.; Вятчи, 15-19 февраля 2016 г.
- Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013, 2014». Москва, 16-18 апреля 2013 г., 22-24 апреля 2014 г.;
- Международный научный семинар «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». Москва, 8-10 декабря 2014 г., 17-19 октября 2016 г.;

Результаты исследований, содержащиеся в диссертации, использованы при проведении ОКР по приоритетным направлениям в АО «МКБ «Искра» для получения оценок параметров вибропрочности конструкций реальных авиационных изделий на различных этапах эксплуатации.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах, в числе которых 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы –

121 страница, включая 74 рисунка и 9 таблиц. Список литературы включает 82 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, описана степень разработанности темы исследования, изложены цели работы, ее научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость. Описаны методология и методы исследования, описана степень достоверности и апробация полученных результатов, кратко изложена структура работы.

**В первой главе** представлен обзор литературы по рассматриваемой в данной диссертационной работе теме. Проведен обзор работ по выбору расчетных моделей для тонкостенных конструкций, имеющих продольное удлинение. Рассмотрены исследования колебаний и вибрационной прочности различных тонкостенных конструкций, в том числе авиационных. Проанализированы исследования по проектированию конструкций, содержащих точечные сварные соединения, а также работы по расчету прочности и сопротивления усталости таких соединений. Рассмотрены работы по исследованию свойств точечных сварных соединений, а также современные методы по моделированию точечной сварки от воздействия различного внешнего нагружения, в том числе случайных нагрузок. На основе проведенного обзора сформулированы основные цели исследований диссертации.

**Во второй главе** представлена комплексная методика моделирования точечного сварного соединения, динамического и напряженного состояний и оценки долговечности тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении с применением метода конечных элементов, статистического моделирования, гипотезы линейного

суммирования и гипотезы спектрального суммирования усталостных повреждений (рис.1).

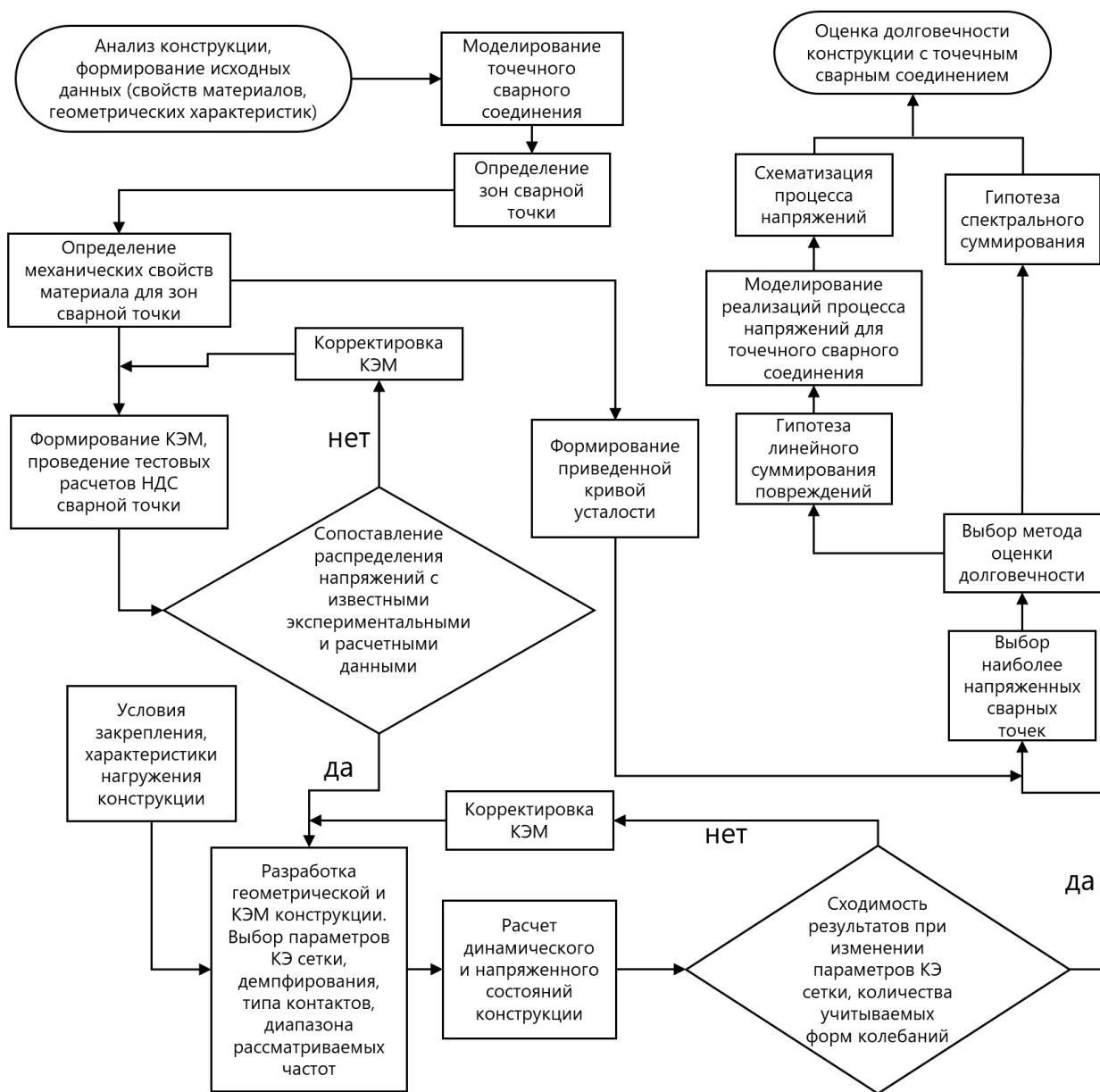


Рис. 1. Структура комплексной методики моделирования

На первом этапе проводится анализ особенностей конструкции и формирование исходных данных для моделирования.

Далее проводится моделирование точечного сварного соединения с определением зон сварной точки, на основе механических характеристик материала и геометрических характеристик свариваемых деталей.

При моделировании сварная точка условно разделяется на несколько зон, в каждой из которых металл имеет различную твердость, а значит и различную прочность. Центральная зона (ядро) – место наибольшего плавления свариваемых металлов. Здесь твердость металла выше, чем в зоне термического влияния или в переходной зоне, находящейся вокруг ядра. В свою очередь, в переходной зоне твердость выше твердости основного материала. В переходной зоне наблюдается резкое изменение твердости и эту зону рекомендуется условно разделить на несколько частей (подзон).

На первом этапе проводится анализ особенностей конструкции и формирование исходных данных для моделирования.

Далее проводится моделирование точечного сварного соединения с определением зон сварной точки, на основе механических характеристик материала и геометрических характеристик свариваемых деталей.

При моделировании сварная точка условно разделяется на несколько зон, в каждой из которых металл имеет различную твердость, а значит и различную прочность. Центральная зона (ядро) – место наибольшего плавления свариваемых металлов. Здесь твердость металла выше, чем в зоне термического влияния или в переходной зоне, находящейся вокруг ядра. В свою очередь, в переходной зоне твердость выше твердости основного материала. В переходной зоне наблюдается резкое изменение твердости и эту зону рекомендуется условно разделить на несколько частей (подзон).

В местах точечного сварного соединения в конструкции, на стыке свариваемых деталей формируются сквозные отверстия необходимого диаметра под сварную точку, с последующим их заполнением несколькими цилиндрическими деталями. Из этих деталей конструируется сварное точечное соединение (рис. 2).

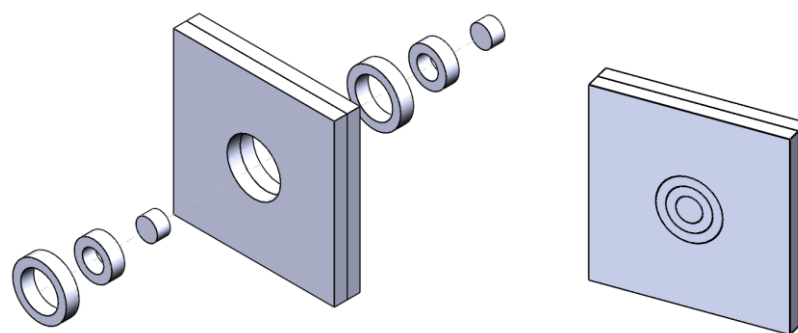


Рис. 2. Разделение точечного сварного соединения на зоны

Геометрические размеры цилиндрических деталей в сварных точках задаются в соответствии с распределением твердости по точечному сварному соединению (рис. 3).

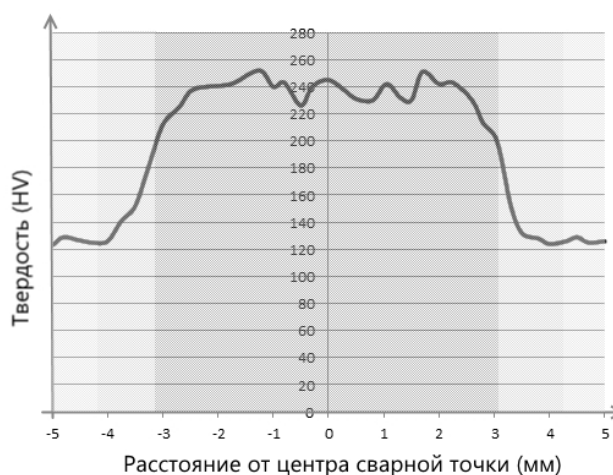


Рис. 3. Распределение твердости в точечном сварном соединении

Механические характеристики деталей точечного сварного соединения определяются по средним значениям распределения твердости по диаметральному участкам сварной точки.

Далее проводится формирование КЭМ и проводятся тестовые расчеты НДС сварной точки с использованием твердотельных КЭ типа SOLID, сопоставляются распределения напряжений с известными экспериментальными и расчетными данными.

На следующем этапе проводится разработка геометрической и конечно-элементной моделей тонкостенной конструкции авиационного

изделия с дискретными (точечными) сварными соединениями на основе исходных данных о материалах, геометрических, жесткостных и массовых характеристиках конструкции, условиях закрепления и нагружения и проводится расчет динамического и напряженного состояний.

Анализ НДС конструкций, содержащих точечные сварные соединения, проводится с использованием программ для КЭ моделирования, позволяющих проводить расчет статической прочности, расчет их собственных форм и частот колебаний, а также динамический анализ при воздействии случайных нагрузок.

Динамический расчет НДС конструкции проводится с применением алгоритмов модального анализа для случайных процессов. В результате динамического расчета определяются спектральные плотности и среднеквадратические значения (СКЗ) эквивалентных напряжений, а также распределения дисперсии напряжений в объеме каждой точки сварного соединения. Оценивается сходимость результатов при различных параметрах КЭ сетки и количестве учитываемых форм колебаний конструкции авиационного изделия.

На основе анализа НДС сварного соединения выделяются узлы КЭМ, соответствующие наиболее напряженным точкам основной конструкции и сварного соединения. Для этих точек на основе полученных спектральных плотностей напряжений и использования алгоритмов статистического моделирования строятся реализации случайных процессов напряжений и далее формируется приведенная кривая усталости. По характеристикам приведенных регулярных циклов напряжений проводится оценка усталостной долговечности конструкции с точечными сварными соединениями с использованием принятой теории накопления усталостных повреждений.

**В третьей главе** представлены результаты реализации методики моделирования динамического и напряженного состояний тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном

нагрузении для конструкции реального авиационного изделия, а также результаты моделирования точечного сварного соединения и их сравнение с результатами проведенных экспериментов.

Для обоснования методики КЭ моделирования точечного сварного соединения проведено экспериментальное определение разрушающих нагрузок для образцов с точечным сварным соединением, которые испытывались на отрыв и срез. КЭ модели образцов формировались с использованием объемных твердотельных элементов типа SOLID (рис. 4). Сварная точка моделировалась в виде двух отдельных полуэллиптических тел, каждое из которых разделено на три зоны. Значения механических характеристик материалов в сварной точке далее пересчитывались по характеристикам исходных материалов на основе данных измерений микротвердости по сечению сварных точек.

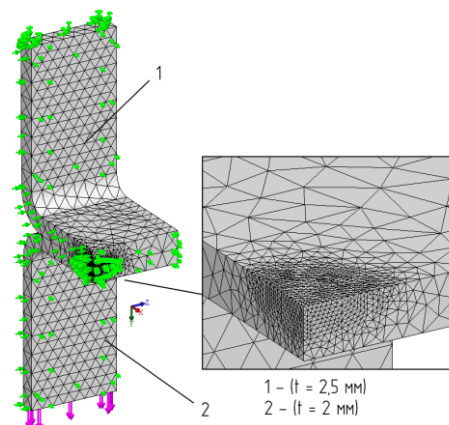


Рис. 4. КЭ модель образца для испытаний на отрыв

Получено хорошее соответствие результатов моделирования дискретного сварного соединения с полученными экспериментальными данными по величинам разрушающих нагрузок.

Проведена оценка характеристик динамического и напряженного состояния несущей конструкции авиационного изделия, содержащей дискретные сварные соединения. Конструкция представляет собой стальную цилиндрическую оболочку, содержащую упругие наполнители в форме цилиндров различной плотности. На оболочке закреплены два узла подвески



изделия к носителю (бугели), через которые передаются случайные кинематические нагрузки. Условия закрепления соответствуют реальному соединению изделия с носителем. На оболочке с помощью точечной сварки закреплены четыре плоскости расположенные крестообразно и симметрично относительно вертикальной плоскости под углом  $\pm 45$  градусов (рис. 5).

Точечное сварное соединение плоскостей с оболочкой выполнено в виде двух однорядных сварных швов (рис. 6). Каждая из плоскостей содержит 24 сварных точки.

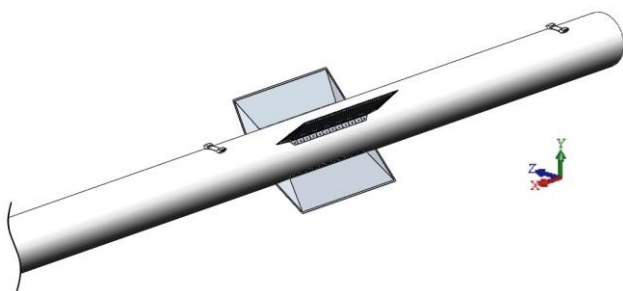


Рис. 5. Модель несущей конструкции



Рис. 6. Точечные сварные швы на плоскости

Каждая сварная точка формируется в виде сочетания трех цилиндрических тел, моделирующих ядро, первую и вторую зоны термического влияния. Механические характеристики для зон сварной точки пересчитываются по распределению твердости по сечению сварной точки (рис. 3).

При моделировании обеспечивается соответствие между КЭМ и реальной конструкцией изделия по условиям закрепления, геометрии, общей массе, положению центра масс и по величине момента массы относительно осей  $X$  и  $Z$ .

После построения расчетной КЭМ, проводится динамический расчет конструкции с применением алгоритмов модального анализа для случайных процессов. Используется модель процесса ускорения узлов подвески, соответствующая реальному эксплуатационному нагружению в диапазоне

частот (0 – 190) Гц. Для тонкостенной авиационной конструкции, содержащей точечные сварные соединения, рассчитывается 60 собственных частот и форм колебаний. Выбранного количества частот достаточно для охвата 90% эффективной модальной массы (ЭММ) от общей массы системы в каждом из трех направлений – X, Y, Z. В результате расчетных исследований определены СКЗ, спектральные плотности и дисперсии эквивалентных напряжений в точечном сварном соединении. Показано, что в силу симметрии условий кинематического нагружения изделия, уровни напряжений для всех плоскостей одинаковы.

Максимальные значения СКЗ напряжений наблюдаются вблизи контура сварной точки в узле 232603 в переходной зоне (вторая зона термического влияния) контакта точечного сварного соединения, то есть практически по периметру сварной точки и составили  $\sigma = 230,7$  МПа. Показана диаграмма распределения СКЗ эквивалентных напряжений по точкам сварного шва (рис. 7). На рис. 8-9 показаны графики распределения СКЗ напряжений по длине сварного шва и по контуру сварной точки.

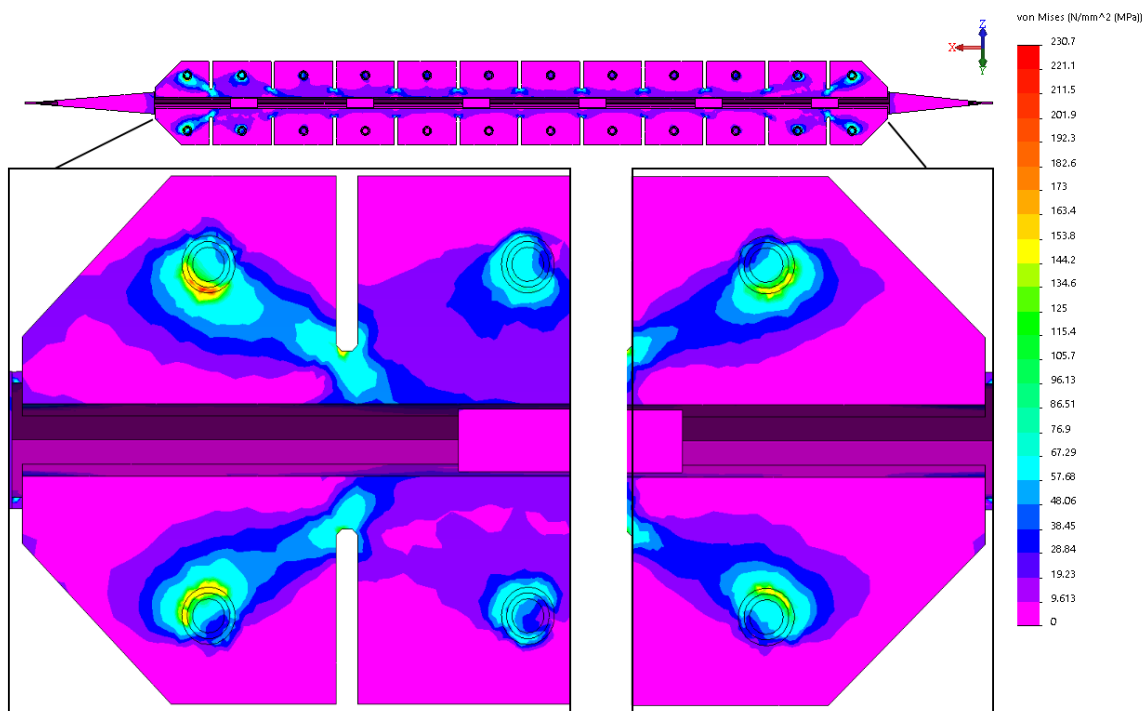


Рис. 7. Распределение СКЗ напряжений по сварному шву на плоскости

Полученный характер распределения динамических напряжений согласуется с результатами проведенного численного моделирования статического НДС образцов с точечными сварными соединениями в условиях статического нагружения.

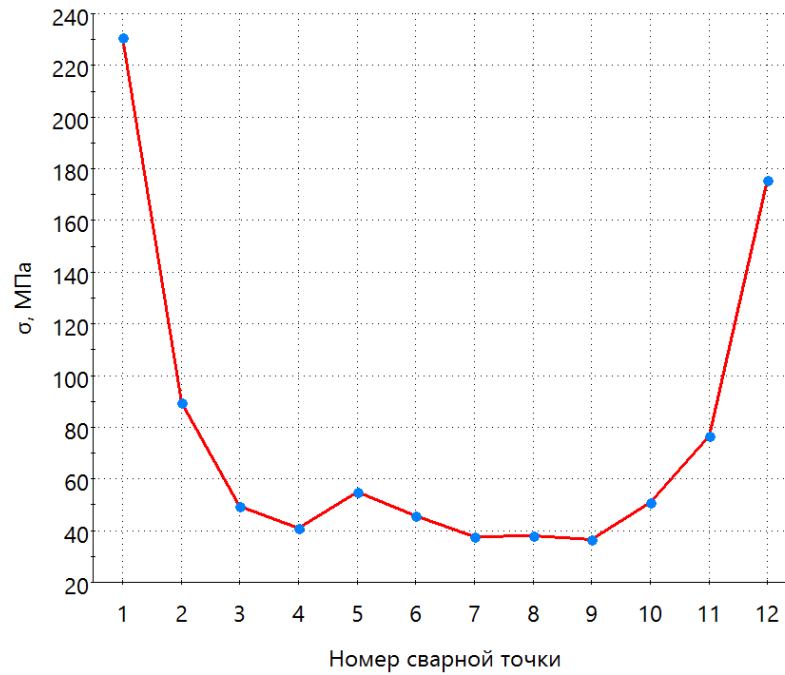


Рис. 8. Распределение СКЗ напряжений по длине сварного шва



Рис. 9. Распределение СКЗ напряжений по контуру сварной точки

Корректность моделирования динамического НДС конструкции подтверждена результатами расчетов для различных вариантов разбивки КЭ сетки и определением зон наибольшей изменяемости напряжений при нагружении конструкции квазистатическим гравитационным ускорением. Получено, что при различных вариантах разбивки сварных точек КЭ сеткой, в зонах наибольшей изменяемости напряжений, величины напряжений различаются на 7-12%.

Результаты КЭ моделирования для случая нагружения квазистатическим гравитационным ускорением показали их хорошее соответствие с результатами динамического анализа по зонам распределения эквивалентных напряжений в модели, в том числе и по зонам распределения напряжений в сварных точках.

Построена приведенная кривая усталости для материала сварной точки. Проведена оценка ресурса рассматриваемой конструкции на основе линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, скорректированной гипотезы суммирования усталостных повреждений, а также гипотезы спектрального суммирования.

Оценки долговечности, полученные по различным теориям, имеют существенные различия. Минимальную оценку дает скорректированная линейная гипотеза суммирования повреждений, а максимальную оценку дает линейная теория суммирования повреждений. Оценка по гипотезе спектрального суммирования дает промежуточные значения между линейной гипотезой суммирования повреждений и скорректированной линейной гипотезой.

**В четвертой главе** проведено сопоставление данных моделирования с результатами лабораторных испытаний авиационного изделия, содержащего точечные сварные соединения. При испытаниях определялись характеристики динамического состояния конструкции при действии случайного стационарного кинематического нагружения.

Конструкция испытуемого изделия состоит из двух отсеков, в виде цилиндрических оболочек, заполненных упругим наполнителем и дополненных габаритно-весовыми макетами передней и хвостовой частей изделия. На переднем по полету отсеке изделия расположено X-образное крыло, плоскости которого закреплены на оболочке с использованием точечных сварных соединений.

Испытания проводились в лабораторных условиях с использованием виброиспытательного комплекса. Изделие соединяется с вибровозбудителем с помощью специального крепежного приспособления. Случайное пространственное кинематическое возбуждение, соответствующее условиям транспортирования изделия на носителе, передается на изделие через узлы подвески.

Для регистрации характеристик вибрации используются датчики ускорения, которые ориентированы в направлении осей X, Y и Z системы координат, связанной с изделием. Режим испытания реализовывался путем формирования спектральной плотности ускорения в узлах подвески с приведенными значениями суммарной дисперсии  $231 \text{ м}^2/\text{с}^4$  и  $469 \text{ м}^2/\text{с}^4$  (СКЗ ускорения  $15,2 \text{ м}/\text{с}^2$  и  $21,7 \text{ м}/\text{с}^2$  соответственно) последовательно в направлении осей X и Y соответственно, в диапазоне 5-300 Гц.

Сопоставление результатов экспериментальных данных с результатами моделирования проводилось для случая возбуждения конструкции по оси Y. В результате испытаний определены уровни составляющих вибрационного ускорения в направлениях осей X, Y и Z, в различных точках конструкции изделия. Определены зоны наибольших уровней ускорения. Получено, что при возбуждении колебаний в направлениях осей X и Y возникают существенные составляющие колебаний в направлении оси Z.

Моделирование динамического состояния изделия при случайном кинематическом нагружении проводилось в среде программного комплекса SolidWorks. Расчетная модель конструкции изделия, совместно крепежным приспособлением для вибрационных испытаний, используемая для

сравнения результатов расчета с экспериментальными данными представлена на рис. 10.

В результате моделирования получены спектральные плотности ускорений в местах расположения датчиков, а также распределение СКЗ составляющих вибрационных ускорений по осям X и Y. Получено удовлетворительное соответствие результатов численного моделирования и экспериментальных данных по уровням вибрационных ускорений с расхождением составляющим 12% по контрольному датчику (датчик №1). Это подтверждает корректность разработанной методики моделирования динамического состояния, которая позволяет получать адекватные оценки интегральных уровней вибрационного ускорения для конструкций данного типа при широкополосном случайном нагружении.

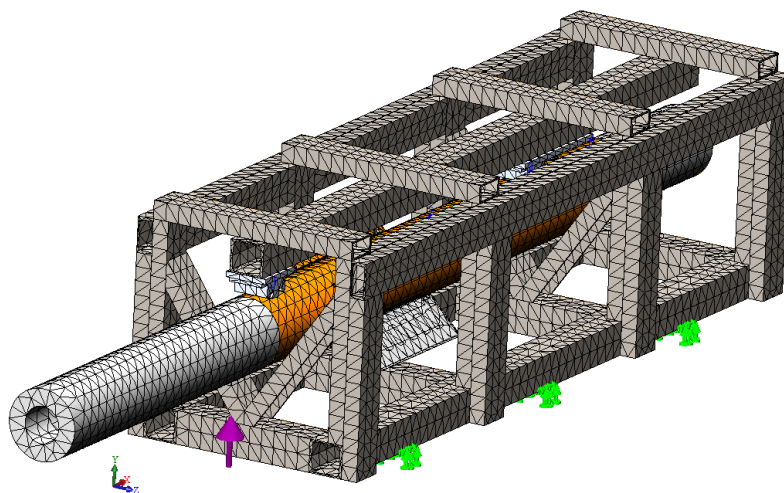


Рис. 10. Расчетная модель конструкции изделия и крепежного приспособления

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана комплексная методика численного моделирования динамического НДС и оценки характеристик усталостной долговечности конструкций авиационных изделий, содержащих дискретные (точечные) сварные соединения, при случайном пространственном возбуждении, позволяющая повысить качество и обоснованность получаемых количественных результатов.

2. Разработана новая методика КЭ моделирования сварной точки, позволяющая учитывать изменение механических свойств материала конструкции по сечению локальных зон сварных точек в зависимости от величины его твердости и обоснована корректность моделирования НДС для различных вариантов разбивки КЭ сетки точечного сварного соединения. На основе проведенных экспериментальных исследований по статическому нагружению образцов с дискретными сварными соединениями и результатах численного моделирования статического НДС сварной точки обоснован выбор наиболее напряженного узла КЭМ точечного сварного соединения.

3. Сформированы численные модели конструкции, позволяющие определять характеристики составляющих ее напряженного состояния и пространственного локального деформирования в зонах нерегулярностей и предложены процедуры оценки характеристик долговечности конструкций авиационных изделий, имеющих дискретные сварные соединения, при случайном возбуждении на основе различных теорий накопления усталостных повреждений.

4. Выполнена реализация разработанной методики, проведены расчетные исследования и получены новые количественные результаты напряженного состояния конструкции реального изделия, имеющего дискретные сварные соединения, при случайном кинематическом нагружении. с заданной спектральной плотностью. Выявлены зоны концентрации напряжений в дискретных сварных соединениях, получены распределения СКЗ эквивалентных напряжений по сварному шву, определены уровни максимальных напряжений в наиболее нагруженной сварной точке. Показано, что наибольшие значения напряжений наблюдаются в переходной зоне контакта точечного сварного соединения.

5. На основе алгоритмов статистического моделирования построены временные реализации напряжений в наиболее нагруженной сварной точке конструкции и построены кривые удельной повторяемости амплитуд приведенных регулярных циклов напряжений.

6. На основе линейной теории суммирования повреждений и гипотезы спектрального суммирования усталостных повреждений получены оценки долговечности конструкции авиационного изделия со сварными соединениями при случайной эксплуатационной вибрации. Показано, что минимальную оценку дает скорректированная линейная теория, максимальную – гипотеза спектрального суммирования.

7. Для подтверждения корректности разработанной методики моделирования динамического состояния проведено сопоставление данных моделирования динамического состояния конструкции с результатами лабораторных вибрационных испытаний реального изделия и получено удовлетворительное их соответствие по уровням вибрационных ускорений.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Публикации в научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:**

1. Рыбаулин А. Г. Напряженное состояние конструкции авиационного изделия с дискретными сварными соединениями при случайном кинематическом нагружении / А. Г. Рыбаулин, А. С. Сидоренко // Вестник МАИ. – 2013. – Т. 20. – № 1. – С. 183-193.
2. Рыбаулин А. Г. Исследование локального напряженного состояния и оценка долговечности конструкции авиационного изделия с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении / А. Г. Рыбаулин, А. С. Сидоренко // Труды МАИ. – 2015. – Вып. 79. – 27 с.
3. Рыбаулин, А. Г. Напряженное состояние и ресурс конструкции с дискретными сварными соединениями при стационарных случайных колебаниях / А. Г. Рыбаулин, А. С. Сидоренко // Вестник МАИ. – 2016. – Т. 23. – № 2. – С. 125-137.
4. Рыбаулин А. Г. Моделирование напряженного состояния и оценка долговечности точечного сварного соединения при случайной вибрации / А. Г. Рыбаулин, А. С. Сидоренко // Вестник Машиностроения. – 2016. – № 10. С. 31-36.



### Публикации в прочих изданиях:

5. Макаревский Д. И. О несущей способности сварных точек. / Д. И. Макаревский, И. У. Выshedкевич, Г. Д. Будник, М. О. Коротков, А. Г. Рыбаулин // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. – М.: ООО "ТР-принт". – 2013. – т. 2. – С. 30-32.
6. Рыбаулин А. Г. Моделирование динамического напряженного состояния конструкции авиационного изделия с точечными сварными соединениями / А. Г. Рыбаулин // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». 16-18 апреля 2013 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». – 2013. – С. 74-75.
7. Рыбаулин А. Г. Случайная вибрация элемента тонкостенной конструкции с дискретными сварными соединениями / А. Г. Рыбаулин // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014». 22-24 апреля 2014 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». – 2014. – С. 57-58.
8. Рыбаулин А. Г. Динамическое напряженное состояние точечного сварного соединения при случайной вибрации / А. Г. Рыбаулин, А. С. Сидоренко // Тезисы докладов Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». – М: МАИ. – 2014. – С. 74-75.
9. Будник Г.Д. Экспериментальное исследование вибродинамического состояния авиационного изделия со сварными соединениями / Г. Д. Будник, И. У. Выshedкевич, Д. И. Макаревский, А. Г. Рыбаулин, А. С. Сидоренко // Материалы XXII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и

сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. – М.: ООО "ТР-принт". – 2016. – Т. 1. – С. 57-59.

10. Васильев С. В. Разработка рациональной конструкции крепежного приспособления для вибрационных испытаний авиационного изделия / С. В. Васильев, И. У. Вышедкевич, Д. И. Макаревский, А. Г. Рыбаулин, А. С. Сидоренко // Материалы XXII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. – М.: ООО "ТР-принт". – 2016. – Т. 2. – С. 40-42.
11. Рыбаулин А. Г. Оценка усталостной долговечности тонкостенной конструкции в зоне точечного сварного соединения / А. Г. Рыбаулин, А. С. Сидоренко // Тезисы докладов V Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». – М.: ООО "ТР-принт". – 2016. – С. 160-161.