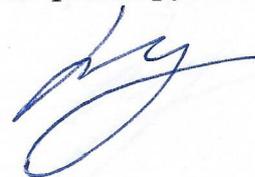


Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д. т. н., профессор

Сидоренко Александр Сергеевич

Москва - 2016

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Обзор литературы	13
Глава 2. Методика моделирования динамического и напряженного состояний и оценки долговечности тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении	26
2.1. Моделирование точечного сварного соединения	28
2.2. Моделирование динамического НДС авиационной конструкции	34
2.3. Оценка усталостной долговечности точечного сварного соединения ...	39
2.3.1. Оценка ресурса точечного сварного соединения по линейной гипотезе суммирования повреждений	41
2.3.2. Оценка ресурса точечного сварного соединения на основе гипотезы спектрального суммирования	49
Глава 3. Реализация методики моделирования динамического и напряженного состояний тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении	54
3.1. Моделирование точечного сварного соединения в сравнении с экспериментом	55
3.2. Моделирование конструкции авиационного изделия с точечными сварными соединениями	63
3.3. Моделирование динамического НДС тонкостенной авиационной конструкции с дискретными сварными соединениями	71
3.3.1. Проверка корректности моделирования	85
3.4. Оценка усталостной долговечности точечного сварного соединения в тонкостенной авиационной конструкции	89
3.4.1. Построение приведенной кривой усталости для материала сварной точки	90
3.4.2. Оценка ресурса точечного сварного соединения по линейной гипотезе суммирования повреждений	92

3.4.3. Оценка ресурса точечного сварного соединения по гипотезе спектрального суммирования	98
Глава 4. Сопоставление данных моделирования с результатами испытаний	102
Заключение.....	111
Список литературы.....	113

Введение

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 [1].

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 [2–3]. Усталостные трещины возникают между свариваемыми листами на контуре сварной точки. В дальнейшем трещина распространяется по толщине в перегретом участке околошовной зоны 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 [4–5].

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, проведена разработка 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. Проведены расчетно-экспериментальные исследования характеристик прочности лабораторных образцов с точечными сварными соединениями.

Основными особенностями разработанной методики являются: учет изменения механических свойств материала в зоне сварного соединения, учет локального динамического НДС в зонах точечных сварных соединений при действии случайного нагружения, а также подробное моделирование напряженного состояния в наиболее нагруженных зонах точечного сварного соединения.

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

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- 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;
- сформированы численные модели конструкции, с использованием твердотельных КЭ, позволяющие определять характеристики составляющих ее напряженного состояния и пространственного локального деформирования в зонах нерегулярностей (соединений, резких изменений сечений);

- разработана комплексная методика численного моделирования динамического НДС и оценки характеристик усталостной долговечности конструкций авиационных изделий, имеющих дискретные (точечные) сварные соединения, при случайном пространственном возбуждении;
- 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 (КЭ) 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» при проведении исследований по приоритетным направлениям

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 надежности, теории вероятностей и теории случайных функций. Расчет конструкции проводился с применением метода конечного элемента. Для построения геометрических и 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 тонкостенной авиационной конструкции, содержащей точечные сварные соединения;
- разработанная методика построения КЭМ сварной точки, учитывающей изменение механических свойств материала в зависимости от величины его твердости в зоне сварного соединения;
- разработанная методика и количественные оценки усталостной долговечности конструкции содержащей точечные сварные соединения;
- 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 изменчивости напряжений и уровней напряжений проведено моделирование НДС конструкции от нагружения квазистатическим гравитационным ускорением;

– 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 полученных результатов подтверждается обеспечением сходимости результатов вычислений и их физической корректностью при изменении параметров КЭ моделирования.

Основные результаты диссертационной работы доложены на международных научных конференциях, семинарах и симпозиумах, а также опубликованы в различных периодических изданиях. Всего по теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в числе которых 4 статьи в рецензируемых изданиях, 7 тезисов докладов на научных конференциях.

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 конструкций авиационного изделия при действии заданных вибрационных нагрузок, соответствующих этапу совместной эксплуатации с самолётом-носителем.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из 4 глав.

В первой главе представлен обзор литературы по рассматриваемой в данной диссертационной работе теме. Рассмотрены современные методы моделирования точечных сварных соединений и приведены результаты исследования ресурсных характеристик. Сформулированы основные задачи 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 МКЭ, статистического моделирования, гипотезы линейного суммирования и гипотезы спектрального суммирования усталостных повреждений.

В третьей главе представлены результаты реализации методики моделирования динамического и напряженного состояний тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении, результаты моделирования точечного сварного соединения в сравнении с экспериментальными данными. Также представлены: оценка динамического и напряженного состояний тонкостенной конструкции, содержащей дискретные сварные соединения, проверка корректности моделирования динамического НДС конструкции с различными вариантами разбивки КЭ сетки, определение зон наибольшей изменяемости напряжений при нагружении конструкции квазистатическим гравитационным ускорением. Построена приведенная кривая усталости для материала сварной точки, а также получена оценка усталостной долговечности точечного сварного соединения по линейной и скорректированной гипотезе линейного суммирования повреждений, по гипотезе спектрального суммирования.

В четвертой главе проведено сопоставление данных моделирования с результатами лабораторных испытаний авиационного изделия, содержащего точечные сварные соединения по величинам и уровням составляющих вибрационных ускорений. Представлена методика испытаний реального изделия. В результате испытаний определены уровни составляющих вибрационного ускорения в направлениях осей X , Y , Z , в различных точках конструкции изделия. Получены спектральные плотности вибрационных ускорений вблизи переднего узла подвески. Изделие моделировалось в системе, совместно с крепежным приспособлением, при учете первых 50 собственных форм колебаний. В результате моделирования были получены распределения составляющих

вибрационных ускорений по осям X , Y , Z , а также спектральные плотности ускорений в узлах КЭМ. Получено удовлетворительное соответствие результатов численного моделирования и экспериментальных данных по уровням вибрационных ускорений.

Глава 1. Обзор литературы

В последнее время, точечные сварные соединения все чаще применяются в конструкциях авиационных изделий. Так как на различных этапах эксплуатации изделие находится под действием колебательных процессов, то на этапах разработки тонкостенных авиационных конструкций, в состав которых входят точечные сварные соединения, необходимы исследования динамического напряженного состояния, оценки вибрационной прочности (вибропрочности) таких конструкций в зоне сварных соединений. Эти исследования являются сложной комплексной задачей, которая существенно усложняется, если на конструкцию действуют случайные вибрационные нагрузки.

Для оценки вибропрочности, необходимо определить характеристики распределения вибронапряжений по конструкции. Эти характеристики определяются на основе проведения натуральных экспериментов, с использованием реальных конструкций или соответствующих физических моделей. При отсутствии экспериментальных данных, возможно их определение расчетным путем. Здесь для получения корректного и достаточно точного результата необходимо сформировать математическую модель конструкции, учитывающую сложность и нерегулярность ее геометрии, наличие сварных соединений и других факторов.

Важнейшим этапом любого приближенного реализации расчетного метода является схематизация конструкции или выбор расчетной модели. Во многих случаях конструкции, имеющие достаточно большое удлинение в продольном направлении представляют в виде балок с присоединенными массами в узлах [6–7].k

Например, в книге [7] для идеализации конструкции предлагается использовать балочные КЭ. Здесь рассматривается балочный изопараметрический элемент, конечно-элементными узлами которого, являются точки узлов в модели

конструкции, а перемещения – смещения узлов. В книге [6] при построении расчетной модели с конечным числом распределенных масс предлагается использовать, как балочные, так и смешанные схематизации конструкции. При балочной схематизации каждую из частей ЛА, например, крыло представляют в виде балки, которую поперечными сечениями разделяют на отсеки, а те в свою очередь заменяют сосредоточенной массой, характеристики которой соответствуют характеристикам данного отсека. Крыло предлагается представлять, как упругую пластину, разбитую на ряд отсеков, вдоль размаха и в направлении хорд. При такой схематизации учитывают конструктивные особенности крыла и линии, расчленяющие крыло на отсеки, проводят вдоль продольного и поперечного силовых наборов крыла обычно на равном расстоянии друг от друга. Сосредоточенные массы размещают в серединах полученных клеток или в точках пересечения (узлах) проведенных линий.

В случае рассмотрения таких конструкций как тонкостенные авиационные конструкции, содержащие точечные сварные соединения, необходимо определение достаточно большого числа форм и частот колебаний. Объясняется это тем, что первые формы колебаний конструкции соответствуют преимущественно балочным формам, которые дают удовлетворительные результаты по вибронпряжениям преимущественно на низких частотах колебаний конструкций. Для определения вибропрочности в тонкостенных оболочках, а также в точечных сварных соединениях, необходимо вычислить и более высокие, оболочечные формы колебаний конструкции.

В статье [8] рассмотрены колебания цилиндрической трубы и открытых оболочек заданной кривизны с применением классических теорий тонких оболочек таких как: теория Доннелла, теория Лява и усовершенствованная теория, которая включает эффекты инерции вращения и поперечного сдвига. Рассматривалось также решение с использованием МКЭ. Для построения КЭМ использовались параболические четырехсторонние девяти узловые оболочечные элементы SHELL. Такой элемент состоит из четырех угловых узлов, четырех промежуточных узлов между углами и центральный узел для присоединения

жесткости. Такой элемент имеет пять степеней свободы в каждом узле. КЭМ цилиндрической трубы строилась в двух вариантах: 900 конечных элементов и 3148 конечных элементов. Отмечается, что представленные методы дают возможность определять высокие формы и частоты колебаний цилиндрических труб, что будет полезно при вычислении усталостной долговечности таких конструкций. Наибольшее соответствие с классическими теориями в области высоких частот имеют результаты для модели с наибольшим количеством элементов.

В работе [9] разработана методика численного моделирования динамического и напряженно-деформированного состояний конструкции авиационных изделий при случайном пространственном кинематическом нагружении. Определены динамические характеристики изделий и проведены расчетные исследования спектральных характеристик вибрационного состояния изделия при различных видах нагружения.

Для создания расчетной модели конструкции изделия здесь используются геометрические характеристики конструкции, распределение массы, механические характеристики материалов. Исследуемым объектом является авиационное изделие, которое состоит из обечайки с подкрепляющими элементами, заполнителя для имитации массы, узлов подвески и противовеса, моделирующего массу передней части изделия. КЭМ конструкции построена с использованием параболических треугольных шестиузловых конечных элементов SHELL и параболических тетраэдральных десятиузловых конечных элементов типа SOLID. Случайные кинематические нагрузки заданы в узлах подвески изделия к носителю.

Проводился анализ собственных форм и частот, по результатам которого выявлено, что колебания конструкции происходят при сочетании оболочечных и балочных форм, при которых контур оболочки не деформируется. Две низшие частоты соответствуют преимущественно балочным изгибным формам колебаний. Более высокие частоты соответствуют сочетанию оболочечных и балочных форм изгиба и кручения, либо преимущественно оболочечным формам.

Были определены характеристики виброускорений при воздействии на конструкцию изделия случайной кинематической нагрузки от модельной спектральной плотности ускорения «белый шум» и спектральной плотности ускорения, соответствующей воздействию от совместного полета изделия с носителем. Определены распределения значений среднеквадратических эквивалентных напряжений при воздействии модельной и эксплуатационной нагрузок, а также спектральные плотности напряжений и распределение дисперсии напряжений в различных точках конструкции при возбуждении случайными стационарными процессами.

Также исследовано влияние размеров конечных элементов в модели на полученные результаты. Показано, что результаты расчетных исследований для различных разбинок сетки КЭМ имеют сходимость и согласованность.

Работоспособность и адекватность моделей подтверждались физической корректностью полученных результатов расчетов динамических ускорений и напряжений, распределением напряжений при действии квазистатического гравитационного ускорения, а также сходимостью значений характеристик напряжений при различных размерах КЭ сетки.

Если говорить о точечных сварных соединениях, при проектировании конструкций содержащих такой тип соединения, необходимо учитывать прочностные характеристики сварных точек. Прочность сварных точек зависит от множества различных факторов таких как: величина и направление действия силы, прочность металла и его чувствительность к концентрации напряжений, толщина металла, характерные размеры сварной точки.

В практике проектирования конструкций, содержащих точечные сварные соединения, расчет сварных точек обычно проводят упрощенно, также как и для заклепочного соединения и используют простейшие модели на отрыв и срез, а неточность расчета компенсируют снижением характеристик допускаемых напряжений [10–16]. При этом считается, что в пределах сварной точки структура материала является однородной. При переменных нагрузках, допускаемые

напряжения понижают умножением на коэффициент, а расчет выполняют по максимальному (по абсолютной величине) напряжению цикла [14].

В статье [16] представлены результаты исследования механических характеристик сварного точечного соединения листов и механические свойства листовых полуфабрикатов из алюминиевого сплава при повышенных температурах. Для проверки стабильности сварки на номинальном режиме (сварочная сила 7 кН) выполнена сварка свыше 200 точек на образцах технологической пробы с последующим их разрушением и металлографическими исследованиями. Изготовлены образцы для механических испытаний на срез и отрыв точек. Разрушение образцов происходило с образованием вырыва круглого отверстия на одной из пластин (диаметр вырыва 12...13 мм). Анализ внешнего вида соединений до и после разрушения свидетельствует о довольно высокой стабильности полученных качественных характеристик точечных соединений. Результаты испытаний на срез и отрыв по уровню разброса числовых значений близки к случаю сварки листов из сплава АМг6. Проведенные испытания позволили получить начальную информацию об ожидаемой прочности и рекомендовать для рассмотрения значения, которые в последствии можно принять в качестве нормативных.

В действительности, сварная точка представляет собой неоднородную распределенную структуру [12, 15, 17–18] с изменяющейся твердостью и напряженным состоянием, степень неравномерности которого определяет степень разрушения.

В работе [15] исследованы свойства сварных соединений разнородных металлических соединений между обычными и нержавеющей стали. Целью исследования являлось определение параметров точечной сварки и механических свойств в разнородных металлических соединениях. Были проведены металлографические исследования, измерения микротвердости, испытания на срез и отрыв сварных точек, коррозионную усталость и трещиностойкость. В разнородных точечных сварных соединениях, были получены более высокие значения микротвердости в ядре сварной точки, а также построены графики

распределения микротвердости по сварному соединению для различных соединяемых сталей. Определена микроструктура сварной точки в соединениях различных сталей после испытаний на срез и отрыв точек. Типичный вид разрушения для обоих типов испытания – вырыв сварной точки из более тонкого металла. При испытаниях на отрыв, нагрузка при которой происходило разрушение составила 72-78% от разрушающей нагрузки на срез.

Для расчета точечных сварных соединений в конструкциях с повышенными требованиями к надежности, необходимы более высокие оценки прочности таких соединений. Наиболее эффективным методом оценки прочности точечных сварных соединений является МКЭ. Моделированию сварных точечных соединений в последнее время посвящено достаточно много различных работ, преимущественно зарубежных [18–30].

В статье [19] предложена методика моделирования точечного сварного соединения в сборках тонкостенных моделей с помощью суперэлемента, позволяющая учитывать структурные зависимости в районе точечного сварного соединения. Для моделирования сварной точки используются балочные элементы, имеющие начало в общем узле в центре точки, а концы, расположенные на равном расстоянии друг от друга, по диаметру сварной точки. Свариваемые поверхности соединяются балочным элементом по центральным общим узлам.

С целью подтверждения практического применения, и для проверки корректности моделирования, построено четыре различных модели с многоточечным сварным соединением: оболочечно-твердотельная модель с твердотельной сварной точкой, оболочечную модель со сварной точкой, смоделированной четырьмя балочными элементами и жестким ядром, традиционная модель с использованием оболочечных элементов и балочного элемента для моделирования сварной точки, оболочечная модель со сварной точкой в виде суперэлемента. К моделям прикладывалась нагрузка в виде крутящего момента, а оценка результатов проводилась по полученным углам поворота и напряжениям. За эталон принималась твердотельная модель с

твердотельной сварной точкой. Было получено, что наибольшую ошибку дает традиционная модель, состоящая из оболочечных элементов и сварной точки смоделированной балочным элементом. Наименьшая ошибка наблюдается в модели, построенной с использованием оболочечных элементов и сварной точкой в виде суперэлемента. Предложенный суперэлемент дает возможность снизить общее количество степеней свободы в КЭМ, с сохранением точности результата.

Достаточно подробно описывается моделирование сварного точечного соединения в книге [29]. Рассматриваются тонкостенные пластинки, соединенные сварными точками, нагруженные давлением. Задачи решались средствами программного комплекса SolidWorks в линейной постановке. Строилась расчетная модель с использованием КЭ оболочки и твердотельных КЭ. Сравнивались различные методы моделирования сварного точечного соединения: соединение контактом «связанные» по площадкам, равным диаметру сварной точки при котором исключаются взаимные совместные перемещения во всех направлениях в месте точечного сварного соединения в первом варианте. Для второго варианта расчета применялось соединение «виртуальным» контактом точечного сварного шва. Виртуальный контакт точечного сварного шва представляет собой цилиндрический соединитель, располагающийся между поверхностями КЭ сетки в указанном месторасположении, так он описан в справочном материале к программному комплексу SolidWorks [31]. По сути, данный соединитель состоит из балочного КЭ по центру, который соединяется с узлами модели, расположенными по диаметру сварной точки.

В результате проведенных расчетов было получено, что для модели с использованием контактного условия «связанные», результаты для оболочки в значительной степени инвариантны относительно плотности КЭ сетки. Также отмечено, что при достаточно большом уплотнении КЭ сетки в зоне контакта, может возникать сингулярность по кромке сварной точке. В данном случае, рекомендуют интерпретировать результаты с осреднением значений напряжений по элементам.

Для модели с применением «виртуальных» точечных сварных соединителей было получено, что такие соединители достаточно хорошо воспроизводят жесткость системы, но весьма чувствительны к параметрам плотности КЭ сетки. Вообще говоря, такие соединители могут применяться в тех случаях, когда имеется достаточно объемная конструкция, и для расчета ее необходимо упростить, а характеристики НДС в местах сварных соединений не имеют особой значимости. То есть такой метод является наиболее подходящим для быстрой оценки всей конструкции в целом.

Одной из наиболее сложных задач расчета прочности в тонкостенных авиационных конструкциях, особенно содержащих точечные сварные соединения, является определение динамического НДС, в том числе от воздействия случайного нагружения. А также определение усталостной долговечности на основе полученных данных. В России интерес к исследованиям тонкостенных конструкций под действием случайного нагружения появился относительно недавно [32]. Но в последнее время этими вопросами занимались в основном зарубежные авторы [18, 23, 26–27, 33–36].

В работе [32] была проведена разработка методики численного моделирования и получены результаты расчетных исследований характеристик вибронапряжений изделий авиационной техники, вызванных действием стационарной случайной вибрации при полете с носителем. Также были получены спектральные характеристики и уровни вибронапряжений в различных точках конструкции изделия и установлены максимальные уровни напряжений. Были получены реализации случайных процессов вибронапряжений.

Исследуемым объектом является авиационное изделие, состоящее из тонкостенной обечайки, подкрепляющих элементов, заполнителя и узлов подвески. Для моделирования динамического напряженного состояния конструкции используются КЭ типа SOLID – твердотельные элементы и SHELL – оболочечные элементы. Обечайка строилась КЭ типа SHELL, остальные части конструкции создавались с помощью КЭ типа SOLID. Нагрузка задавалась в узлах подвески в виде случайного кинематического нагружения со спектральной

плотностью ускорения, соответствующей модельному нагружению – белый шум и реальному эксплуатационному нагружению.

В результате расчетов были получены спектральные плотности эквивалентных напряжений в наиболее напряженных зонах, выявлены особенности распределения напряжений. Были выявлены особенности распределения дисперсии напряжений по частоте в зонах максимальных напряжений. На основе алгоритмов статистического моделирования построены реализации процессов напряжений для наиболее нагруженных зон для моделей при случае нагружения спектральной плотностью ускорения, соответствующей модельному нагружению «белый шум» и реальному эксплуатационному нагружению.

При проектировании тонкостенных конструкций, содержащих сварные соединения, возникает серьезная проблема оценки долговечности и надежности. Выполнение сварных соединений (как правило, непрерывные) может вызывать перегрев конструкции. В сварных соединениях возникают остаточные напряжения, которые могут несущественно влиять на прочность конструкции при действии статических нагрузок, а при действии динамических нагрузок – оказывать существенное влияние на надежность и долговечность конструкции.

В настоящее время, в открытой печати, какой-либо стандартной методики расчета усталостной долговечности точечных сварных соединений не представлено.

Существуют различные методы расчета усталостной долговечности различных элементов авиационных конструкций [37-38], в том числе методика оценки сопротивления усталости дискретных (заклепочных) соединений, характер напряженного состояния которых существенно различается от точечных сварных соединений.

Вопросам усталостной долговечности точечных сварных соединений, посвящены в основном зарубежные работы [18, 22, 24, 33, 34].

В работе [18] проведено исследование влияния расположения сварных точек в многоточечном сварном шве на усталостную долговечность конструкции.

Были рассмотрены три различных модели: однорядный шов с четырьмя сварными точками, параллельный направлению нагрузки, однорядный четырехточечный сварной шов, перпендикулярный направлению нагрузки и двухрядные точечные сварные швы. Точечными сварными швами соединялись металлические пластинки толщиной $t = 1$ мм, шириной $h = 40$ мм, длиной $l = 150$ мм. Сварные точки имеют диаметр $d = 4$ мм. Образцы подвергались испытаниям на сдвиг при статическом и циклическом нагружении. Получены кривые зависимости максимальных напряжений от числа циклов до разрушения в полулогарифмической шкале. Получено, что характеристики сопротивления усталости существенно зависят не только от толщины свариваемых деталей и диаметра сварной точки, но еще и от таких параметров как расположение сварного шва и уровня приложенной нагрузки.

Для определения эффективности расстояния между сварными точками и уровней напряжений, а также для интерпретации различия в усталостной долговечности, проводился нелинейный КЭ анализ моделей образцов. Анализ проводился с использованием КЭ комплекса ANSYS, но подробности моделирования сварного соединения здесь не представлены. Указано лишь, что сварная точка моделировалась элементами достаточно небольшого размера, чтобы получить более корректный результат. Приведены графики, демонстрирующие величину напряжения, необходимую для образования усталостной трещины, а также относительные распределения полей напряжений в зависимости от расстояния между сварными точками. Получено достаточно хорошее согласование экспериментальных и данных КЭ моделирования.

Основным фактором, влияющим на сопротивление усталости в сварных точках, являются динамические нагрузки. В статье [33] исследовано действие усталостных повреждений на частоту динамической реакции в течение всего процесса развития усталостного повреждения для образцов с точечной сваркой при действии сдвиговой нагрузки.

Наибольший интерес представляет работа [23], в которой определена усталостная долговечность от воздействия случайной вибрации для

многоточечного сварного соединения, на основе изменения в частотном отклике конструкции. Расчетная модель представляет собой две пластинки, соединенные между собой швом из 8 сварных точек. Первая пластинка имеет граничные условия закрепления по всем направлениям, во второй пластинке запрещались перемещения только в перпендикулярном направлении к плоскости. Модель строилась с использованием оболочечных КЭ Quad 4, а сварные точки моделировались «виртуальными соединениями» CWELD, которые представляют собой специальную балку типа Тимошенко, соединяемую с узлами основной модели, по аналогии с описанным ранее элементом в книге [29].

Материал модели – сталь ($\sigma_T = 179$ МПа, $\sigma_B = 297$ МПа, $E = 200000$ МПа). Возбуждение задавалось в виде спектральной плотности ускорения на второй пластинке, в диапазоне частот от 5 Гц до 700 Гц, шаг по частоте – 10 Гц.

Был проведен анализ частотных характеристик и в результате расчетов получено, что максимальные значения составляющих ускорения наблюдаются на частоте 560 Гц, что согласуется с результатами эксперимента.

Для оценки эффективности обычного вибрационного анализа, в котором используется только начальная передаточная функция, без учета изменений в частотном отклике от усталостных повреждений в конструкции был проведен расчет с использованием программного комплекса MSC/Fatigue. Расчет проводился с применением диаграммы $S-N$ и заданной спектральной плотности ускорения. Было получено, что первая сварная точка имеет усталостную долговечность 740 с, а вторая, третья и четвертая – $2,8 \cdot 10^7$, $2,87 \cdot 10^{14}$, $3,43 \cdot 10^{11}$ с, соответственно. Поэтому принято, что для второй, третьей и четвертой точек усталостное разрушение не возникает. В результате эксперимента было получено, что разрушение происходит гораздо быстрее, чем получено в результате расчета.

Было подчеркнуто, что обыкновенный анализ усталостного повреждения проводится для конструкции, содержащей одну или более сварных соединений, но считается, что при отказе одной точки происходит разрушение конструкции. На практике, отказ конструкции может происходить при отказе 20-50% сварных точек шва.

В проведенном анализе считают отказом конструкции разрушение 50% точек. Для учета изменений в частотном отклике конструкции в результате накопления усталостных повреждений было проведено четыре расчета, с последовательным отсоединением отказавшей сварной точки. В каждом из расчетов получен частотный отклик в отказавшем точечном сварном соединении. Исходя из полученных результатов, собственная частота конструкции и магнитуа частотного отклика в сварных точках снижались с увеличением числа отсоединенных сварных точек.

Было проведено сравнение результатов исследования, полученных традиционным вибрационным анализом, предложенным методом с последовательным отсоединением сварных точек и учетом частотного отклика, а также данных, полученных в результате эксперимента. Традиционный метод показывает согласование результатов только для первой отказавшей сварной точки, а предложенный метод с последовательным отсоединением отказавших сварных точек дает возможность оценить усталостную долговечность остальных сварных точек в конструкции, что достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Проведенный обзор литературных источников по теме диссертации показал, что:

- точечные сварные соединения чаще всего моделируются упрощенно балочными элементами или суперэлементами на основе балочных элементов, без учета распределения механических свойств материала в зоне сварного соединения;
- отсутствует методика численного моделирования конструкций авиационных изделий, имеющих дискретные сварные соединения, при действии случайного кинематического возбуждения с заданной спектральной плотностью, позволяющая оценить локальное динамическое НДС конструкции;
- отсутствует методика оценки ресурса тонкостенных авиационных конструкций, содержащих дискретные сварные соединения;

В связи с этим можно сформулировать следующие основные задачи диссертационной работы:

- разработка методики моделирования точечного сварного соединения, позволяющего учитывать распределение механических характеристик материала в зоне сварной точки;
- разработка методики оценки долговечности тонкостенных авиационных конструкций, содержащих дискретные сварные соединения;
- разработка расчетных моделей для оценки динамического НДС, прочности и долговечности тонкостенных авиационных конструкций, содержащих дискретные сварные соединения при действии случайных вибрационных нагрузок.

Глава 2. Методика моделирования динамического и напряженного состояний и оценки долговечности тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении

Тонкостенные авиационные конструкции, содержащие дискретные сварные соединения, в процессе эксплуатации подвергаются значительным нагрузкам, как внешним, так и внутренним. Одним из наиболее распространенных видов нагрузок является случайное вибрационное нагружение. Точечные сварные соединения могут разрушаться в процессе эксплуатации именно от воздействия случайных вибрационных нагрузок, при этом уровень вибрационных напряжений может не превышать предел текучести основного материала в зоне сварного соединения.

Определение долговечности точечных сварных соединений под действием случайных вибрационных процессов проводят достаточно трудоемкими и дорогостоящими натурными испытаниями. Однако долговечность таких соединений можно также определить с помощью математического моделирования, при определенных условиях позволяющего получить достаточно обоснованную оценку и существенно уменьшить затраты и время на разработку авиационных изделий в целом. В связи с этим разработка методики моделирования напряженного состояния и долговечности тонкостенных авиационных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении обладает несомненной актуальностью.

На рис. 2.1 представлена структура методики моделирования динамического и напряженного состояний и оценки долговечности тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении.

На первом этапе проводится анализ особенностей конструкции и формирование исходных данных для моделирования, проводится моделирование точечного сварного соединения с определением зон сварной точки, на основе

механических характеристик материала и геометрических характеристик свариваемых деталей.

Далее проводится формирование КЭМ и тестовые расчеты НДС сварной точки, а также сопоставляются распределения напряжений с известными экспериментальными и расчетными данными.

На следующем этапе проводится разработка геометрической модели и КЭМ конструкции и проводится расчет динамического и напряженного состояний, оценивается сходимость результатов при различных параметрах КЭ сетки и количество учитываемых форм колебаний.

Затем выбираются наиболее напряженные сварные точки, формируется приведенная кривая усталости и проводится оценка усталостной долговечности известными расчетными методами.

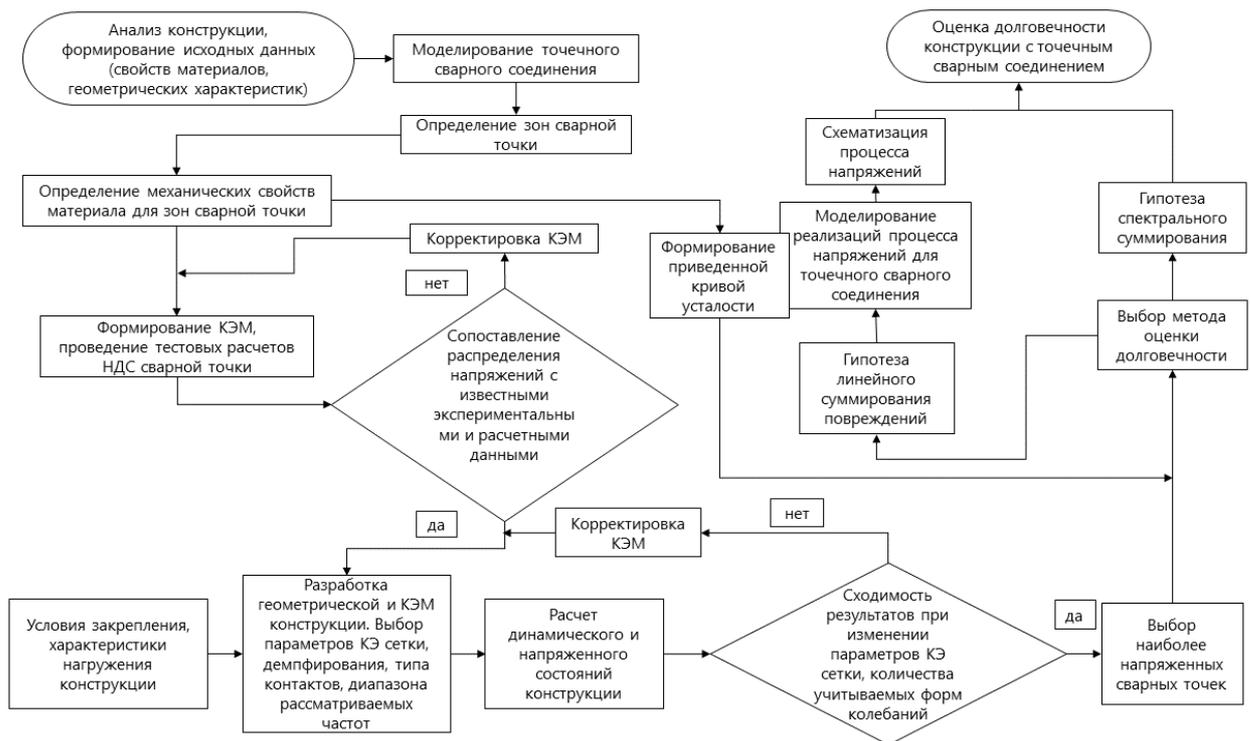


Рис. 2.1. Структура методики моделирования динамического и напряженного состояний и оценки долговечности тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении

2.1. Моделирование точечного сварного соединения

Основными исходными данными для моделирования точечного сварного соединения являются данные о механических характеристиках материалов, геометрических характеристиках свариваемых деталей.

Механические характеристики металла в точечном сварном соединении имеют значительную неравномерность, обусловленную локальным нагревом и плавлением металла в процессе сварки, вызывающим изменение его структуры металла в зонах сварных точек. Экспериментально показано [12, 15, 17, 23, 28], что в центральной части сварной точки металл имеет более твердую структуру, а соответственно и более высокие механические характеристики, чем в периферийной части сварной точки и в основной части конструкции.

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 в среде твердотельного моделирования формируется геометрическая модель конструкции с точечным сварным соединением. 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 (минимальные расчетные размеры сварных точек для различных толщин

свариваемых деталей лежат в пределах 0,7 – 16 мм и регламентированы [39-40]). Из этих деталей конструируется сварное точечное соединение (рис. 2.2).

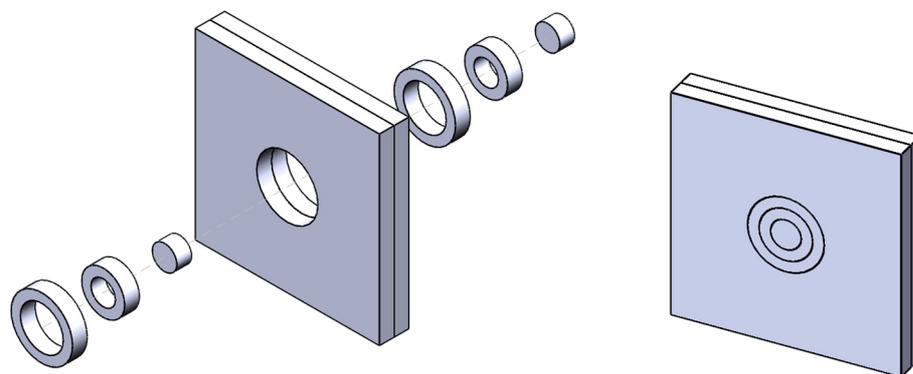


Рис. 2.2. Разделение точечного сварного соединения на зоны

Геометрические размеры цилиндрических деталей в сварных точках задаются в соответствии с распределением твердости по точечному сварному соединению [41, 42]. Это распределение в работах различных авторов имеет практически одинаковый характер [15, 18, 23, 25, 41, 43–44] (рис. 2.3).

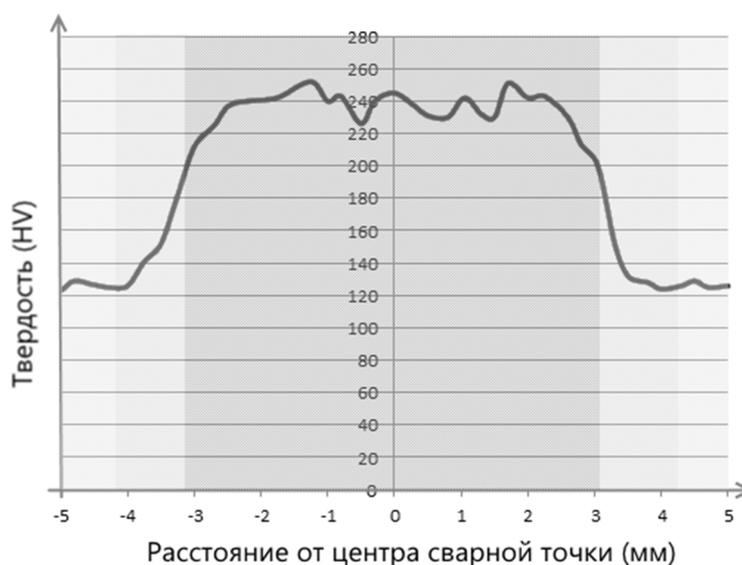


Рис. 2.3. Распределение твердости в точечном сварном соединении

Механические характеристики деталей точечного сварного соединения определяются как средние значения распределения твердости по диаметральному участку сварной точки $H_{cp_{1,2,3}}$. Определяются коэффициенты пересчета

твердости материала различных деталей точечного сварного соединения (различных зон) $K_{1,2,3}$ и твердости материала основной конструкции H .

$$K_{1,2,3} = \frac{H_{cp-1,2,3}}{H}.$$

На основе полученных отношений и формулы [45], по которой определяется твердость на пределе текучести $H_{0,2}$ в МПа:

$$H_{02} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = 156,9 \frac{P_{02}}{D^2}$$

и формулы для пересчета твердости на пределе текучести для различных зон сварной точки:

$$H_{02-1,2,3} = H_{02} \cdot K_{1,2,3},$$

и далее по формуле [46]:

$$\sigma_{0,2} = c \cdot H_{0,2-1,2,3}$$

определяются значения предела текучести материала в различных зонах сварной точки. Здесь c - коэффициент пропорциональности, учитывающий переход от напряженного состояния на пределе текучести при растяжении к схеме напряженного состояния при вдавливании стального сферического индентора для измерения твердости [45]. В связи с тем, что отношение упругой деформации к остаточной деформации в лунке с повышением предела прочности увеличивается, то абсолютное значение коэффициента c зависит от прочностных характеристик материала [47]. Так, для относительно мягких металлов ($\sigma_{0,2} < 78,5 - 500$ МПа) коэффициент $c < 0,333$, тогда как для более твердых металлов ($\sigma_{0,2} > 500 - 3825$ МПа) $c > 0,333$. Наиболее существенное увеличение коэффициента c наблюдается у металлов с пределом текучести больше 700 МПа [46].

Объединение деталей твердотельной модели точечного сварного соединения в единое целое проводится по соприкасающимся между собой граням с помощью контакта типа Bonded («связанные»), который исключает взаимные относительные перемещения между контактирующими поверхностями.

Между прилегающими друг к другу поверхностями, вокруг «связанных» граней (сварных точек), задается условие Free contact («свободный контакт»),

которое не устанавливает ограничений на относительное движение контактирующих или Frictionless (без трения), в котором нет ограничений на относительное движение контактирующих поверхностей в направлении нормалей, и поверхности могут взаимно перемещаться в тангенциальном направлении с нулевым контактным трением. Как альтернатива условиям «свободный контакт» и «без трения», допускается задание малого зазора между деталями с прилегающими друг к другу гранями вокруг сварного соединения (рис. 2.4а, рис. 2.4б).

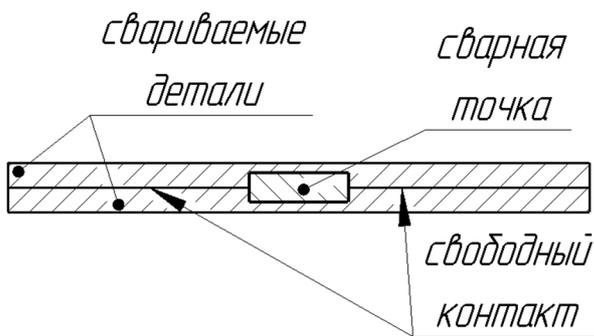


Рис. 2.4а. Свободный контакт между деталями

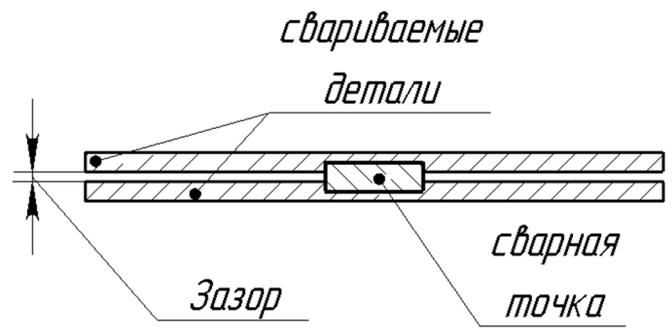


Рис. 2.4б. Зазор между деталями

Далее по геометрической модели сварной точки строится КЭМ с использованием твердотельных параболических тетраэдральных элементов типа SOLID, в котором каждый узел элемента имеет три степени свободы, в направлениях – X , Y , Z прямоугольной декартовой системы координат. Размер грани элемента принимается не более 1-2 мм, так как с увеличением размера КЭ существенно снижается точность описания распределения напряжений по диаметру сварной точки.

Для обоснования выбора параметров КЭМ сварной точки на первом этапе проводится моделирование статического напряженного состояния точечного сварного соединения для относительно простых геометрических моделей (пластинки, соединенные точечной сваркой), позволяющих получить характер распределения напряжений по сварной точке или сварному шву с учетом изменения механических свойств материала. При этом определяются варианты

различной разбивки КЭ сетки для определения характерных размеров КЭ сварного точечного соединения, при которых обеспечивается последовательное и монотонное сближение значений напряжений, и не будет наблюдаться резкое расхождение получаемых результатов. При этом характерной особенностью распределения напряжений в сварном точечном соединении является наличие максимальных значений на контуре сварной точки, что можно сопоставить с известными расчетными и экспериментальными данными [12, 24–25, 28, 42, 43, 48-50].

Для обеспечения регулярного характера распределения напряжений в окрестности сварной точки, соответствующего данным [12, 51], на границах КЭМ точечного сварного соединения формируются объединенные узлы КЭ сетки (рис. 2.5а). При таком объединении, узлы на контуре сварной точки связаны с узлами модели основной конструкции, что обеспечивает относительно плавное изменение размеров смежных элементов КЭ сетки на границах между деталями соответствующих зон сварной точки.

Если объединенные узлы на границах КЭМ сварной точки не формируются (рис. 2.5б), то появляется искажение и существенная неравномерность распределения напряжений на границах сварных точек, повышенная концентрация напряжений на границах стыковки различных деталей соответствующих зон сварной точки.

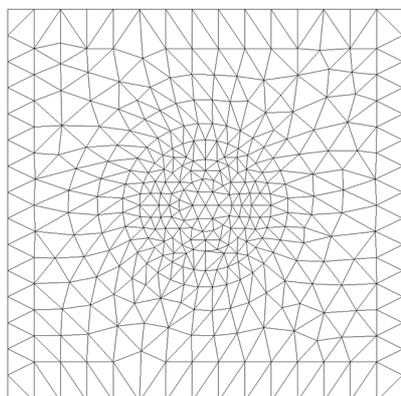


Рис. 2.5а. Объединенные узлы на границах деталей

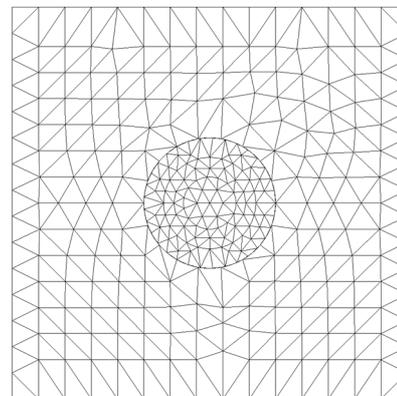


Рис. 2.5б. Необъединенные узлы на границах деталей

Следует отметить, что во многих исследованиях сварные точечные соединения моделируются упрощенно, например, балочными элементами [19-20, 27, 30]. При этом, как правило, не учитываются изменения механических характеристик материала по сварной точке. Такие способы моделирования не позволяют определять характеристики локального НДС точечного сварного соединения и получать обоснованные оценки его долговечности.

2.2. Моделирование динамического НДС авиационной конструкции

Моделирование динамического НДС конструкции, содержащей дискретные сварные соединения [52], выполняется на основе исходных данных о материале, геометрических, жесткостных и массовых характеристиках конструкции, а также условиях закрепления и нагружения.

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.

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

Типовая тонкостенная авиационная конструкция представляет собой тонкостенную обечайку с присоединенными посредством шовной точечной сварки поверхностями, содержащую некоторый массовый упругий наполнитель. К обечайке прикрепляются узлы подвески, по которым устанавливаются граничные условия закрепления и задается случайное кинематическое возбуждение (рис. 2.6). Тонкостенная обечайка формируется параболическими треугольными КЭ типа SHELL, поверхности, узлы подвески, массово-габаритные макеты, точечные сварные соединения и прочие конструктивные элементы – твердотельными тетраэдральными параболическими КЭ типа SOLID. Создается комбинированная сетка КЭ, в которой сочетаются элементы разной размерности. Все конструктивные элементы, соприкасающиеся между собой, имеют в местах контакта условие Bonded «связанные». Исключение составляют грани вокруг

сварных точечных соединений – в этих местах устанавливается условие Free contact «свободный контакт» или Frictionless «Без трения» (рис. 2.7).

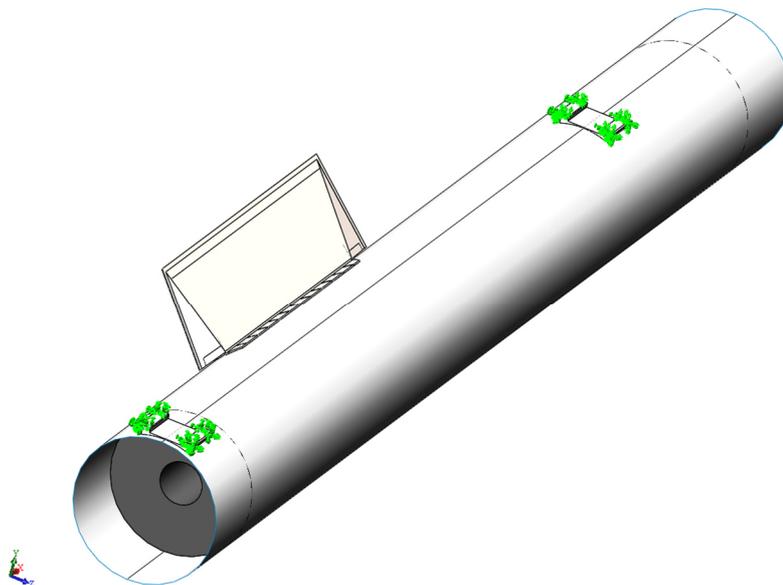


Рис. 2.6. Типовая модель конструкции авиационного изделия

На следующем этапе проводится модальный анализ конструкции, содержащей точечные сварные соединения, т.е. определяются собственные формы и частоты колебаний. При модальном анализе КЭМ вычисляется эффективная модальная масса (ЭММ) для каждой собственной формы колебаний, то есть массовый вклад той или иной формы в колебание всей системы. Сумма ЭММ равна всей массе системы. Основной вклад в реакцию конструкции дают те формы, которые имеют максимальную ЭММ [53].

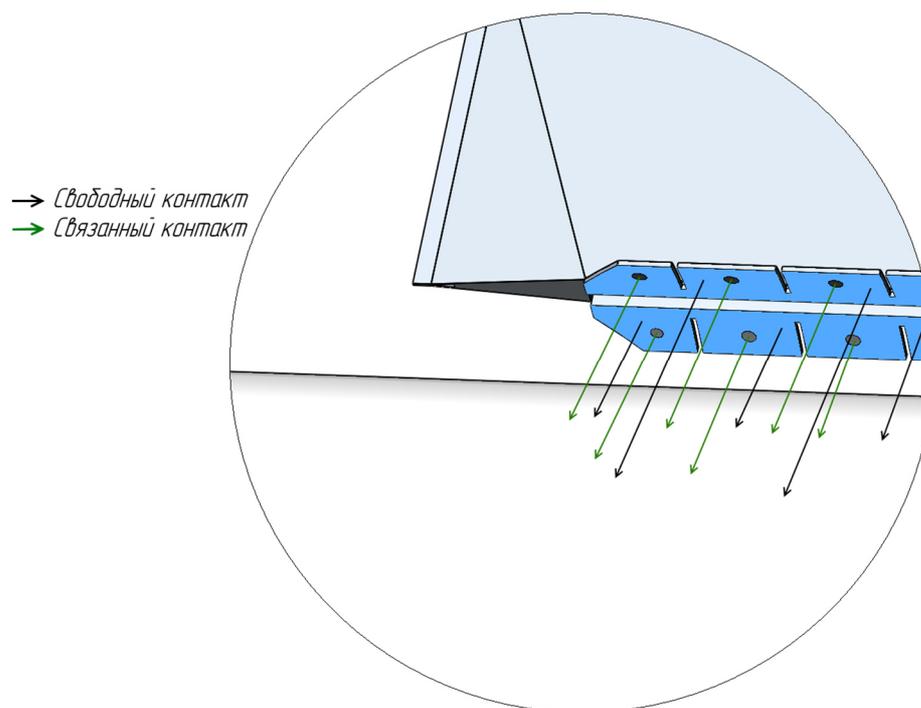


Рис. 2.7. Типы контакта между соприкасающимися гранями поверхности и обечайки

Диапазон частот для модального анализа выбирается в соответствии с диапазоном частот внешнего нагружения или величиной, используемой при модальном анализе ЭММ в каждом направлении – X , Y , Z . Следует отметить, что выбранный частотный диапазон анализа может охватывать большое количество собственных форм, учет которых приводит к значительным объемам вычислений. Для уменьшения количества учитываемых форм колебаний, можно ограничить количество форм колебаний так, чтобы суммарная ЭММ в каждом из трех (X , Y , Z) направлений составляла не менее 70-90 % от всей массы системы [54–57].

Динамический расчет НДС конструкции проводится с применением алгоритмов модального анализа для случайных процессов. В этом типе анализа используется разложение вектора узловых перемещений в ряд по собственным формам и последующее решение системы. При анализе задается количество учитываемых собственных форм и параметры пошагового динамического анализа – временной интервал и шаг интегрирования, метод и параметры процедуры интегрирования, характеристики демпфирования.

В расчете используется модель вязкого демпфирования, пропорционального скорости смещения.

Демпфирование конструкции задается как модальное демпфирование, которое определяется как некоторая доля C_{md} (коэффициент модального демпфирования) от критического демпфирования C_{cr} для каждой формы колебаний. Критическое демпфирование C_{cr} является наименьшей величиной демпфирования, которое побуждает систему вернуться в равновесное состояние без колебаний.

$$C_{cr} = 2\sqrt{km} = 2m \cdot \omega_n,$$

где k – жесткость системы, m – масса системы, ω_n – n -ая собственная круговая частота.

При отсутствии необходимых экспериментальных данных, для значений коэффициентов C_{md} можно использовать данные приведенные в таблице 2.2.1 [53]. На промежуточных значениях частоты коэффициент C_{md} вычисляется линейной интерполяцией.

Таблица 2.2.1

Частота, Гц	Коэффициент демпфирования C_{md}
0 - 10	0,01
10 - 35	0,02
75	0,03
130	0,04
200	0,05

Расчет выполняется для случая нагружения, при котором колебания конструкции вызываются кинематическим возбуждением в узлах подвески в форме стационарного процесса ускорения с заданной спектральной плотностью. Спектральная плотность нагружения задается по точкам в виде ломаной линии.

В результате динамического расчета определяются спектральные плотности и среднеквадратические значения (СКЗ) эквивалентных напряжений, а также распределения дисперсии напряжений в объеме каждой точки сварного соединения. Выделяются узлы КЭМ, соответствующие наиболее напряженным точкам основной конструкции и сварного соединения. По характеристикам напряжений в этих узлах проводится оценка усталостной долговечности конструкции с точечными сварными соединениями.

Для проверки корректности моделирования конструкции, определения зон наибольшей изменчивости напряжений и уровней напряжений проводится разбивка КЭ сетки в нескольких вариантах с варьированием размерами КЭ, а также моделирование НДС конструкции при нагружении квазистатическим гравитационным ускорением, направленным по оси Y [52]. Зоны действия максимальных напряжений при квазистатическом нагружении должны соответствовать аналогичным зонам при воздействии случайного динамического нагружения.

2.3. Оценка усталостной долговечности точечного сварного соединения

В процессе эксплуатации на конструкции авиационных изделий действуют переменные нагрузки, уровни и частоты которых могут изменяться в достаточно широких пределах.

Долговечность изделий определяется характеристиками сопротивления усталости элементов конструкции, таких как локальные зоны соединений, являющиеся наиболее вероятным местом появления усталостных трещин.

В точечных сварных соединениях наиболее вероятным местом появления усталостных трещин является место перехода от зоны термического влияния в сварной точке к основному материалу, что подтверждается многочисленными экспериментами и исследованиями [12, 24–25, 28, 43, 48–50].

Сварные соединения в тонкостенных авиационных конструкциях могут иметь высокий уровень остаточных технологических напряжений, локальных пластических деформаций и концентраторов напряжений, также весьма вероятны появления микротрещин и изначальных дефектов соединения [58–59], в том числе непроваров, которые характеризуются отсутствием или малыми размерами металлической связи. В точечной сварке может присутствовать дефект называемый «склейка», при котором литая зона отсутствует, и соединение деталей происходит в твердой фазе по ограниченной площади. Прочность таких соединений на срез удовлетворительна, но они могут быстро разрушаться при нагрузках на отрыв или переменных нагрузках. В связи с возможными различными несовершенствами точечных сварных соединений, вибрационные процессы могут приводить к образованию усталостных трещин.

В справочной литературе по усталостной долговечности конструкций, как правило, приводятся усталостные характеристики материалов, полученные для образцов, испытанных в идеальных лабораторных условиях, причем все образцы обычно имеют стандартную форму [60]. При оценке усталостной долговечности

точечных сварных соединений в конструкциях тонкостенных авиационных изделий необходимо учитывать, что характеристики сопротивления усталости материалов за счет нерегулярности, возможных дефектов и концентраций напряжений будут отличаться от характеристик, полученных при испытаниях образцов в лабораторных условиях.

В настоящее время существуют различные теории накопления усталостных повреждений. На практике, для расчетов в основном применяются теории, качественно согласующиеся с данными натурных испытаний.

2.3.1. Оценка ресурса точечного сварного соединения по линейной гипотезе суммирования повреждений

Как правило, вибрационное нагружение сопровождается процессом накопления усталостных повреждений. Для оценки долговечности точечного сварного соединения с использованием линейной гипотезы суммирования повреждений необходимо получить временные реализации случайного процесса напряжений $\sigma(t)$ для наиболее нагруженных точек сварного шва, характеристики приведенной кривой усталости для точечного сварного соединения, а также максимальные уровни циклов напряжений σ_i и их количество. Для получения временных реализаций случайных процессов напряжений применяется статистическое моделирование, с использованием вероятностных характеристик процессов напряжений, полученных в результате моделирования динамического НДС (п.2.2).

Далее используются зависимости для спектральных плотностей напряжений $S_\sigma(\omega)$. Для каждого значения аргумента (времени) t , процесс $\sigma(t)$ моделируется разложением вида [1]:

$$\sigma(t) = \sum_0^N [S_\sigma(\omega_j) \Delta\omega_j]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_j' t + \alpha_j), \quad (2.1)$$

где ω_j – дискретные значения частоты на графике спектральной плотности напряжений, $S_\sigma(\omega_j)$ – соответствующие им значения спектральной плотности, $\omega_j' = (\omega_j + \delta\omega_j)$, $\delta\omega_j$ – случайные флуктуации частоты, определяемые как взаимно независимые случайные величины, равномерно распределенные в интервале $[-\Delta\omega/2, \Delta\omega/2]$ с плотностью вероятности $1/\Delta\omega$; α_j – независимые случайные величины, равномерно распределенные в интервале $[0, 2\pi]$, $\omega = 2\pi f$.

При увеличении количества слагаемых N распределение значений реализаций, полученных по алгоритму (2.1) приближается к нормальному распределению.

Моделирование реализаций проводится для точек сварного соединения с наибольшим уровнем напряжений. В узле сварной точки, в котором определено максимальное СКЗ напряжений, процесс напряжений $\sigma(t)$ является узкополосным. Поэтому, при моделировании можно рассматривать частотные интервалы, в которых расположены составляющие спектральной плотности напряжений, дающие основной вклад в суммарную дисперсию напряжений. В границах выделенных интервалов с шагом по частоте $\Delta\omega_j$ задаются значения ω_j и соответствующие им значения $S_\sigma(\omega_j)$. Шаг $\Delta\omega_j$ является переменным, значения аргументов ω_j сгущаются вблизи максимумов спектральной плотности. Для первого слагаемого суммы (2.1) принимается $\Delta\omega_1 = \omega_2 - \omega_1$. Для последующих слагаемых - $\Delta\omega_j = (\omega_j - \omega_{j-1})/2 + (\omega_{j+1} - \omega_j)/2$. Моделирование реализаций проводится отдельно для каждого частотного интервала с последующим суммированием значений $\sigma(t)$ в совпадающие моменты времени.

Для оценки усталостной долговечности конструкции, реализации случайных процессов напряжений, полученные в результате моделирования, схематизируются, т.е. приводятся к набору регулярных циклов эквивалентных по повреждающему действию случайному процессу [61].

Перед схематизацией процесса нагружения по любому из методов должно проводиться выделение экстремумов. Диапазон изменения нагрузок процесса $a_{max} = X_{max} - X_{min}$ разбивается равноудаленными уровнями нагрузок на классы шириной $\Delta = \frac{a_{max}}{m}$. Величина Δ отражает масштаб схематизации и показывает уровни нагрузки, соответствующие одному классу. Количество классов m выбирается из условия: $14 \leq m \leq 32$.

Соседние экстремумы, образующие размах меньше ширины класса, выделению не подлежат.

Последовательность нагрузок $\sigma(t)$ в схематизированном процессе может быть представлена последовательностью амплитуд нагружения, приведенных к симметричному циклу. Полученную последовательность нагрузок группируют по интервалам, образуя эмпирическое распределение частот повторения нагрузок – кривые повторяемости.

Для схематизации случайного процесса можно применять различные методы, такие как: метод максимумов, метод «дождя», метод полных циклов, метод пересечений, метод экстремумов, метод полусумм и полуразностей. Наиболее часто используемыми являются методы «дождя» и полных циклов, они же приводят к практически одинаковым результатам. Методы схематизации процессов нагружения регламентированы ГОСТ [62].

Предпочтительно для схематизации применять метод «дождя» (рис. 2.8), т.к. он более удобен для программирования и автоматизации процесса обработки экспериментальных данных. При схематизации по методу «дождя» ось времени направлена вертикально вниз, а ось напряжений горизонтально слева-направо. Линии, соединяющие соседние экстремумы – это последовательность «крыш», по которым стекают потоки дождя. Номерам максимумов соответствуют нечетные числа, номерам минимумов – четные.

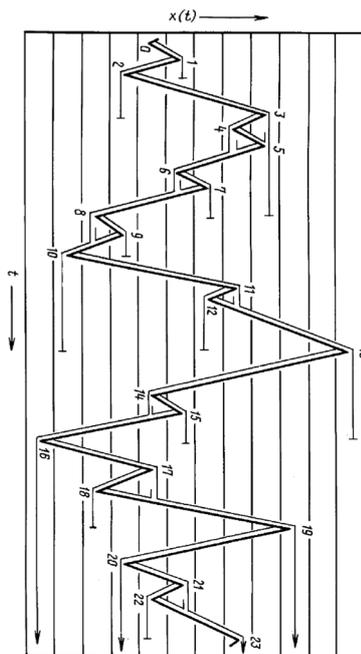


Рис. 2.8. Схематизация по методу «дождя»

Траектории потоков начинаются последовательно с внутренней стороны экстремумов, и каждый поток определяет полуцикл нагружения, соответствующий размаху напряжений цикла. Величину размаха определяют проекцией траектории потока на ось нагрузки. Общее число циклов определяется как половина числа размахов.

Поток, начавшийся в точке максимума, заканчивается в точке пересечения с большим максимумом, чем исходный. Аналогично поток, начавшийся в точке минимума, прерывается в точке пересечения с меньшим минимумом, чем исходный. При пересечении на одной из «крыш» нескольких потоков движение продолжает тот поток, который имеет начало в экстремуме с меньшим номером, а остальные потоки прерываются. Потоки, не встретившие препятствий на пути, падают на землю.

В результате схематизации процесса нагружения формируется распределение амплитуд симметричных циклов напряжений и строится кривая повторяемости амплитуд напряжений для временной реализации процесса (рис. 2.9). Здесь, по оси абсцисс отложено количество циклов напряжений, по оси ординат, соответствующие величины амплитуд напряжений.

Следующим шагом является построение приведенной кривой усталости для точечного сварного соединения. Усталостная кривая задается в полулогарифмических $\sigma_a - \lg N$ (рис. 2.10) или в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N$ (рис. 2.11). Характеристики кривой усталости обычно задаются для случая, представленного на рис. 2.11. Здесь N_G и σ_{N_G} - координаты точки пересечения двух прямых (ветвей кривой), σ_{N_G} - предел ограниченной выносливости, соответствующий числу циклов N_G , m_N и m_{N_I} - показатели наклона для левой и правой ветви кривой.

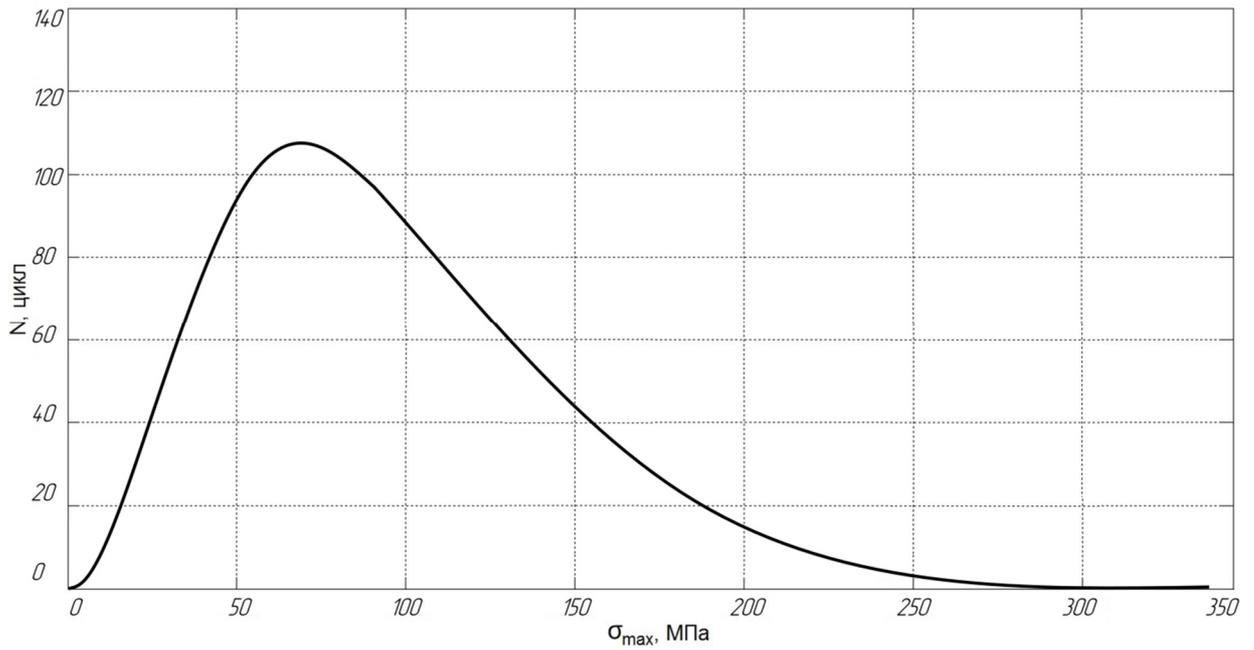


Рис. 2.9. Пример кривой повторяемости амплитуд напряжений

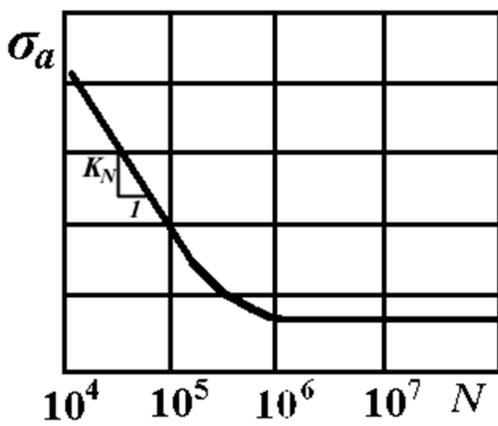


Рис. 2.10. Кривая усталости в полулогарифмических координатах

$$\sigma_a - \lg N$$

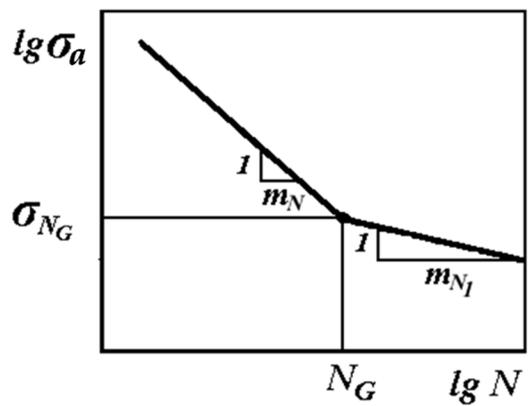


Рис. 2.11. Кривая усталости в двойных логарифмических координатах

координатах

$\lg \sigma_a - \lg N$ с двумя наклонными

ветвями

Если кривая задана в полулогарифмических координатах, то показатель наклона левой ветви кривой усталости к оси абсцисс:

$$K_N = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\lg N_1 - \lg N_2},$$

где (σ_1, N_1) и (σ_2, N_2) определяют координаты двух точек на кривой усталости на левой ветви.

В случае задания кривой в двойных логарифмических координатах, показатели наклона кривой для левой и правой ветви определяются уравнением:

$$m_N = m_{N_1} = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg \sigma_2 - \lg \sigma_1},$$

где m_N и m_{N_1} – показатели наклона для левой и правой ветви кривой соответственно.

Приведенная кривая усталости строится на основе характеристик кривой усталости для стандартного образца с учетом изменения свойств материала в сварном соединении и влияния различных факторов на сопротивление усталости.

Для приведенной кривой усталости принимается значение абсциссы точки перелома $N_{G,\Pi} = N_G$. Ордината точки перелома для приведенной кривой усталости $\sigma_{N_{G,\Pi}}$ определяется по формуле:

$$\sigma_{N_{G,\Pi}} = \frac{\sigma_{N_G}}{K}, \quad (2.2)$$

где $\sigma_{N_{G,\Pi}}$ – медианное значение предела ограниченной выносливости для элемента конструкции, σ_{N_G} – медианное значение предела ограниченной выносливости для стандартного образца, K – коэффициент снижения предела выносливости.

Для определения коэффициента K используется формула [63]:

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v \cdot K_A}. \quad (2.3)$$

Здесь K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений, $K_{d\sigma}$ – масштабный фактор, $K_{F\sigma}$ – коэффициент влияния шероховатости поверхности, K_v – коэффициент влияния поверхностного упрочнения, K_A – коэффициент анизотропии.

Общепринятым методом оценки усталостной долговечности является использование теории линейного суммирования усталостных повреждений [64], в которой вводится мера повреждения D , имеющая два определенных значения: $D = 0$ до начала нагружения и $D = 1$ при разрушении. Значение $D = 1$ в зависимости от требований к элементу конструкции может соответствовать первичному появлению макроскопической трещины, либо ее развитию до определенного размера, а также полному разрушению.

Ресурс, выраженный в количестве циклов нагружения, определяется из условия усталостного разрушения:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.4)$$

где n_i и N_i – количество число циклов наработки и количество циклов до появления усталостного разрушения при напряжении σ_i , k – число ступеней регулярных циклов напряжений. Значения n_i определяются по кривой повторяемости для временной реализации процесса.

Если циклическое нагружение чередуется случайным образом, то гипотеза линейного суммирования не всегда дает удовлетворительные результаты. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что сумма накопленных повреждений к моменту разрушения находится в некотором широком интервале от 0,1 до 10 и более [6, 65–66]. В связи с этим было проведено достаточно много экспериментальных исследований, целью которых являлась проверка и корректировка линейной гипотезы суммирования повреждений [67–68].

Для кривой усталости, аппроксимируемой двумя прямыми наклонными линиями, условие разрушения имеет вид:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = a_p, \quad a_p = \sum_{i=1}^k \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \cdot \frac{v_{i\sigma}}{v_{\sigma}^*},$$

где k – число ступеней амплитуд напряжения, σ_{ai} – среднее значение амплитуды напряжения для i -ой ступени, σ_{amax} – максимальное значение

амплитуды напряжения, $v_{i\sigma}$ – число повторений амплитуд напряжений σ_{a_i} , v_{σ}^* – суммарное число циклов.

Корректированная линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений была разработана на основе обобщения существующих экспериментальных данных и дает оценки, приближенные к этим данным. Поэтому оценка усталостной долговечности, определенная с использованием корректированной гипотезы, является более корректной, чем оценка по гипотезе линейного суммирования повреждений.

2.3.2. Оценка ресурса точечного сварного соединения на основе гипотезы спектрального суммирования

Одним из эффективных методов оценки долговечности является гипотеза спектрального суммирования усталостных повреждений, определяющая усталостное повреждение как сумму относительных чисел циклов. Использование этой гипотезы позволяет получить оценку долговечности для любого вида нагружения в том числе и для случайного, если каким-либо образом определено понятие циклов, суммой которых может быть представлено это нагружение.

Сложность применения линейной гипотезы суммирования повреждений при случайном нагружении возникает вследствие неопределенности в этом случае понятия цикла нагружения. Поэтому необходимо приводить реальный процесс нагружения к эквивалентному по вносимой повреждаемости регулярному циклическому нагружению с использованием различных методов [61–62] и с последующим построением кривых повторяемости.

Для вибрационных нагрузок, действующих на конструкцию авиационных изделий, характерным отличием является сложный спектральный состав. Определение долговечности от воздействия таких нагрузок с помощью линейной гипотезы суммирования повреждений при неопределенном ясном понятии цикла нагрузки может привести к существенным ошибкам.

Гипотеза спектрального суммирования позволяет установить непосредственную связь между характеристиками долговечности, т.е. времени до разрушения при воздействии случайных нагрузок и спектральными характеристиками случайного нагружения.

Рассматривается достаточно общий случай, в котором процесс напряжений $\sigma(t)$ является стационарным нормальным процессом с дисперсией D_σ и

непрерывной спектральной плотностью $\Phi(\omega)$ распределенной в конечном частотном диапазоне (рис. 2.12).

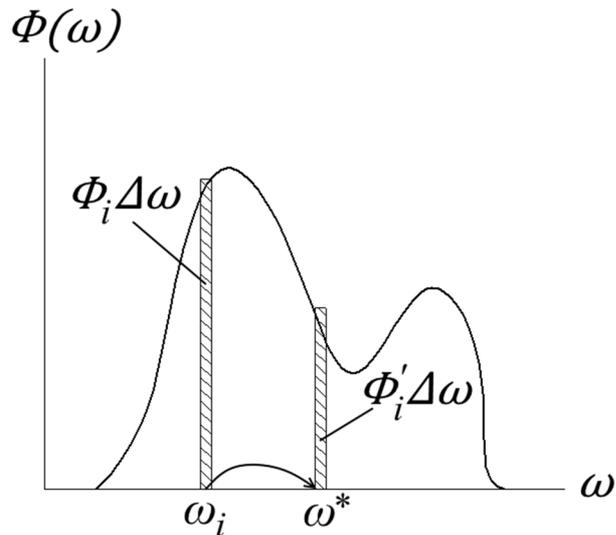


Рис. 2.12. Пример спектральной плотности

Проводится эквивалентная замена процесса нагружения с непрерывной спектральной плотностью (рис. 2.11) моногармоническим случайным процессом со спектральной плотностью $\Phi(\omega) = D\delta(\omega - \omega^*)$ на некоторой характеристической частоте ω^* и той же дисперсией D_σ . Для любого вида непрерывной спектральной плотности такая характеристическая частота ω^* должна существовать. Эквивалентность понимается в смысле равенства средних величин относительной усталостной повреждаемости вносимой этими процессами.

Эквивалентная замена основана на предположении о том, что при случайном нагружении с непрерывной спектральной плотностью, доля энергии процесса $\Phi_i \Delta\omega$ на частоте ω_i может быть заменена эквивалентной (по средней усталостной повреждаемости) долей энергии $\Phi'_i \Delta\omega$ на другой частоте, в частности на некоторой характеристической частоте ω^* . Изменение доли энергии $\Phi_i \Delta\omega$ при переходе с частоты ω_i на частоту ω^* , независимо от наличия и интенсивности других составляющих процесса, происходит в том же отношении, в каком изменяется спектральная плотность $\Phi(\omega) = D\delta(\omega - \omega_i)$ при переходе на

частоту ω^* с сохранением средней усталостной повреждаемости. Это предположение принято называть гипотезой спектрального суммирования усталостных повреждений [69–70].

Трансформация непрерывной спектральной плотности в дельта-функцию может быть проведена путем переноса доли энергии $\Phi_i \Delta\omega$ на частоту ω^* с соответствующей заменой значения $\Phi_i \Delta\omega$ величиной $\Phi_i' \Delta\omega$ (рис. 2.12). При этом трансформированный процесс $\sigma_{\omega^*}(t)$ будет также стационарным и нормальным и распределение его амплитуд σ_a подчиняется закону Рэлея:

$$f(\sigma_a) = \frac{\sigma_a}{D_\sigma} e^{(-\sigma_a^2 / 2D_\sigma)}.$$

Тогда для средней удельной (в единицу времени) усталостной повреждаемости ξ , характеризующей действие трансформированного случайного нагружения, можно записать выражение [69]:

$$\xi = \frac{\omega^*}{2\pi} F_{\omega^*}(D_\sigma),$$

где функция $F_{\omega^*}(D_\sigma)$ определяет повреждаемость за один приведенный цикл процесса напряжений с дисперсией D_σ :

$$F_{\omega^*}(D_\sigma) = \frac{1}{D_\sigma} \int \frac{\sigma_a}{N_{\omega^*}(\sigma_a)} \cdot e^{-\sigma_a^2 / 2D_\sigma} d\sigma, \quad (2.5)$$

В последнем выражении $N_{\omega^*}(\sigma_a)$ – количество циклов с амплитудой нагружения σ_a и с частотой ω^* до появления усталостного разрушения, определяемое по кривой усталости.

Медианная усталостная долговечность \bar{T} будет определяться соотношением:

$$\bar{T} = \frac{1}{\xi} = \frac{2\pi}{\omega^* F_{\omega^*}(D_\sigma)}. \quad (2.6)$$

Соотношение (2.6) дает возможность определить среднюю долговечность образца при его нагружении нормальным стационарным процессом с дисперсией D_σ и спектральной плотностью $S_\sigma(\omega)$, по известной кривой усталости.

Пусть кривая сопротивления усталости имеет вид:

$$N(\sigma_a)\sigma_a^m = C, \quad (2.7)$$

где $N(\sigma_a)$ количество циклов с амплитудой σ_a до появления усталостного разрушения. Тогда выражение (2.5) запишется в виде:

$$F(S_\sigma) = \frac{1}{CS_\sigma(\omega)} \int_0^{\sigma_{a,max}} \sigma_a^{m+1} e^{-\sigma_a^2/2S_\sigma} d\sigma_a, \quad (2.8)$$

Если принять, что зависимость (2.7) для кривой усталости справедлива во всем рассматриваемом диапазоне напряжений, т.е. амплитуды всех частотных составляющих процесса напряжений с высокой вероятностью ограничены пределом текучести материала, то интеграл в (2.8) без существенной погрешности можно вычислять на полубесконечном интервале ($0 \leq \sigma \leq \infty$). В этом случае соотношение (2.8) после интегрирования принимает вид:

$$F(S_\sigma) = S_\sigma(\omega)^{m/2} \frac{L(m)}{C}, \quad (2.9)$$

где $L(m) = (\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)$ - функция показателя наклона кривой усталости

(рис. 2.13), $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

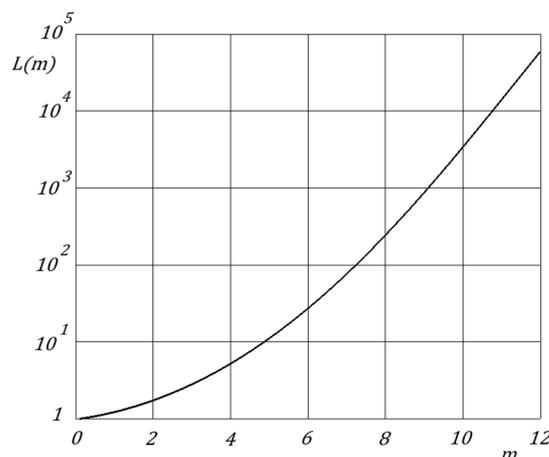


Рис. 2.13. График функции $L(m)$

Медианная усталостная долговечность \bar{T} в соответствии с (2.6) определится по формуле:

$$\bar{T} = \frac{2\pi}{\omega^* F_{\omega^*}(D_\sigma)} = \frac{2\pi C}{D_\sigma^{m/2} L(m) \left[\int_{\omega} \bar{S}_\sigma(\omega) \omega^{2/m} d\omega \right]^{m/2}}. \quad (2.10)$$

Соотношение для характеристической частоты ω^* с учетом (2.6) и (2.10) имеет вид:

$$\omega^* = \left(\int_{\omega} \bar{S}_\sigma(\omega) \omega^{2/m} d\omega \right)^{m/2}, \quad (2.11)$$

$\bar{S}_\sigma(\omega) = \frac{S_\sigma(\omega)}{D_\sigma}$ - нормированная спектральная плотность.

Так как $\int_{\omega} \bar{S}_\sigma(\omega) d\omega = 1$, то нормированная спектральная плотность в данном случае может рассматриваться как плотность распределения частот составляющих случайного процесса $\sigma(t)$. Тогда величина ω^* может рассматриваться как некоторое среднее значение частоты из интервала существования функции $\bar{S}_\sigma(\omega)$.

Глава 3. Реализация методики моделирования динамического и напряженного состояний тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении

Разработанная методика исследования динамического НДС тонкостенных конструкции с дискретными сварными соединениями реализована для конструкции авиационного изделия, содержащего дискретные сварные соединения, при действии случайного нагружения.

Построение геометрических моделей проведено с использованием программного комплекса SolidWorks, расчетные исследования – в модуле SolidWorks Simulation [31].

3.1. Моделирование точечного сварного соединения в сравнении с экспериментом

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 [12]. Образцы выполнены из листовой стали (сталь ЭИ-712 для одной полоски и сталь КВК-26 для другой) в виде соединения двух прямоугольных полосок шириной 25 мм и толщинами 2,5 мм и 2 мм. Образец для испытаний на отрыв состоял из двух П-образно согнутых полосок, длиной 80 мм, образец для испытаний на срез - из двух прямых полосок длиной 150 мм (рис. 3.1, 3.2). Испытания проводились на разрывной машине Zwick/Roell Z050. Одна из полосок закреплялась, к другой прикладывалась растягивающая сила, нарастающая до разрушения сварного соединения.

В качестве предельного (разрушающего) значения растягивающей силы, при моделировании принималась ее величина, при которой максимальная относительная деформация в сварной точке достигала 5%, что соответствует разрушающей характеристике материала. Величина разрушающего усилия для образца испытаний на отрыв – $P_{отр.} = 30,4$ кН, для испытаний на срез – $P_{ср.} = 6,9$ кН [12].

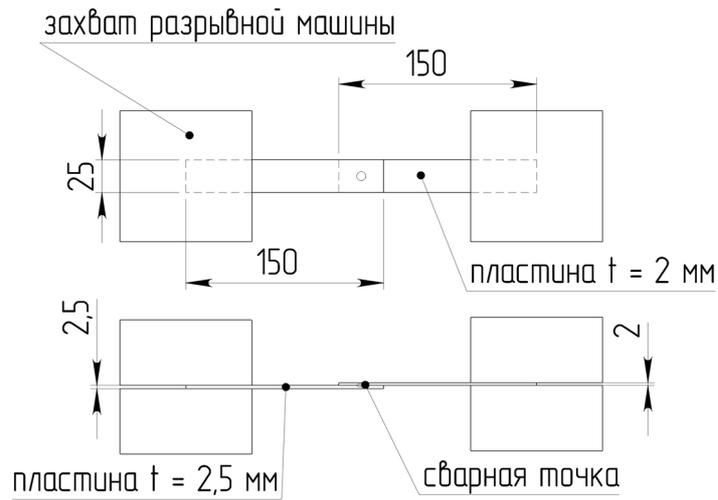


Рис. 3.1. Схема испытаний образцов на срез

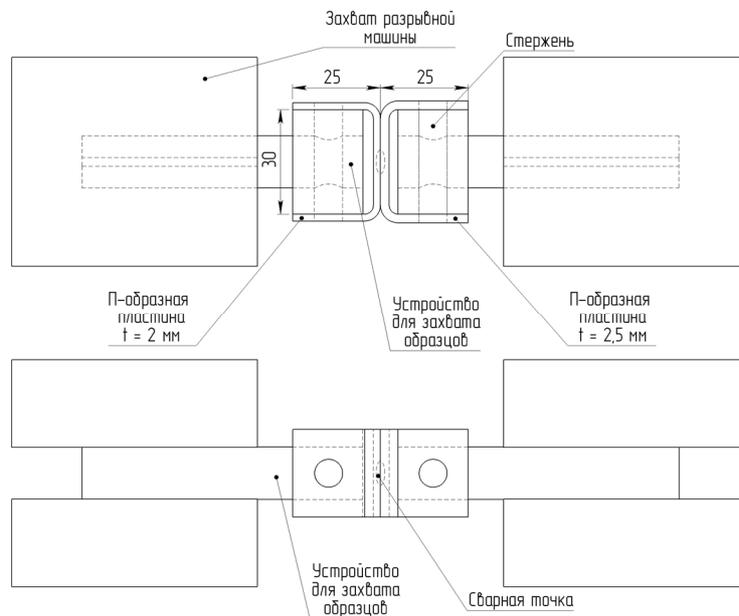


Рис. 3.2. Схема испытаний образцов на отрыв

Далее проводилось моделирование напряженного состояния испытываемых образцов [51]. КЭ модели образцов формировались с использованием объемных твердотельных элементов типа SOLID. Сварная точка моделировалась в виде двух отдельных полуэллиптических тел, каждое из которых разделено на три зоны (рис. 3.3). Здесь зона 1 – ядро, 2 – первая зона термического влияния, 3 – вторая зона термического влияния, 4 – основной материал. КЭМ сварной точки имеет характерный размер конечного элемента 0,2 мм, диаметр сварной точки

принимался равным 5 мм, что соответствовало реальному образцу. КЭМ сварной точки содержит около 14000 конечных элементов.

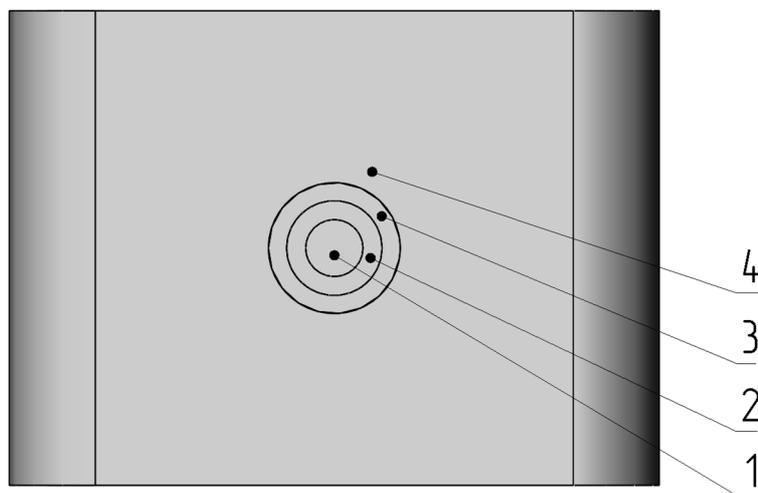


Рис. 3.3. Зоны сварной точки

Для материалов образцов принималась билинейная диаграмма деформирования (касательный модуль принимался приближенно и равен $E_t = E/100 = 2000$ МПа). Значения механических характеристик материалов в зоне сварных точек далее пересчитывались по характеристикам исходных материалов [12] на основе данных измерений микротвердости по сечению сварных точек [23, 71–72]. Для определения предела текучести использовалось соотношение между пределом текучести $\sigma_{0,2}$ и твердостью на пределе текучести $H_{0,2}$ [46]:

$$\sigma_{0,2} = c \cdot H_{0,2}, \quad (3.1)$$

где c - коэффициент пропорциональности, учитывающий переход от напряженного состояния на пределе текучести при растяжении к схеме напряженного состояния при вдавливании стального сферического индентора для измерения твердости [45–47]. Для относительно мягких металлов ($\sigma_{0,2} < 78,5 - 500$ МПа) коэффициент $c < 0,333$, для более твердых металлов ($\sigma_{0,2} > 500 - 3825$ МПа) коэффициент $c > 0,333$. Наиболее существенное увеличение коэффициента c наблюдается у металлов с пределом текучести больше 700 МПа [46]. Твердость на

пределе текучести $H_{0,2}$ в МПа определяется по ГОСТ 22762-77 (таблицы 1, 2) или вычисляется по формуле [45]:

$$H_{0,2} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = 156,9 \frac{P_{0,2}}{D^2},$$

в которой D – диаметр сферического индентора в мм, $P_{0,2}$ – сила вдавливания индентора на пределе текучести в Н, d – диаметр отпечатка в мм, P – нагрузка в Н, соответствующая диаметру отпечатка $d = 0,09 \cdot D$.

Аналогично пересчету твердости на пределе текучести, для определения предела прочности использовалось соотношение между временным сопротивлением σ_6 и твердостью материала по Бринеллю HB [46–47]:

$$\sigma_B = c \cdot HB, \quad (3.2)$$

где c – коэффициент пропорциональности, учитывающий переход от напряженного состояния на пределе прочности к схеме напряженного состояния при вдавливании стального сферического индентора для измерения твердости [46–47]. Здесь коэффициент c определяется так же как коэффициент c для определения предела текучести в формуле (3.1).

Твердость по Бринеллю HB определяется по ГОСТ 22761-77 (приложение 2) или вычисляется по формуле [73]:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

в которой D – диаметр сферического индентора в мм, P – сила вдавливания индентора в кгс, d – диаметр отпечатка в мм.

Характер изменения микротвердости (HV) [72] по диаметральному сечению сварных точек показан на рис. 3.4.

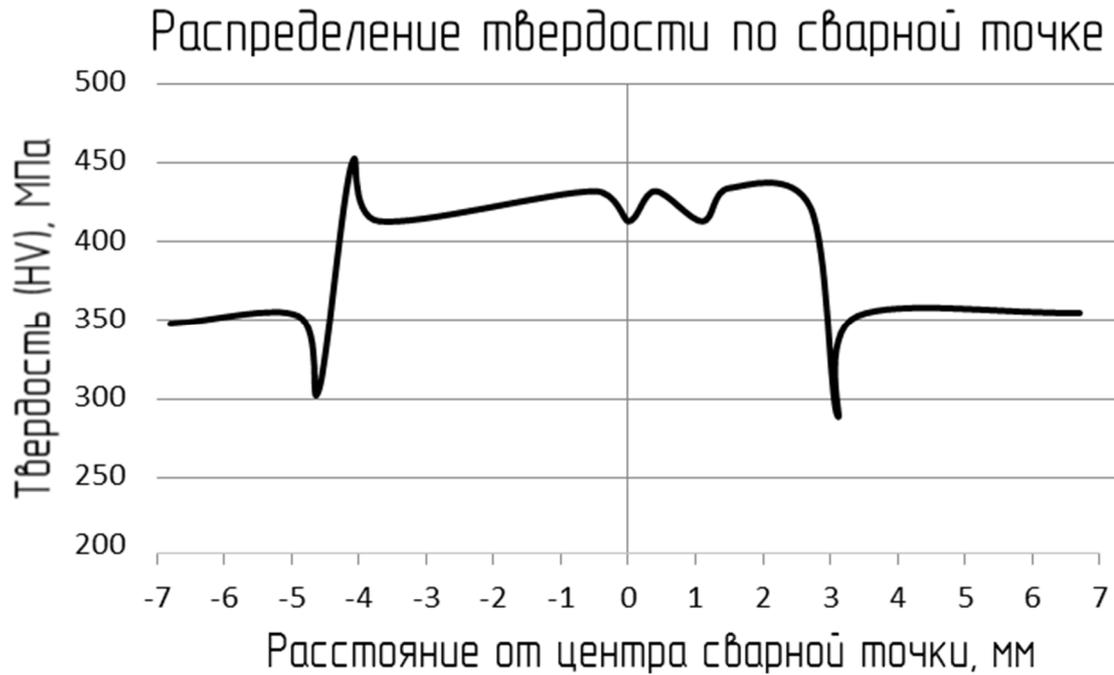


Рис. 3.4. Изменение микротвердости (HV) по сечению сварной точки

По данному распределению твердости были определены величины коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 для пересчета твердости на пределе текучести и пределе прочности для зоны термического влияния – 1, для зоны термического влияния – 2 и для зоны ядра сварной точки соответственно. Коэффициенты пересчета определялись как отношение осредненных значений твердости на кривой в каждой зоне сварной точки к значению твердости основного материала:

$$K_{1,2,3} = \frac{H_{cp_1,2,3}}{H}. \quad (3.3)$$

Для рассматриваемых материалов коэффициенты пересчета равны: $K_1 = 1,006$, $K_2 = 0,850$, $K_3 = 1,217$. Далее с использованием этих коэффициентов и формулам (1) и (2) пересчитывалась твердость материала на пределе текучести в различных зонах точечного сварного соединения:

$$H_{02_1,2,3} = H_{02} \cdot K_{1,2,3}, \quad (3.4)$$

$$H_{06_1,2,3} = H_{06} \cdot K_{1,2,3}, \quad (3.5)$$

Здесь $H_{02_1,2,3}$ величины твердости на пределе текучести для каждой зоны, $H_{06_1,2,3}$ величины твердости на пределе прочности для каждой зоны, $K_{1,2,3}$ - соответствующие коэффициенты пересчета.

По формулам (1) и (2) получен приведенный предел текучести и предел прочности материалов в соответствующих зонах точечного сварного соединения. Для расчета предела текучести коэффициент пропорциональности c принимался равным 0,406 для стали 1 и 0,434 для стали 2 [12]. Для пересчета предела прочности материалов c принимался равным 0,346 [46–47].

Характеристики материалов образцов [12], в различных зонах сварных точек (рис. 3.3), полученные в результате пересчета представлены в таблице:

Таблица 3.1

Зона сварной точки	ЭИ-17				КВК-26			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$\sigma_{0,2}$, МПа	1255	876	1037	1030	1551	1083	1282	1275
σ_B , МПа	1532	1070	1267	1200	1830	1278	1513	1500

Для образца, который испытывался на отрыв, в силу двойной симметрии образца и условий нагружения моделировалась четверть образца (рис. 3.5). Максимальные относительные эквивалентные деформации получены на контуре сварной точки в материале с толщиной 2 мм (рис. 3.6). Предельная деформация 5%, соответствующая разрушению материала, на контуре сварной точки достигалась при усилии отрыва 6,97 кН, что имеет хорошее соответствие с результатами экспериментального исследования [12].

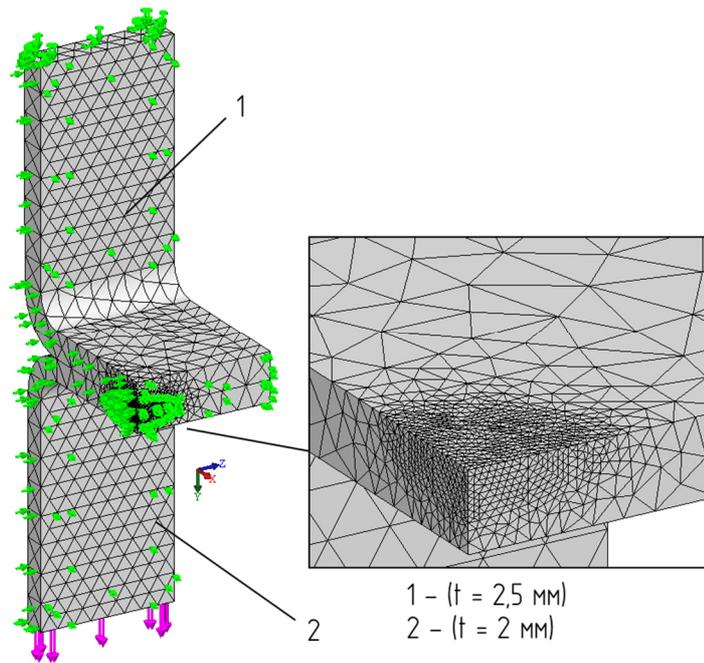


Рис. 3.5. КЭ модель образца для испытаний на отрыв

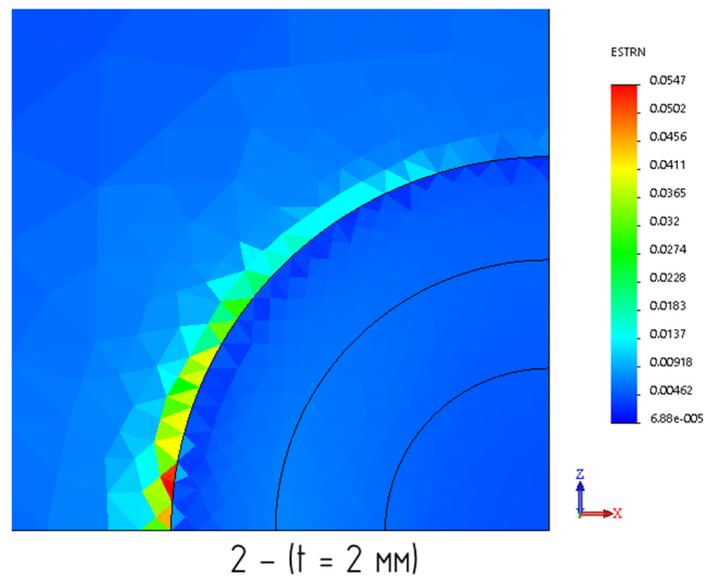


Рис. 3.6. Уровни относительных эквивалентных деформаций в образце на отрыв

КЭМ образца для испытаний на срез строилась аналогично модели образца для испытаний на отрыв. В силу симметрии моделировалась половина образца (рис. 3.7). Максимальные значения касательных напряжений, соответствующие значению $0,65 \cdot \sigma_{\text{в}}$, получены на контуре сварной точки в материале толщиной 2,5

мм при достижении нагрузки 26,7 кН (рис. 3.8).

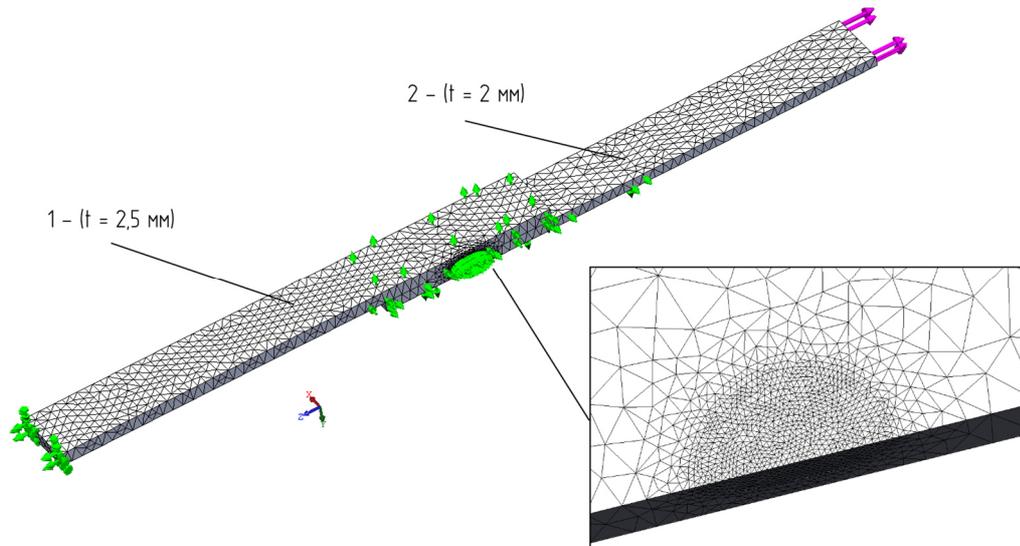


Рис. 3.7. Расчетная модель образца на срез

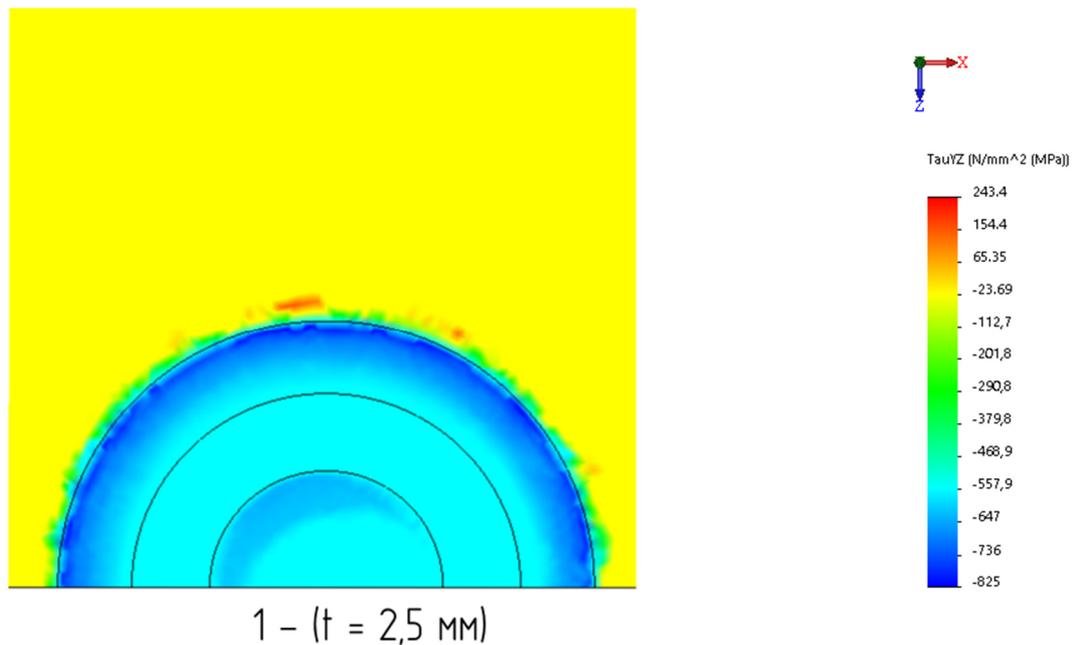


Рис. 3.8. Уровни касательных напряжений в сварной точке

Получено хорошее соответствие результатов моделирования дискретного сварного соединения с экспериментальными данными. Относительное расхождение значений предельных нагрузок, полученных в эксперименте и при численном моделировании для рассматриваемых случаев нагружения, составляет: для образцов на отрыв – 1%, для образцов на срез – 12%.

3.2. Моделирование конструкции авиационного изделия с точечными сварными соединениями

Рассматривается несущая конструкция авиационного изделия, которая представляет собой стальную тонкостенную цилиндрическую оболочку, содержащую упругие наполнители в форме цилиндров различной плотности. Длина оболочки $L = 5300$ мм, внешний диаметр $D = 200$ мм, обечайки $t = 1,2$ мм. На оболочке также закреплены два узла подвески изделия к носителю (бугели), через которые передаются случайные кинематические нагрузки.

Условия закрепления соответствуют реальному соединению изделия с носителем: задний по полету узел подвески жестко закреплен по всем направлениям, а передний может смещаться только в направлении продольной оси изделия.

На оболочке с помощью точечной сварки закреплены четыре плоскости расположенные крестообразно и симметрично относительно вертикальной плоскости под углом ± 45 градусов (рис. 3.9). Диаметр сварной точки $d = 5$ мм. Такой диаметр сварной точки выбирался исходя из данных испытаний конструкции на статическую прочность.

Плоскость представляет собой штампованный каркас с обшивкой из тонкостенных листов стали, с массивными элементами в корне, а также кронштейнов, с помощью которых крепится к оболочке посредством точечного сварного соединения.

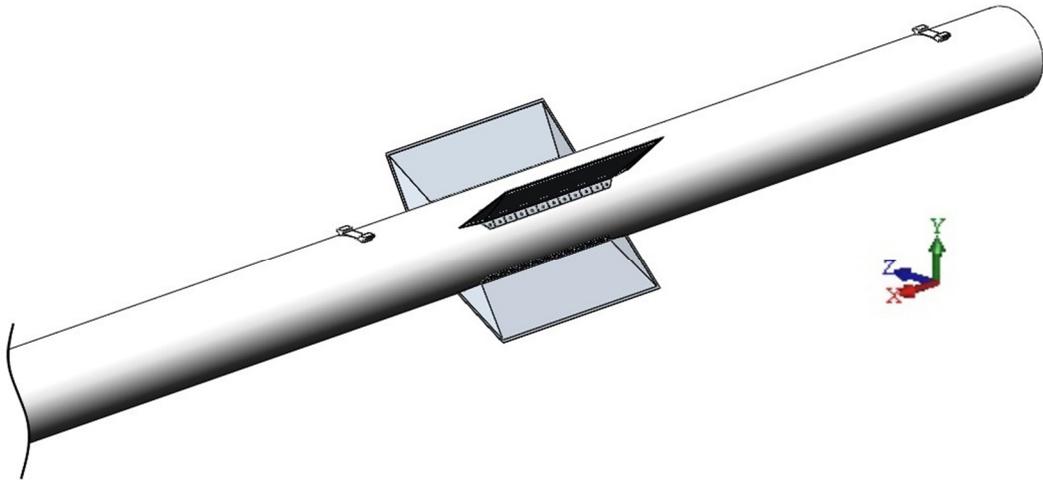


Рис. 3.9. Модель несущей конструкции

В качестве глобальной системы координат принята прямоугольная правосторонняя система координат. Ось X совпадает с продольной осью изделия и направлена по полету, ось Y направлена вверх.

Механические характеристики материалов агрегатов конструкции представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Деталь конструкции	Материал	Механические характеристики
Обечайка	Жаропрочная сталь	$E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, $\sigma_B = 1275$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1080$ МПа, $\rho = 7850$ кг/м ³
Бугель, плоскость	Сталь 30 ХГСА	$E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, $\sigma_B = 980$ МПа, $\sigma_{0,2} = 833$ МПа, $\rho = 7850$ кг/м ³ , $H_{0,2} = 2230$ МПа
Наполнитель 1	Упругий материал 1	$E = 4,9$ МПа, $\mu = 0,45$, $\rho = 1630$ кг/м ³ , $\sigma_B = 6$ МПа
Наполнитель 2	Упругий материал 2	$E = 4,9$ МПа, $\mu = 0,45$, $\rho = 1720$ кг/м ³ , $\sigma_B = 6$ МПа

Здесь E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, σ_b – предел прочности, $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, $H_{0,2}$ – твердость на пределе текучести.

Точечное сварное соединение плоскостей с оболочкой выполнено в виде двух однорядных сварных швов (рис. 3.10). Каждая из плоскостей содержит 24 сварных точки.

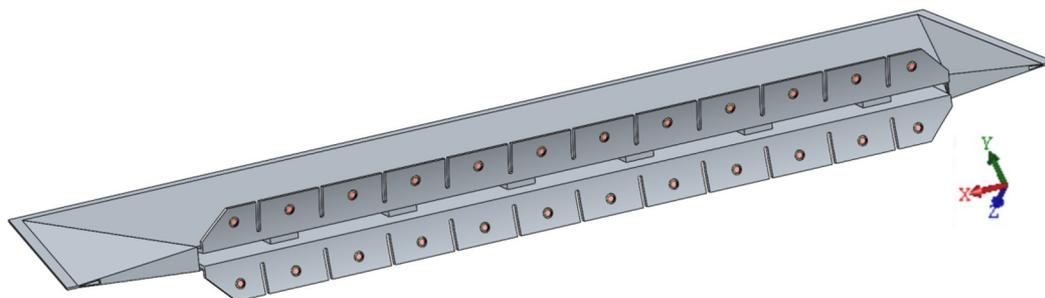


Рис. 3.10. Точечные сварные швы на плоскости

Каждая сварная точка формируется в виде сочетания трех цилиндрических тел, моделирующих ядро, первую и вторую зоны термического влияния (рис. 3.11). В модели плоскости, по местам точечных сварных соединений, формируются сквозные отверстия и заполняются цилиндрическими телами, причем плоскость имеет цилиндрические грани по месту стыковки к оболочке, так же как и цилиндрические тела, составляющие сварную точку. Для каждого цилиндрического тела путем пересчета номинальных характеристик материала для плоскости (табл. 3.2.1) определены значения механических характеристик. Для цилиндрических тел приняты следующие размеры, соответствующие размерам реальной сварной точки: 1 – ядро $d = 3$ мм, 2 – первая зона термического влияния $d = 4$ мм, 3 – вторая зона термического влияния $d = 5$ мм.

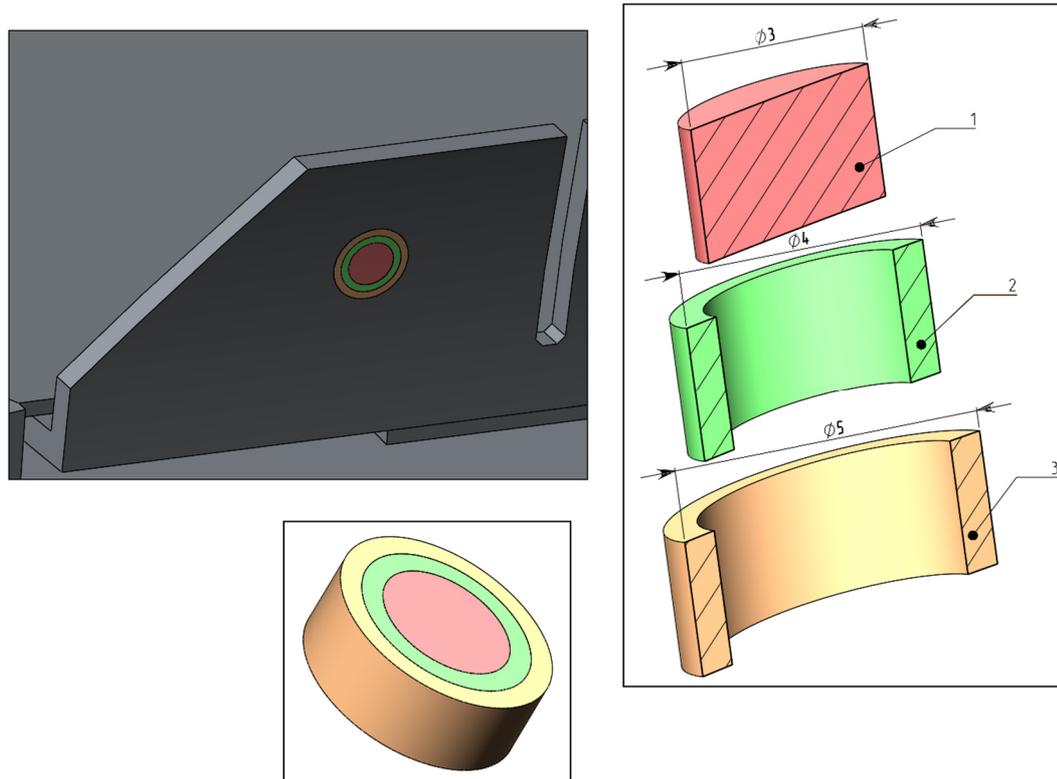


Рис. 3.11. Модель сварной точки

Механические характеристики для зон сварной точки определялись как средние значения распределения твердости по сечению сварной точки $H_{cp_{1,2,3}}$, а твердость для основного материала H (рис. 3.12) [23]:

$$H = 120 \text{ МПа,}$$

$$H_{cp_1} = 234,2 \text{ МПа,}$$

$$H_{cp_2} = 142,1 \text{ МПа,}$$

$$H_{cp_3} = 126,3 \text{ МПа.}$$

Далее определяются коэффициенты пересчета твердости материала для трех зон сварной точки $K_{1,2,3}$ (3.2):

$$K_1 = 234,2/120 = 1,95,$$

$$K_2 = 142,1/120 = 1,18,$$

$$K_3 = 126,3/120 = 1,05.$$

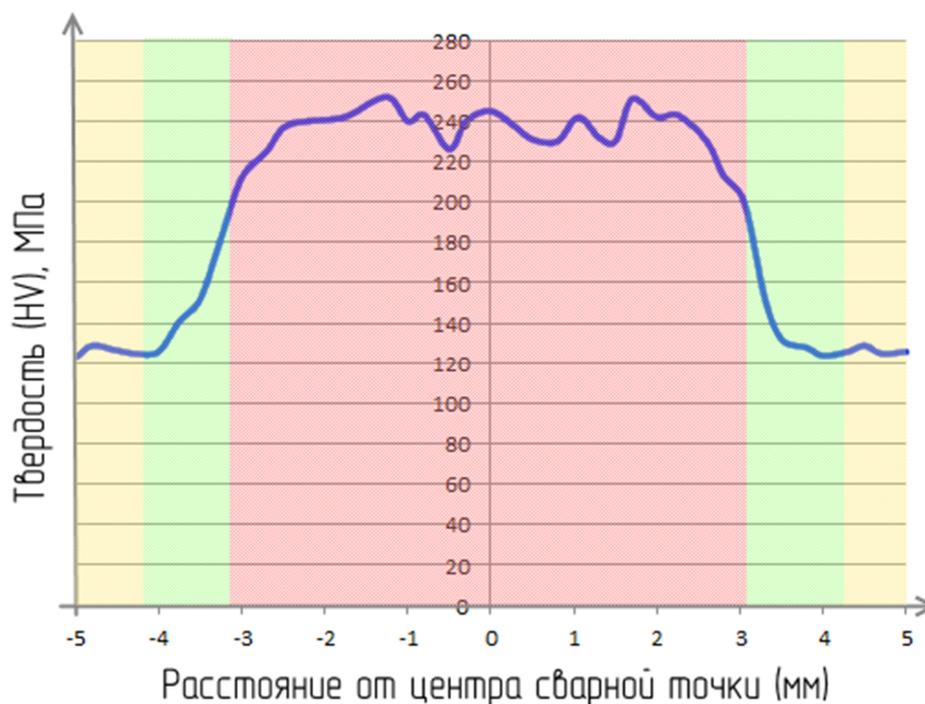


Рис. 3.12. Распределение твердости по сварной точке

По формуле (3.4) определяется твердость на пределе текучести для зон сварной точки:

$$H_{02_1} = 2230 \cdot 1,95 = 4348,5 \text{ МПа},$$

$$H_{02_2} = 2230 \cdot 1,18 = 2631,4 \text{ МПа},$$

$$H_{02_3} = 2230 \cdot 1,05 = 2341,5 \text{ МПа}.$$

По соотношению между пределом текучести $\sigma_{0,2}$ и твердостью на пределе текучести $H_{0,2}$ (3.1) для материала плоскости, определяется предел текучести для каждой зоны сварной точки (коэффициент пропорциональности c определяется как отношение предела текучести материала плоскости к его твердости на пределе текучести [46–47], $c = 833/2230 = 0,374$):

$$\sigma_{0,2_1} = 0,374 \cdot 4348,5 = 1626,3 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{0,2_2} = 0,374 \cdot 2631,4 = 984,1 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{0,2_3} = 0,374 \cdot 2341,5 = 875,7 \text{ МПа}.$$

После вычисления механических характеристик для сварных точек, создается КЭМ тонкостенной авиационной конструкции, содержащей точечные сварные соединения. Полученные механические характеристики материалов

присваиваются к каждой сварной точке на плоскости, также присваиваются механические характеристики материалов для всех деталей конструкции.

КЭМ тонкостенной авиационной конструкции, содержащей точечные сварные соединения, создается с генерацией сетки в автоматическом режиме с ручной корректировкой размеров КЭ для составляющих модели конструкции. Конструкция моделируется на основе комбинированной сетки КЭ (рис. 3.13), объединяющей элементы оболочки и твердотельные элементы: обечайка моделируется оболочечными параболическими шестиузловыми КЭ типа SHELL, все остальные составляющие конструкции моделируются твердотельными параболическими десятиузловыми элементами типа SOLID. Параметры КЭМ сведены в таблицу 3.3.

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

Максимальный размер КЭ для сварных точек составляет – 0,7 мм. При выборе размера КЭ более 1 мм на внешней грани сварной точки появляются элементы с большим соотношением сторон тетраэдра, что приводит к вычислительным ошибкам. Каждая сварная точка содержит до 526 КЭ, из которых до 107 элементов лежат на поверхности, в месте соединения с оболочкой (рис. 3.14).

Таблица 3.3

Тип сетки	Комбинированная сетка
Макс. размер элемента	50 мм
Мин. размер элемента	10 мм
Всего узлов	348246
Всего элементов	190603
Размер элементов сварных точек	0,7 мм

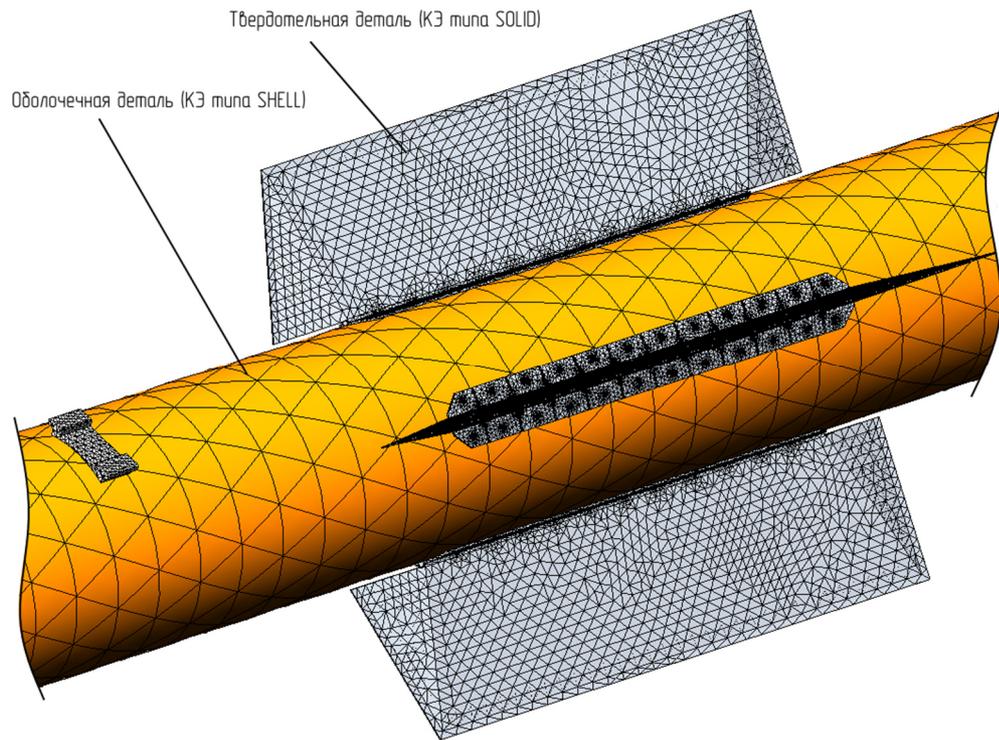


Рис. 3.13. Комбинированная сетка КЭ

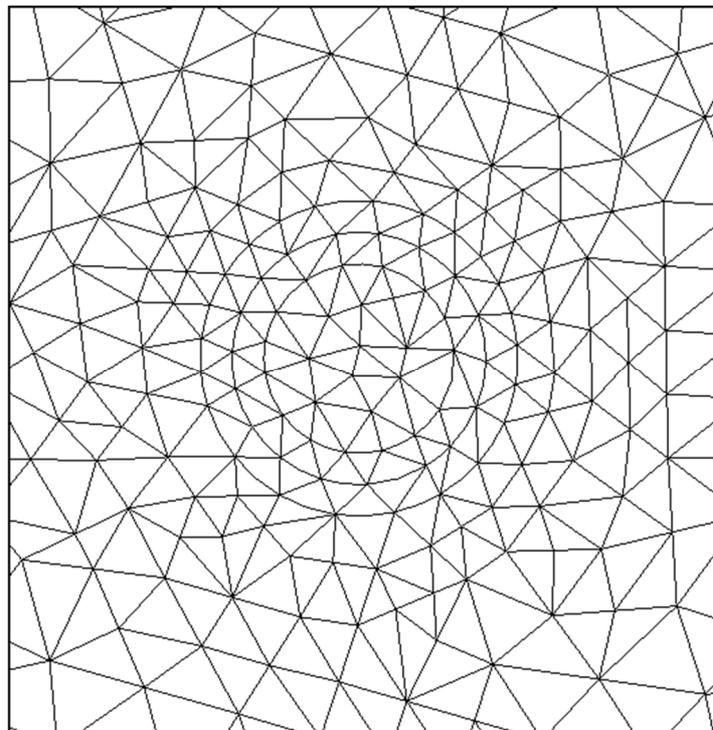


Рис. 3.14. Сетка КЭ на сварной точке

Объединение деталей твердотельной модели точечного сварного соединения в единое целое проводится по соприкасающимся между собой граням с помощью контакта типа Bonded («связанные»), который исключает взаимные относительные перемещения между контактирующими поверхностями. Аналогичным образом сварные точки объединяются с отверстиями в плоскости по цилиндрическим граням. Между прилегающими друг к другу поверхностями плоскости и обечайки, вокруг «связанных» граней (сварных точек), задается условие Free contact («свободный контакт»), которое не устанавливает ограничений на относительное движение контактирующих граней.

3.3. Моделирование динамического НДС тонкостенной авиационной конструкции с дискретными сварными соединениями

После построения расчетной КЭМ, проводится динамический расчет конструкции с применением алгоритмов модального анализа для случайных процессов. В этом типе анализа используется разложение вектора узловых перемещений в ряд по собственным формам и последующее решение системы.

Модель имеет закрепление по узлам подвески: задний по полету узел подвески жестко закреплен по всем направлениям, а передний может смещаться только в направлении продольной оси изделия.

Расчеты выполнены для случая нагружения, при котором колебания конструкции вызываются кинематическим возбуждением в узлах подвески в форме стационарного случайного процесса ускорения с заданной спектральной плотностью. Расчетная модель тонкостенной авиационной конструкции, содержащей точечные сварные соединения, представлена на рис. 3.15.

Спектральная плотность нагружения задана по точкам в виде ломаной линии. Рассматривается модель процесса ускорения, соответствующая реальному эксплуатационному нагружению в диапазоне частот (0 – 190) Гц (рис. 3.16).

Для тонкостенной авиационной конструкции, содержащей точечные сварные соединения, рассчитывалось 60 собственных частот и форм колебаний. Выбранного количества частот достаточно для охвата 90% ЭММ в каждом из трех направлений – X , Y , Z от общей массы системы [53–56].

Полученные в результате модального анализа частоты сведены в таблицу 3.4, формы колебаний с наибольшим вкладом по ЭММ представлены на рисунках 3.17 – 3.28. Соответствующие рассчитанным частотам и формам величины ЭММ в процентах представлены в таблице 3.5.

Демпфирование конструкции задается как модальное демпфирование, которое определяется как некоторая доля C_{md} (коэффициент модального

демпфирования) от критического демпфирования C_{cr} для каждой формы колебаний. Коэффициенты демпфирования для каждой частоты задаются по таблице 2.2.1, промежуточные значения вычисляются линейной интерполяцией.

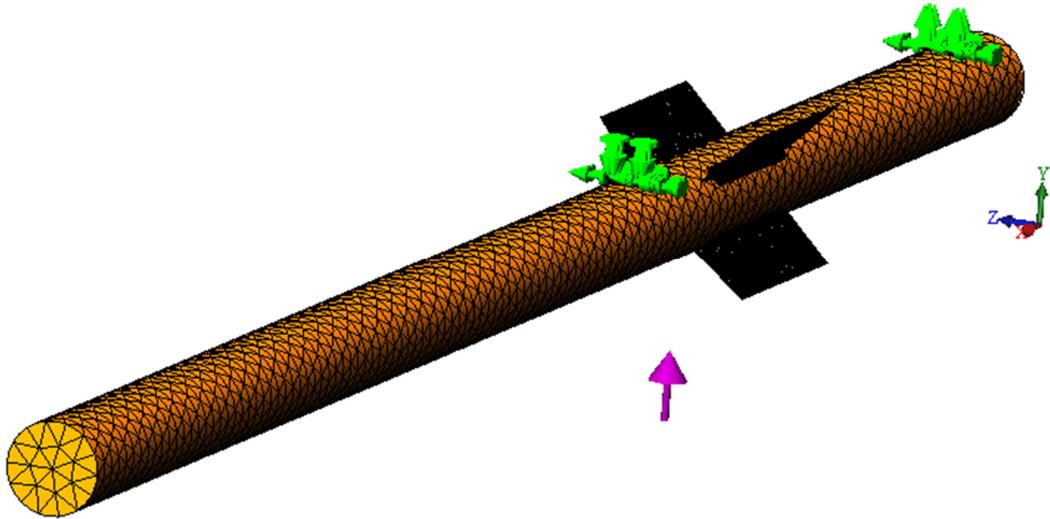


Рис. 3.15. Расчетная модель конструкции

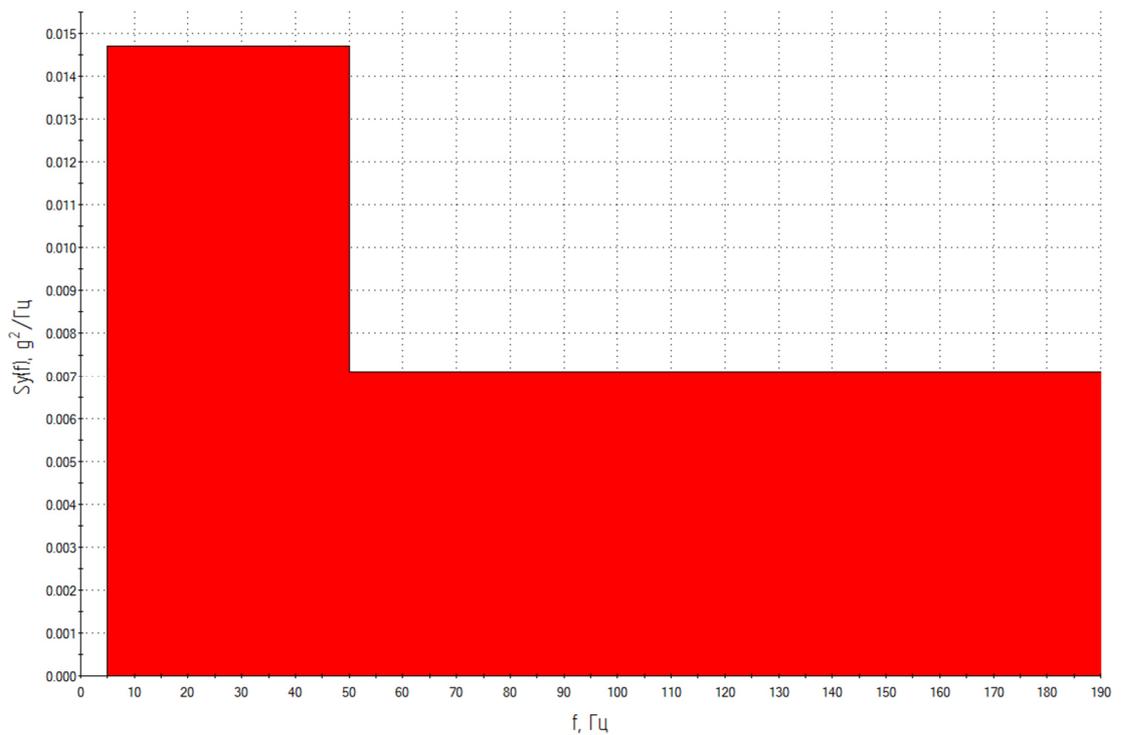


Рис. 3.16. Спектральная плотность ускорения

Таблица 3.4

№	ω , рад/с	f, Гц	№	ω , рад/с	f, Гц	№	ω , рад/с	f, Гц
1	37,411	5,9542	21	845,15	134,51	41	1129,9	179,82
2	37,715	6,0025	22	864,47	137,59	42	1136,3	180,85
3	69,882	11,122	23	872,84	138,92	43	1158,6	184,39
4	229,07	36,457	24	883,52	140,62	44	1167,4	185,8
5	252,13	40,128	25	933,74	148,61	45	1169,2	186,08
6	264,26	42,059	26	938,53	149,37	46	1172	186,53
7	428,89	68,261	27	997,77	158,8	47	1174,3	186,9
8	491,47	78,22	28	1000,1	159,17	48	1175,2	187,04
9	510,09	81,184	29	1001,1	159,32	49	1176,2	187,2
10	648,97	103,29	30	1013,5	161,3	50	1180,2	187,83
11	650	103,45	31	1021,6	162,59	51	1181,1	187,98
12	711,44	113,23	32	1023,4	162,87	52	1182,9	188,26
13	739,04	117,62	33	1029,6	163,87	53	1183	188,28
14	743,47	118,33	34	1070,1	170,31	54	1183,6	188,38
15	762,68	121,38	35	1084,4	172,58	55	1184	188,44
16	788,56	125,5	36	1088,7	173,27	56	1184,8	188,56
17	802,24	127,68	37	1091,2	173,67	57	1186,5	188,83
18	819,35	130,4	38	1092,8	173,92	58	1188,5	189,16
19	834,5	132,81	39	1104,4	175,77	59	1189,9	189,38
20	839,49	133,61	40	1108,9	176,48	60	1190,2	189,43

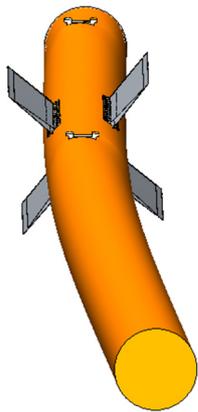


Рис. 3.17. Форма колебаний 1 (5,95 Гц)

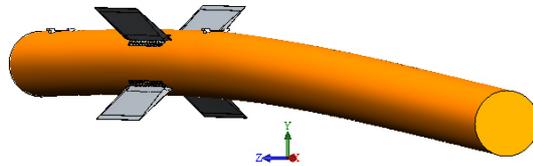


Рис. 3.18. Форма колебаний 2 (6,00 Гц)

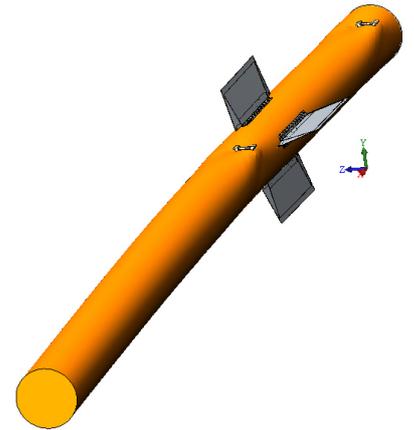


Рис. 3.19. Форма колебаний 3 (11,12 Гц)

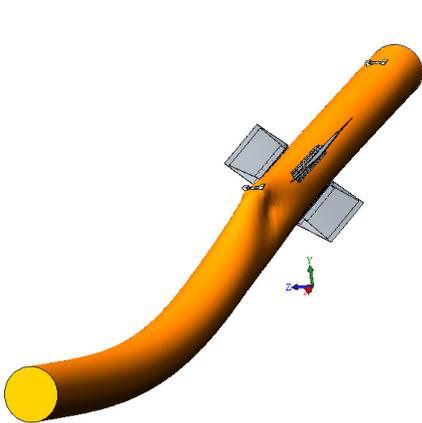


Рис. 3.20. Форма колебаний 4 (36,46 Гц)

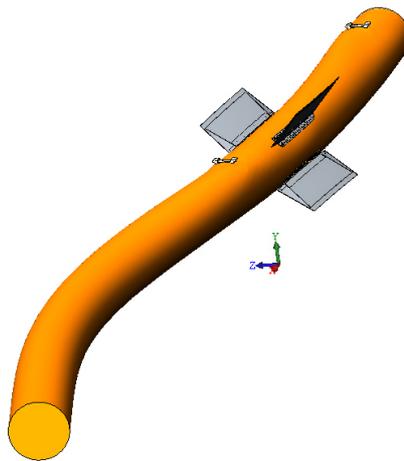


Рис. 3.21. Форма колебаний 5 (40,13 Гц)

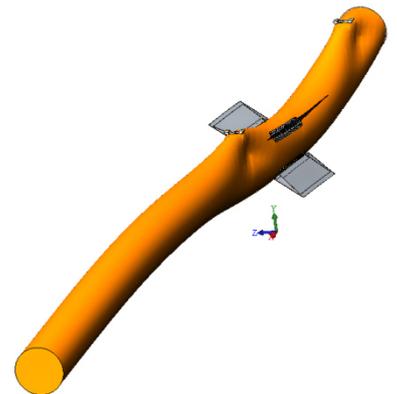


Рис. 3.22. Форма колебаний 6 (42,06 Гц)

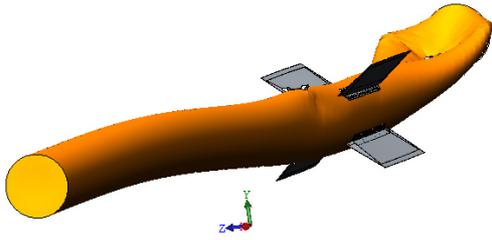


Рис. 3.23. Форма колебаний 7
(68,26 Гц)

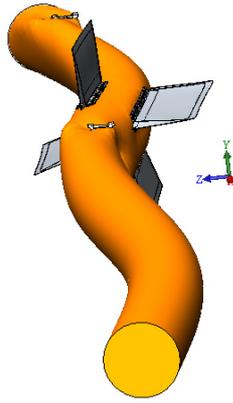


Рис. 3.24. Форма колебаний 8
(78,22 Гц)

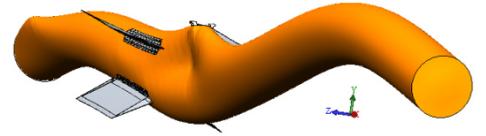


Рис. 3.25. Форма колебаний 9
(81,18 Гц)

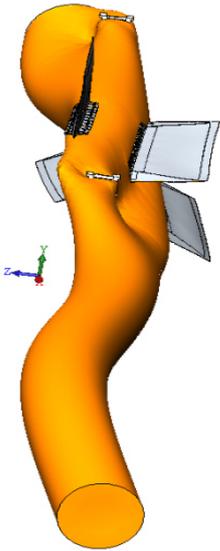


Рис. 3.26. Форма колебаний 10
(103,29 Гц)

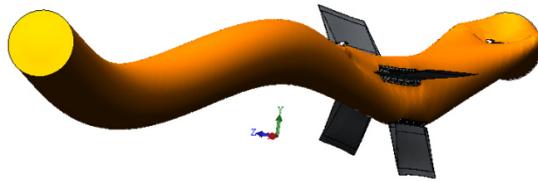


Рис. 3.27. Форма колебаний 11
(103,45 Гц)

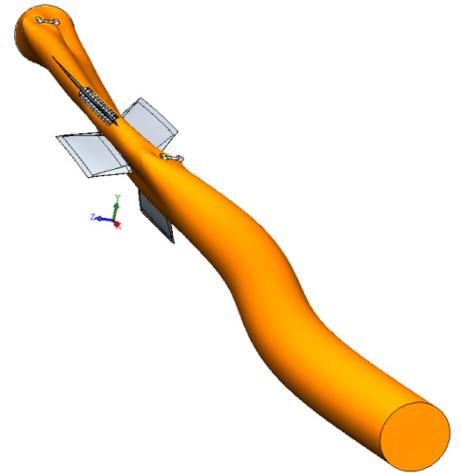


Рис. 3.28. Форма колебаний 12
(113,23 Гц)

Таблица 3.5

	f, Гц	Величина ЭММ по оси, %			№	f, Гц	Величина ЭММ по оси, %		
		X	Y	Z			X	Y	Z
1	5,95	0,0002	1,123	42,592	31	162,59	0,00000003	0,022	0,0002
2	6	0,008	28,225	1,598	32	162,87	0,00001	0,0003	0,031
3	11,12	0,0001	0,001	26,960	33	163,87	0,405	0,0002	0,0000003
4	36,46	0,037	16,272	0,001	34	170,31	0,0004	0,232	0,0002
5	40,13	0,0002	0,003	0,109	35	172,58	0,103	0,172	0,0002
6	42,06	4,916	42,928	0,0001	36	173,27	0,085	0,040	0,0003
7	68,26	43,378	6,223	0,002	37	173,67	0,0001	0,0001	0,186
8	78,22	0,031	0,0003	11,58	38	173,92	0,011	0,002	0,001
9	81,18	24,326	0,228	0,005	39	175,77	0,139	0,034	0,0001
10	103,29	2,482	0,195	0,372	40	176,48	0,000002	0,0001	0,165
11	103,45	9,297	0,791	0,101	41	179,82	0,001	0,001	0,00001
12	113,23	0,00004	0,00000001	3,054	42	180,85	0,061	0,641	0,00001
13	117,62	0,008	0,258	0,001	43	184,39	0,0002	0,00004	0,115
14	118,33	0,000003	0,0001	1,919	44	185,8	0,00003	0,014	0,032
15	121,38	2,325	0,002	0,00003	45	186,08	0,004	0,006	0,022
16	125,5	0,046	0,0005	0,00000003	46	186,53	0,001	0,0003	0,059
17	127,68	0,002	0,0003	0,059	47	186,9	0,002	0,0004	0,002
18	130,4	0,000	0,000001	0,00000004	48	187,04	0,00001	0,000001	0,0004
19	132,81	0,472	0,001	0,055	49	187,2	0,0005	0,001	0,297
20	133,61	0,503	0,0003	0,079	50	187,83	0,003	0,007	0,001
21	134,51	0,018	0,0004	0,082	51	187,98	0,0003	0,0001	0,0001
22	137,59	0,587	0,218	0,001	52	188,26	0,002	0,000004	0,0005
23	138,92	0,001	0,0001	0,000004	53	188,28	0,0002	0,0001	0,008
24	140,62	2,557	0,030	0,0002	54	188,38	0,00005	0,001	0,005
25	148,61	0,00002	0,0000001	0,462	55	188,44	0,00004	0,000002	0,003
26	149,37	0,019	0,00003	0,0002	56	188,56	0,0004	0,00002	0,00001
27	158,8	0,000001	0,00003	0,001	57	188,83	0,00001	0,00001	0,016
28	159,17	0,0003	0,001	0,0005	58	189,16	0,0001	0,00003	0,005
29	159,32	0,00004	0,0003	0,004	59	189,38	0,0005	0,0001	0,001
30	161,3	0,0002	0,0000003	0,0000004	60	189,43	0,00003	0,00002	0,087
Сумма:						91,83	97,67	90,08	

Для анализа случайных колебаний задано количество частотных точек, характеризующих плавность распределения интервала между двумя соседними частотами, равное 10. Используется метод интегрирования, при котором все

частотные точки равномерно распределены между собственными частотами. Модальные реакции распределения энергии случайного процесса (спектральные плотности) рассчитываются в каждой частотной точке и численно интегрируются в пределах частотного диапазона (0 – 190) Гц, в результате чего будут получены их СКЗ. Далее модальные реакции преобразуются в узловые, что позволяет получить СКЗ перемещений, скоростей, ускорений и напряжений в каждом узле КЭМ.

В результате анализа случайных колебаний определены СКЗ, спектральные плотности и дисперсии эквивалентных напряжений (по теории Мизеса) в точечном сварном соединении. Получено, что в силу симметрии условий кинематического нагружения изделия, уровни напряжений для всех плоскостей одинаковы.

Наиболее нагруженными местами в конструкции являются области вблизи узлов подвески, здесь максимальные значения эквивалентных СКЗ напряжений достигают $\sigma_{\max} = 286$ МПа (рис. 3.29).

Наибольшие уровни напряжений в сварном шве наблюдаются на поверхности крайних сварных точек [74], близких к переднему узлу подвески [75] (рис. 3.30). Максимальные значения СКЗ напряжений имеют место 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. На рис. 3.31 – 3.32 показаны диаграмма распределения СКЗ эквивалентных напряжений по точкам сварного шва. Диаграмма построена для верхнего ряда сварного шва, представленного на рис. 3.30, отсчет точек ведется слева направо. Распределение напряжений в зоне наиболее нагруженной сварной точки является существенно неравномерным (рис. 3.33 – 3.36).

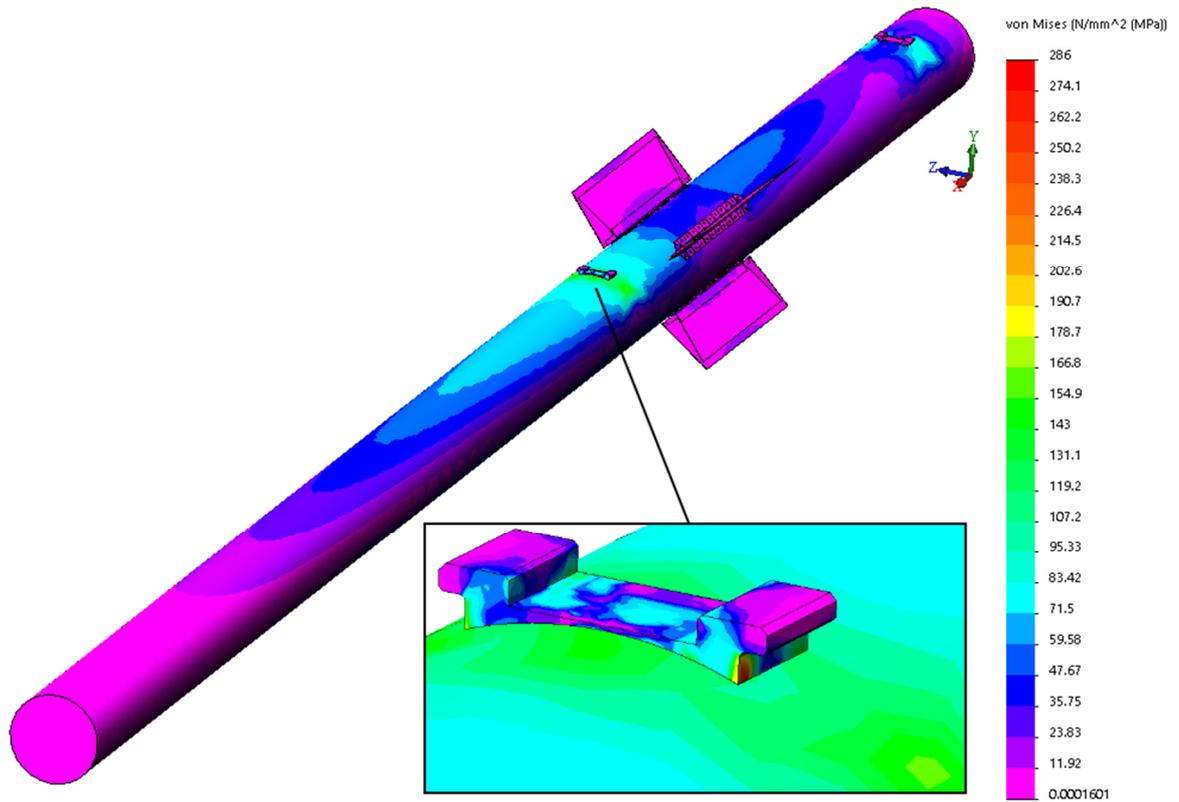


Рис. 3.29. Распределение СКЗ напряжений в КЭМ конструкции

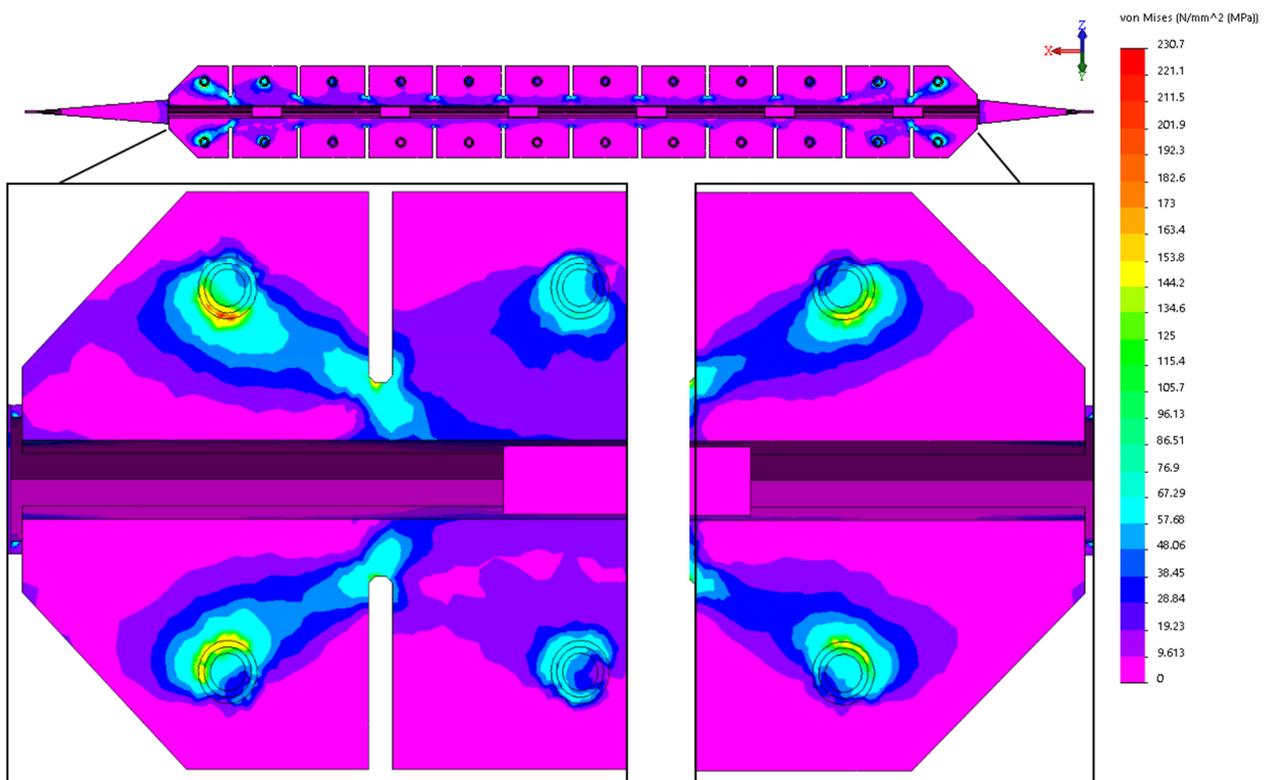


Рис. 3.30. Распределение СКЗ напряжений по сварному шву на плоскости

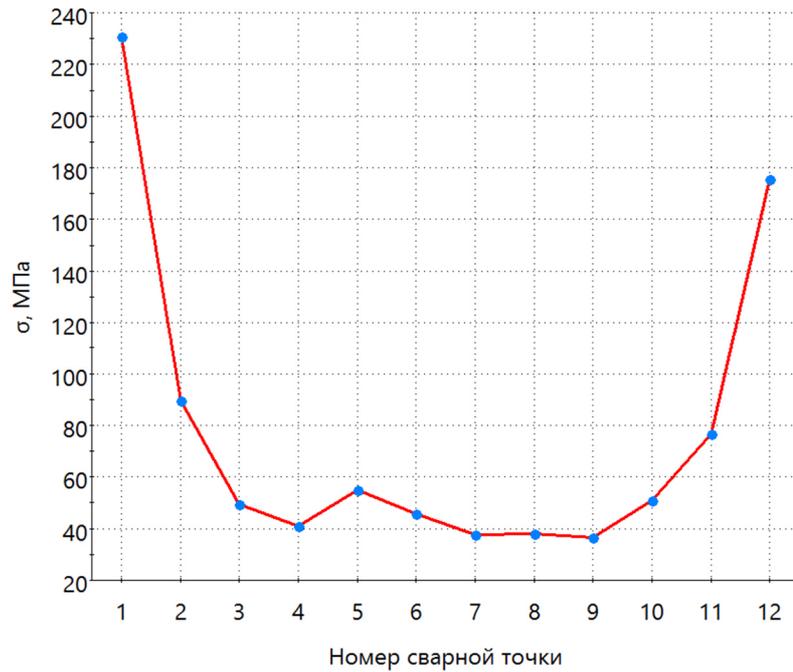


Рис. 3.31. Диаграмма распределения СКЗ напряжений по сварному шву на плоскости

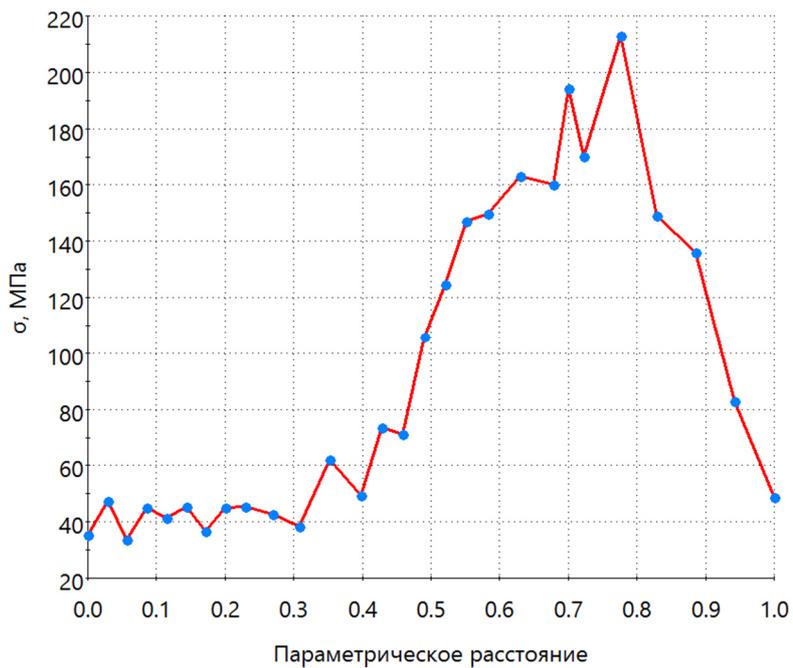


Рис. 3.32. Диаграмма распределения СКЗ напряжений по контуру сварной точки

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

статического нагружения, представленного в разделе 3.1 данной работы, а также с данными публикаций [12, 24–25, 28, 42, 48-50, 72, 76], в которых на основании экспериментов показано, что разрушение в сварной точке чаще всего происходит именно вблизи ее контура с образованием трещин или с вырывом более тонкого материала по периметру сварной точки.

Получена спектральная плотность эквивалентных СКЗ напряжений $S_{\sigma}(f)$ (по теории Мизеса) в наиболее напряженном узле сварной точки (узел 232603) (рис. 3.37). Спектральная плотность эквивалентных СКЗ напряжений в полулогарифмическом масштабе представлена на рис. 3.38. Пиковые значения на спектральной плотности соответствуют собственным частотам конструкции.

Распределение дисперсии эквивалентных напряжений $D_{\sigma}(f)$ по частотному диапазону для узла 232603 представлено на рис. 3.39. По зависимостям рис. 3.37-3.39 видно, что процесс напряжений является узкополосным, видно, что основной вклад в дисперсию напряжения вносят ее составляющие, соответствующие двум низшим собственным формам.

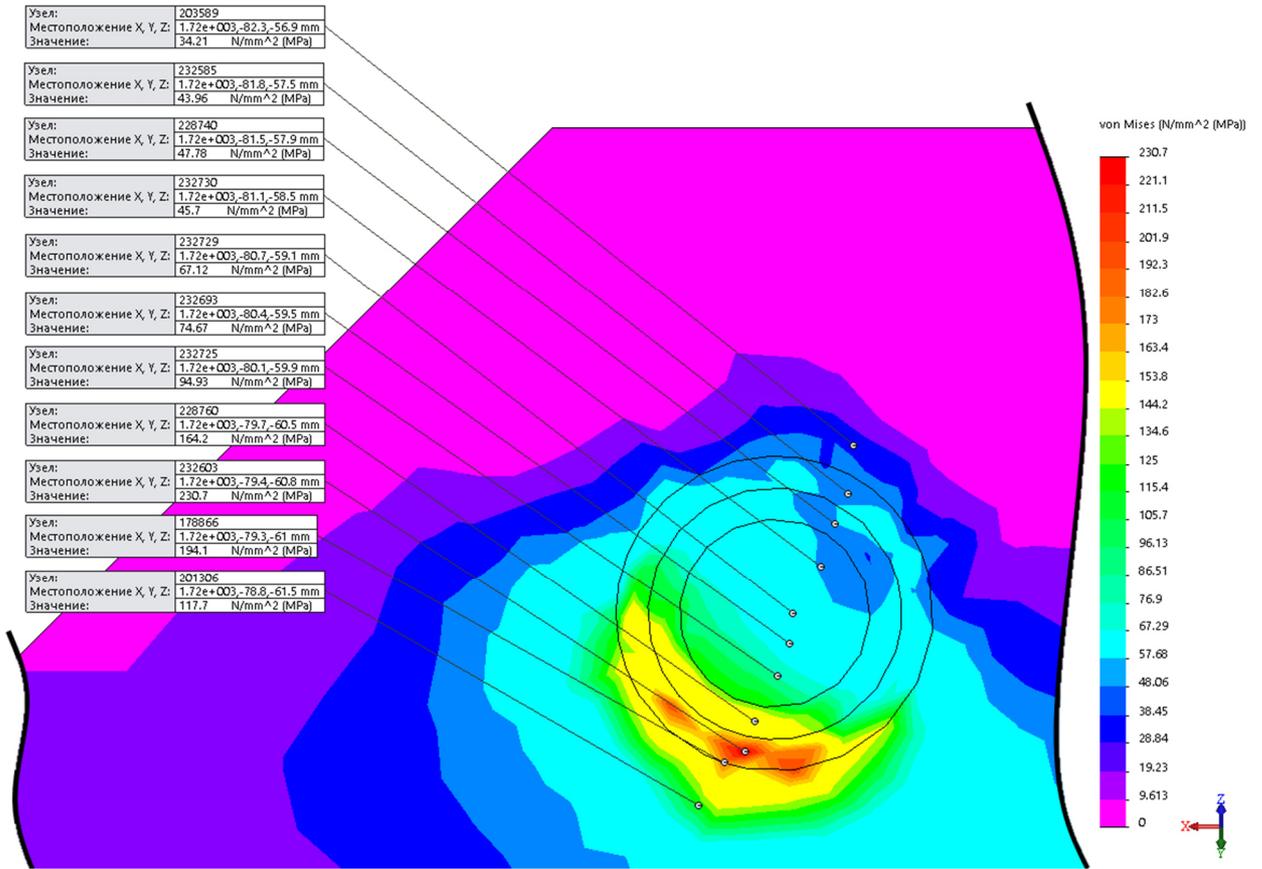


Рис. 3.33. Распределение СКЗ напряжений в наиболее нагруженной сварной точке

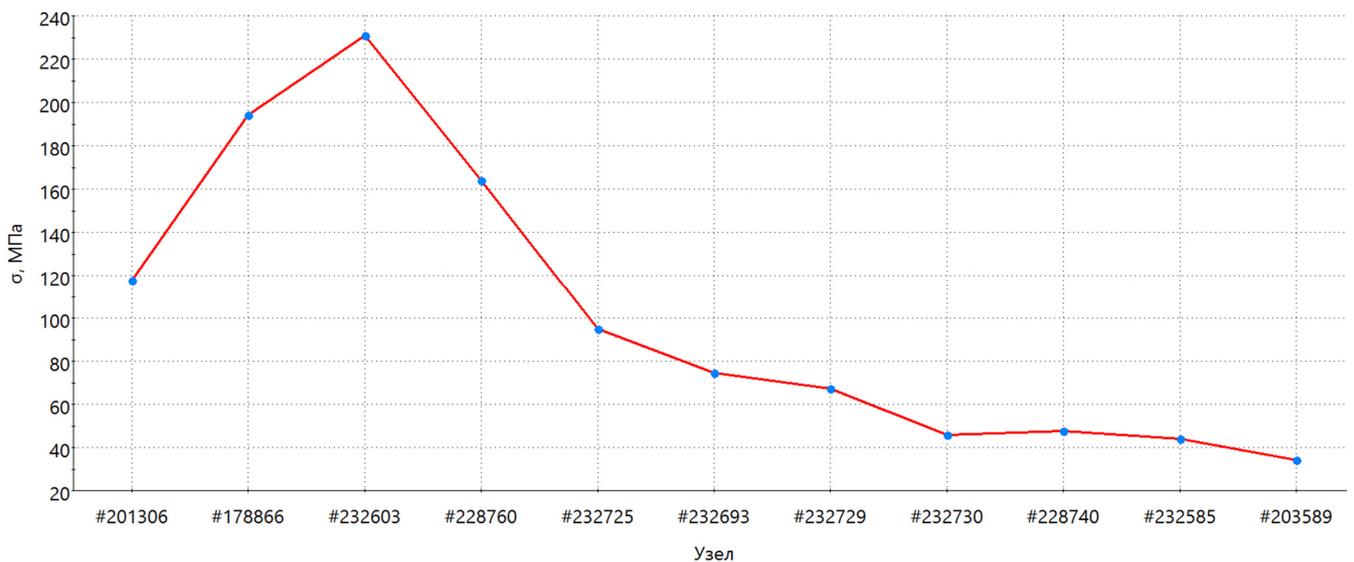


Рис. 3.34. График распределения СКЗ напряжений в наиболее нагруженной сварной точке

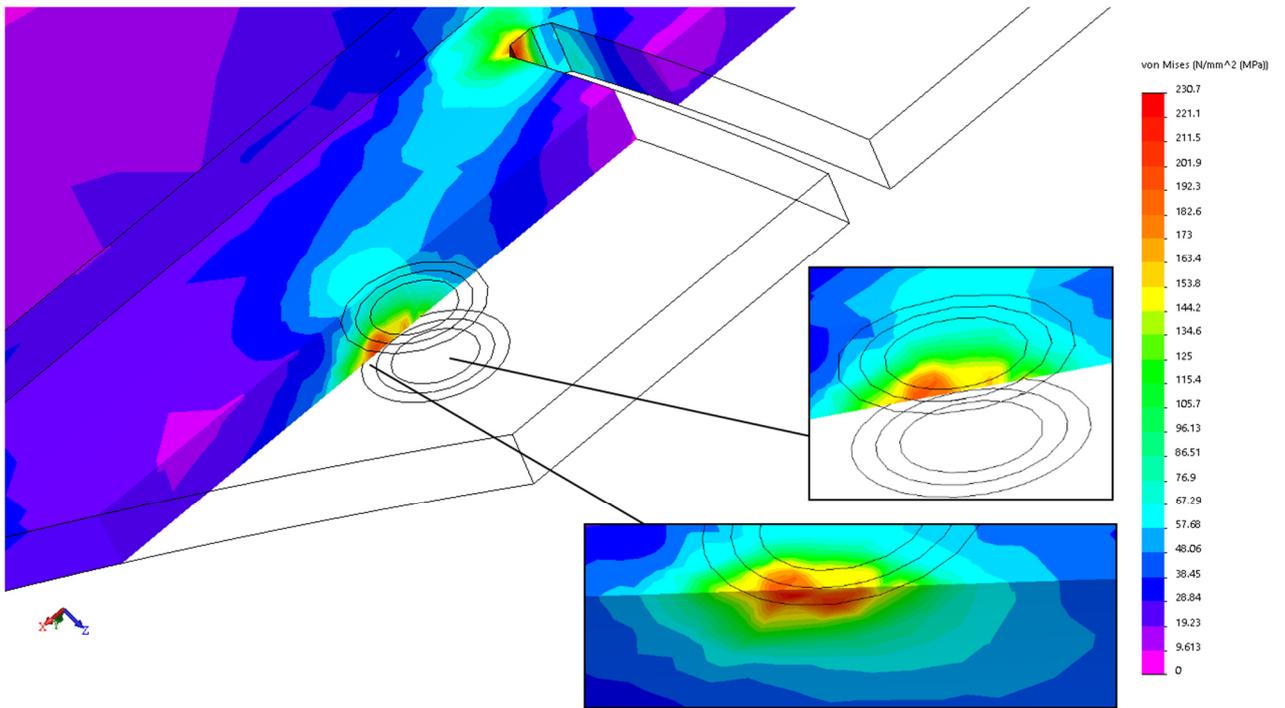


Рис. 3.35. Распределение СКЗ напряжений по наиболее нагруженной сварной точке. Сечение 1

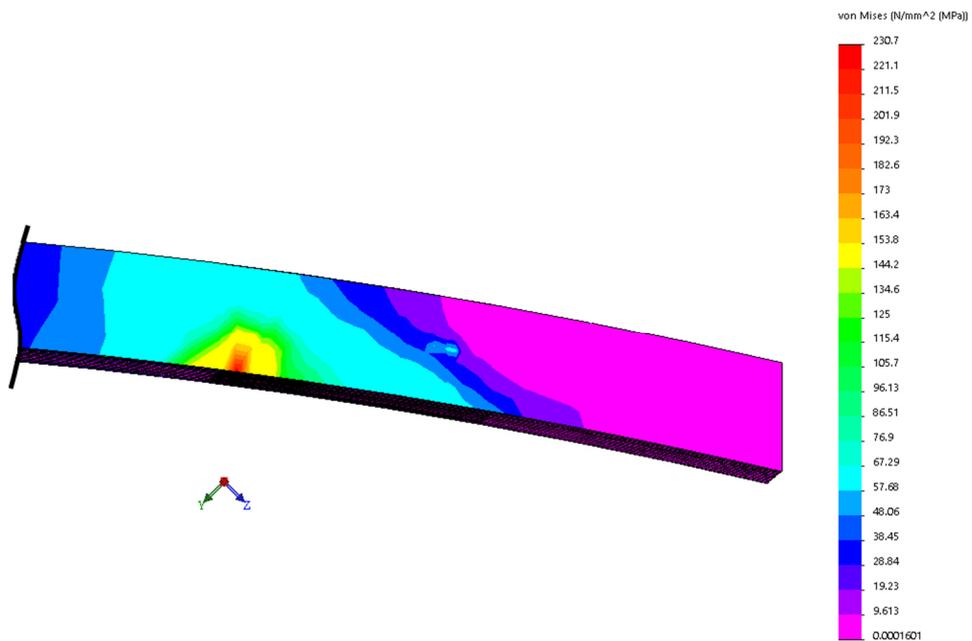


Рис. 3.36. Распределение СКЗ напряжений по наиболее нагруженной сварной точке. Сечение 2

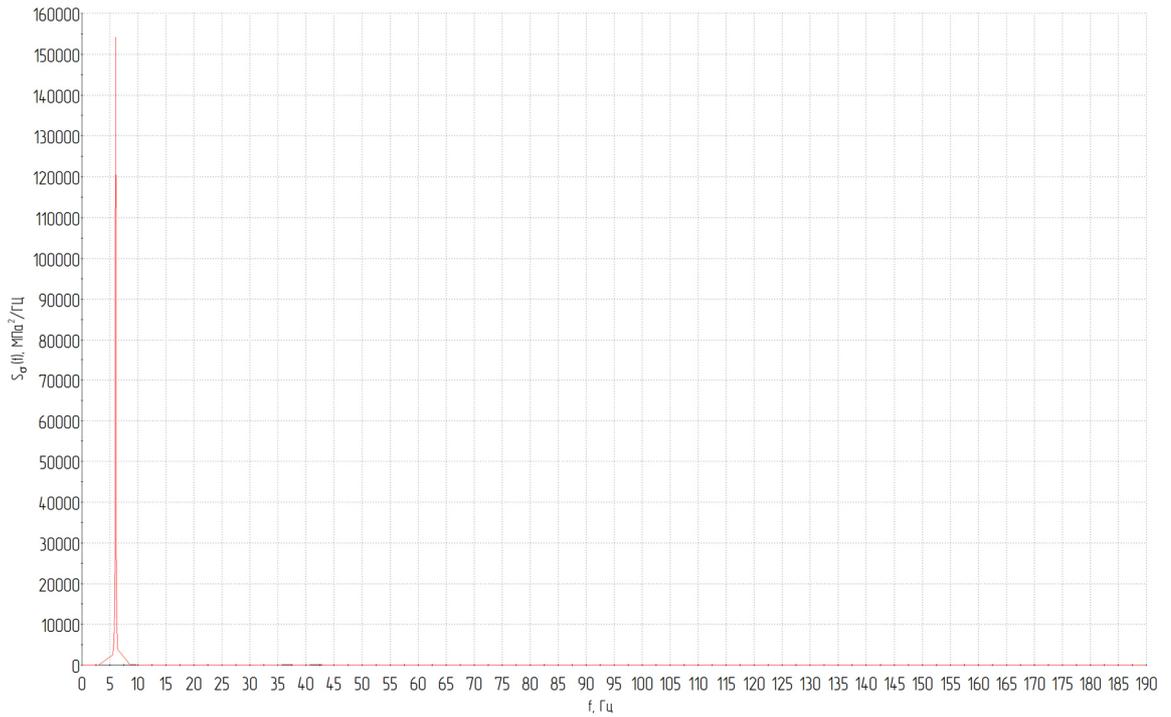


Рис. 3.37. Спектральная плотность эквивалентных напряжений (узел 232603)

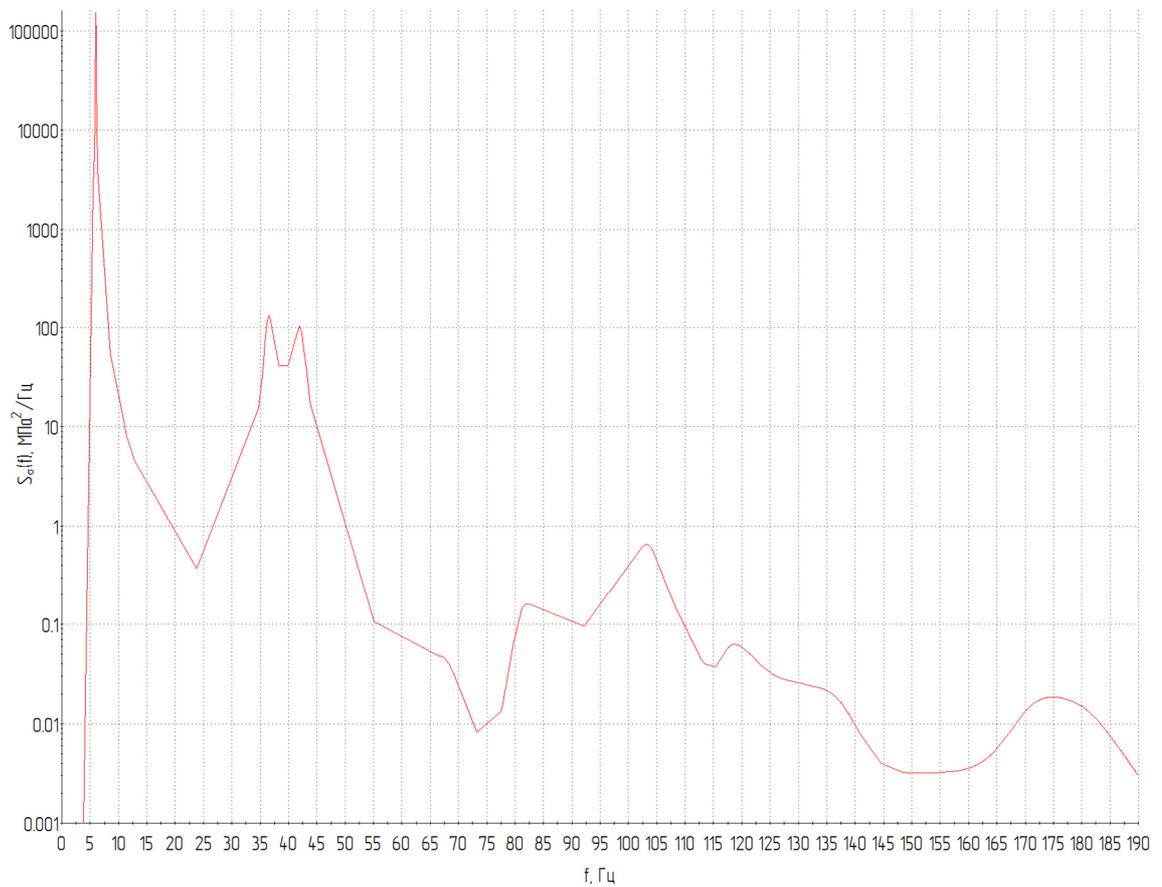


Рис. 3.38. Спектральная плотность эквивалентных напряжений (узел 232603)

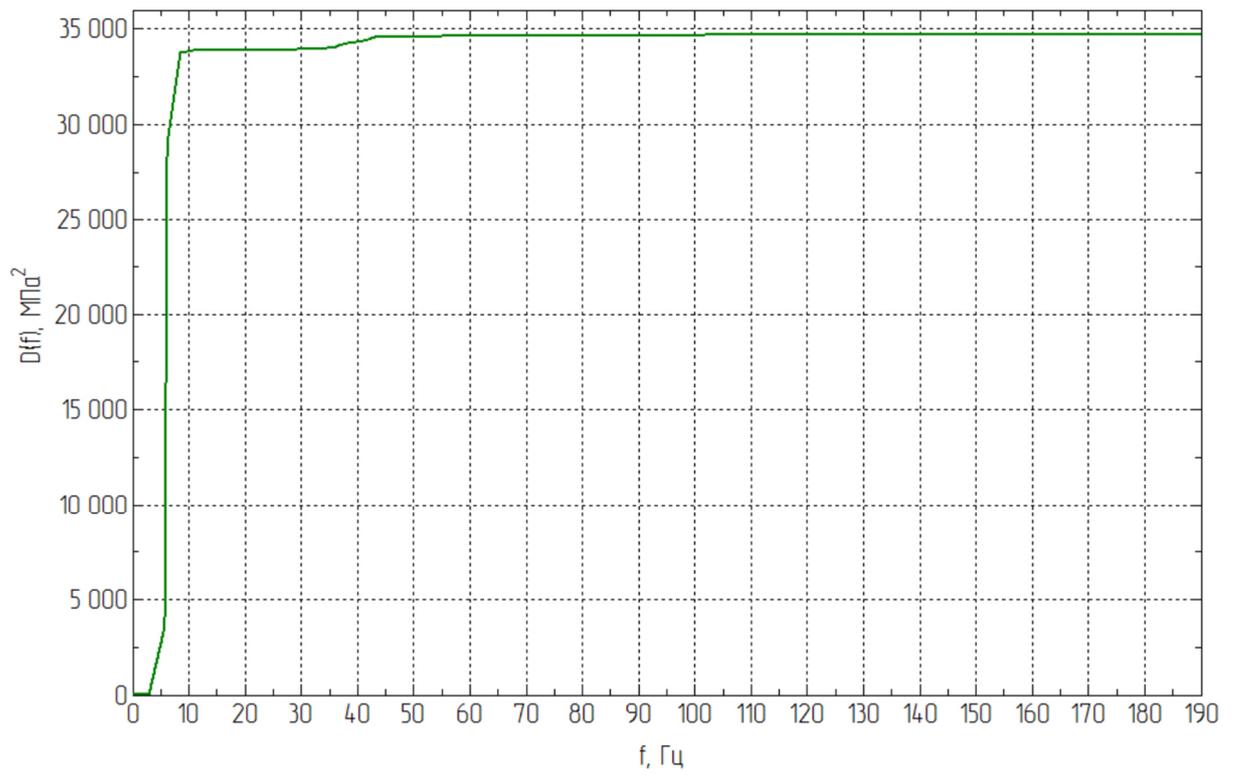


Рис. 3.39. Распределение дисперсии эквивалентных напряжений (узел 232603)

3.3.1. Проверка корректности моделирования

Для проверки корректности моделирования конструкции расчет динамического НДС конструкции дополнительно проводился для КЭМ с размером КЭ сварной точки 1 мм, 0,5 мм. Сравнение КЭМ велось по количеству элементов на поверхности сварных точек, общему числу элементов в сварной точке, общему числу узлов и элементов в модели, величинам максимальных СКЗ напряжений в сварных точках, полям напряжений, по частотам. Параметры сравнения КЭМ с размером элементов 1 мм, 0,7 мм, 0,5 мм представлены в табл. 3.6.

В результате проверки получено, что расхождение результатов моделирования для КЭМ с размером КЭ сварных точек 1 мм и 0,7 мм по величинам эквивалентных СКЗ напряжений не превышает 11,6 %, для 0,7 мм и 0,5 мм не превышает 7,6 %.

Таблица 3.6

	1 мм	0,7 мм	0,5 мм
Общее число узлов модели	217881	348246	502534
Общее число элементов модели	112176	190603	284822
Число элементов в сварной точке	191	506	1004
Элементы на поверхности сварной точки	65	127	189
СКЗ напряжений в сварной точке	204 МПа	230,7 МПа	249,6 МПа

Для определения зон наибольшей изменчивости напряжений и уровней напряжений проведено моделирование НДС конструкции при нагружении квазистатическим гравитационным ускорением равным $6g$ и направленным по оси Y [52]. Передняя часть конструкции заменялась габаритно-массовым макетом

(ГММ) для упрощения вычислений. Материалы конструкции задавались в соответствии с табл. 3.2. Расчетная модель конструкции представлена на рис. 3.39.

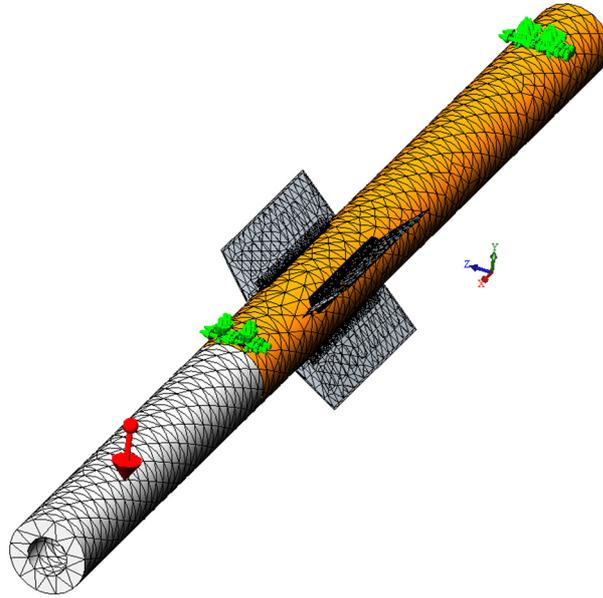


Рис. 3.39. Расчетная модель конструкции при нагружении квазистатическим гравитационным ускорением

На рис. 3.40 показано распределение эквивалентных (по Мизесу) статических напряжений в конструкции. Максимальные значения напряжений составляют 613 МПа и наблюдаются на переднем узле подвески. Зоны повышенных напряжений находятся также вблизи плоскостей и в точках их соединения с оболочкой (рис. 3.41).

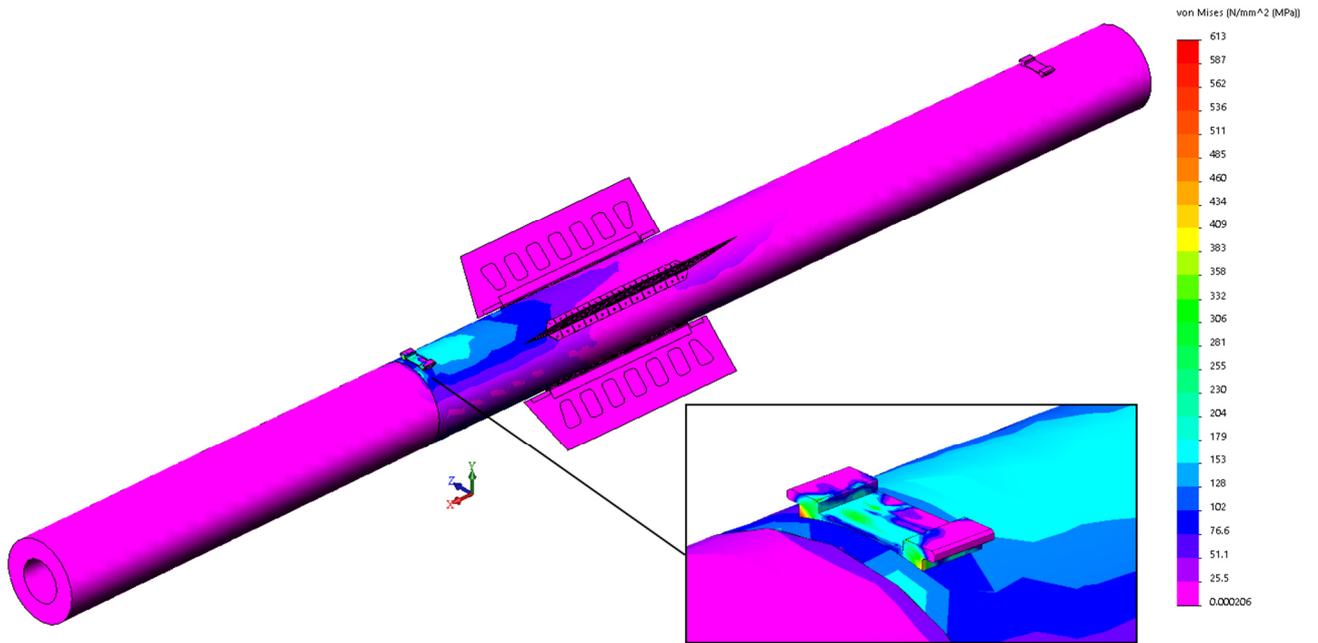


Рис. 3.40. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции

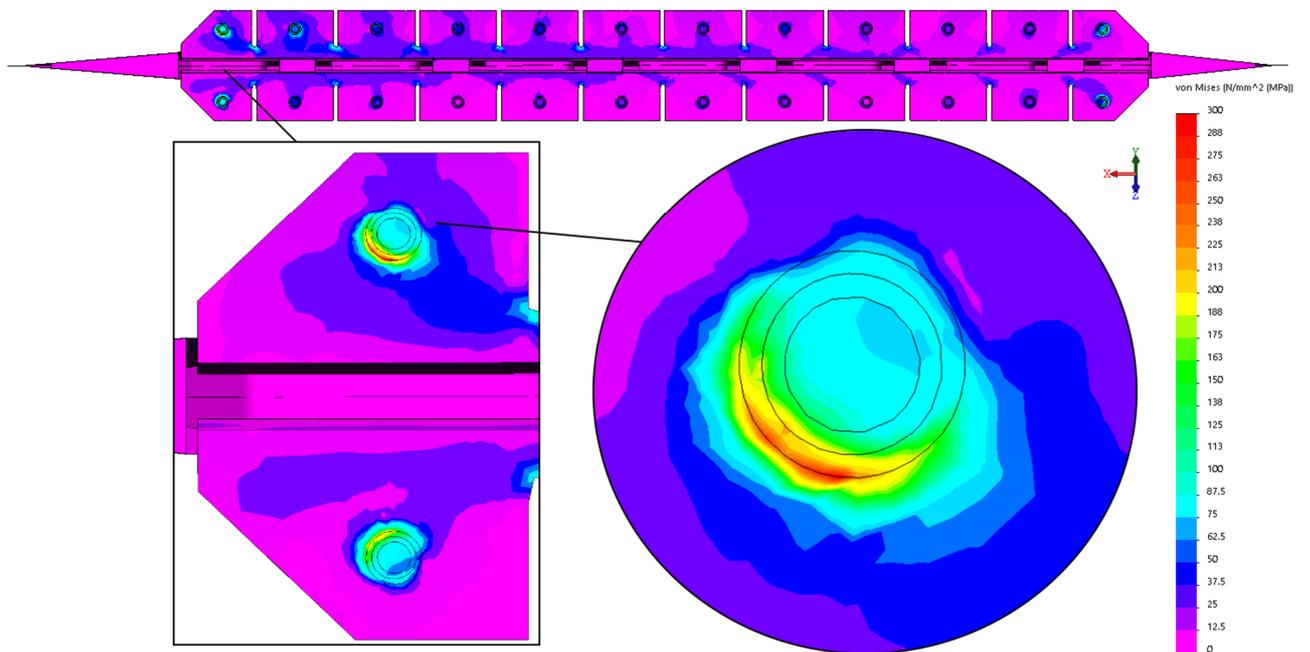


Рис. 3.41. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу на плоскости

Максимальные напряжения в сварных точках составляют 300 МПа. Наиболее нагруженными являются крайние точки сварных швов (рис. 3.41).

По результатам проверочных расчетов получено, что при различных вариантах разбивки сварных точек КЭ сеткой, в зонах наибольшей изменяемости напряжений, их величины монотонно увеличиваются в пределах 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.

3.4. Оценка усталостной долговечности точечного сварного соединения в тонкостенной авиационной конструкции

В силу существенного разброса показателей долговечности конструкций для оценки ресурса принято использовать различные теории (гипотезы) с последующим анализом результатов.

В данной диссертационной работе оценка ресурса рассматриваемой конструкции проводится на основе линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, скорректированной гипотезы суммирования усталостных повреждений, а также гипотезы спектрального суммирования.

3.4.1. Построение приведенной кривой усталости для материала сварной точки

Для учета снижения характеристик сопротивления усталости материала в зоне сварных точечных соединений, на основе экспериментальных данных для стандартного образца строится приведенная кривая усталости материала.

Свариваемые детали изготовлены из стали 30ХГСА. Для стандартного образца из листовой стали 30ХГСА принимается: $N_G = 7 \cdot 10^5$, $m_N = 8,58$, $m_{N_l} = 64,92$, $\sigma_{N_G} = 460$ МПа [60], где N_G и σ_{N_G} - координаты точки перелома, m_N и m_{N_l} - показатели наклона левой и правой ветвей кривой усталости. Для приведенной кривой усталости принимается значение абсциссы точки перелома $N_{G,\Pi} = N_G = 7 \cdot 10^5$. Ордината точки перелома для приведенной кривой усталости $\sigma_{N_{G,\Pi}}$ определяется по формуле (2.2):

$$\sigma_{N_{G,\Pi}} = \frac{\sigma_{N_G}}{K},$$

где $\sigma_{N_{G,\Pi}}$ - медианное значение предела ограниченной выносливости для элемента конструкции, σ_{N_G} - медианное значение предела ограниченной выносливости для стандартного образца, K - коэффициент снижения предела выносливости.

Для определения коэффициента K используется формула (2.3):

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{I}{K_{F\sigma}} - I \right) \cdot \frac{I}{K_v \cdot K_A}.$$

Здесь K_σ - эффективный коэффициент концентрации напряжений, $K_{d\sigma}$ - масштабный фактор, $K_{F\sigma}$ - коэффициент влияния шероховатости поверхности, K_v - коэффициент влияния поверхностного упрочнения, K_A - коэффициент анизотропии.

Для коэффициентов в формуле (2.3), в соответствии со стандартом [63], принимается $K_{F\sigma} = 0,95$, $K_v = 1,0$, $K_A = 0,9$, $K = 1,2$. Так как приведенная кривая формируется непосредственно для элемента в сварной точке с максимальным уровнем напряжений, то отношение $\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}}$ принимается равным 1. Тогда значение

величины $\sigma_{N_{G,\Pi}}$ вычисляется как: $\sigma_{N_{G,\Pi}} = \frac{460}{1,2} = 376 \text{ МПа}$. Стандартная и

приведенная кривые усталости представлены на рис. 3.42.

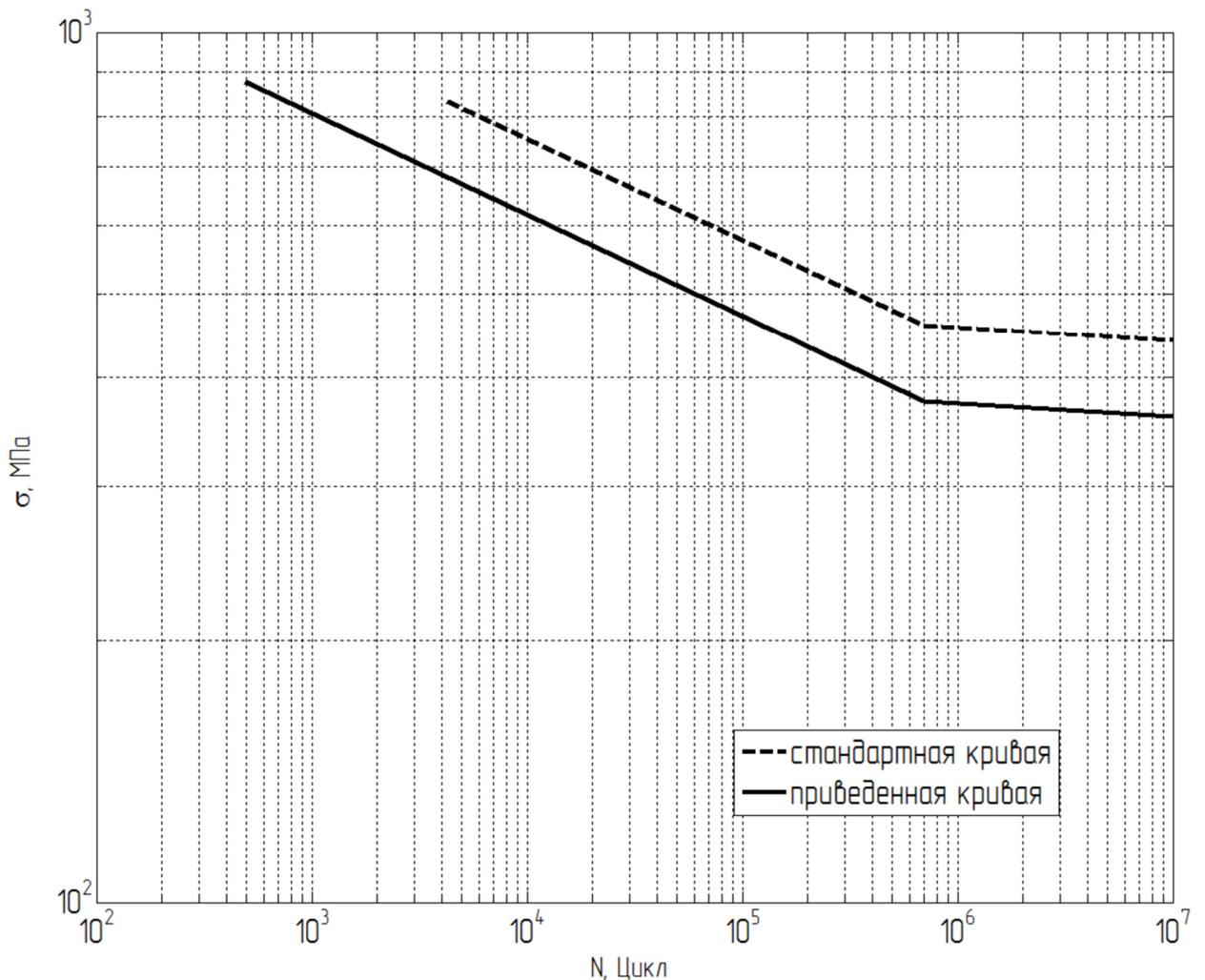


Рис. 3.42. Стандартная и приведенная кривые усталости

3.4.2. Оценка ресурса точечного сварного соединения по линейной гипотезе суммирования повреждений

Наиболее часто оценка ресурса проводится на основе линейной теории суммирования усталостных повреждений. Для ее применения требуется приведение действующего нерегулярного процесса напряжений к эквивалентному по повреждающему действию регулярному процессу, т.е. для проведения расчетов необходимы реализации процессов напряжений $\sigma(t)$ в наиболее нагруженных точках конструкции. Исходными данными для получения реализаций $\sigma(t)$ являются зависимости для спектральных плотностей напряжений $S_\sigma(\omega)$. Для каждого значения аргумента (времени) t , процесс $\sigma(t)$ моделируется разложением вида (2.1).

Моделирование реализаций проводится для сварной точки с наибольшим уровнем напряжений. Здесь моделирование проведено для узла 232603 КЭМ, в котором процесс напряжений $\sigma(t)$ является узкополосным. Поэтому, при моделировании рассматриваются только два частотных интервала, в которых расположены составляющие спектральной плотности напряжений вносящие основной вклад (99,9%) в суммарную дисперсию напряжений. Первый интервал имеет границы [5,55; 6,35] Гц, второй - [34,75; 43,85] Гц. В границах выделенных интервалов с шагом по частоте $\Delta\omega_j$ задаются значения ω_j и соответствующие им значения $S_\sigma(\omega_j)$. Шаг $\Delta\omega_j$ является переменным, значения аргументов ω_j сгущаются вблизи максимумов спектральной плотности. Для первого слагаемого суммы (2.1) принимается $\Delta\omega_1 = \omega_2 - \omega_1$. Для последующих слагаемых - $\Delta\omega_j = (\omega_j - \omega_{j-1})/2 + (\omega_{j+1} - \omega_j)/2$.

Для моделирования реализаций $\sigma(t)$ использовался программный комплекс MatLab. Моделирование реализаций проводится отдельно для каждого частотного интервала с последующим суммированием значений $\sigma(t)$ в совпадающие моменты времени. Значения частоты ω_j и соответствующие

значения спектральной плотности напряжений $S_{\sigma}(\omega_j)$ определяются по графику спектральной плотности (рис. 3.36). Далее задается временной интервал T и выбирается шаг дискретизации по времени Δt . Шаг дискретизации по времени для первого интервала принят равным 0,04 с, для второго – 0,01 с, рассматривался временной интервал T равный 3600 с.

Полученные временные реализации процессов напряжений $\sigma(t)$ представлены на рис. 3.43, суммарная реализация процессов на рис. 3.44.

Процессы содержат гармоники, существенно различающиеся по частоте и уровню, что соответствует характеру исходной спектральной плотности.

Участок реализации процесса $\sigma(t)$ для первого и второго интервалов длительностью 2 с представлен на рис. 3.45, участок суммарной реализации для двух интервалов длительностью 10с представлен на рис. 3.46. На рис. 3.44 видно, что частота колебаний в секунду на каждом из интервалов приблизительно соответствует нижним порогам частоты этих интервалов.

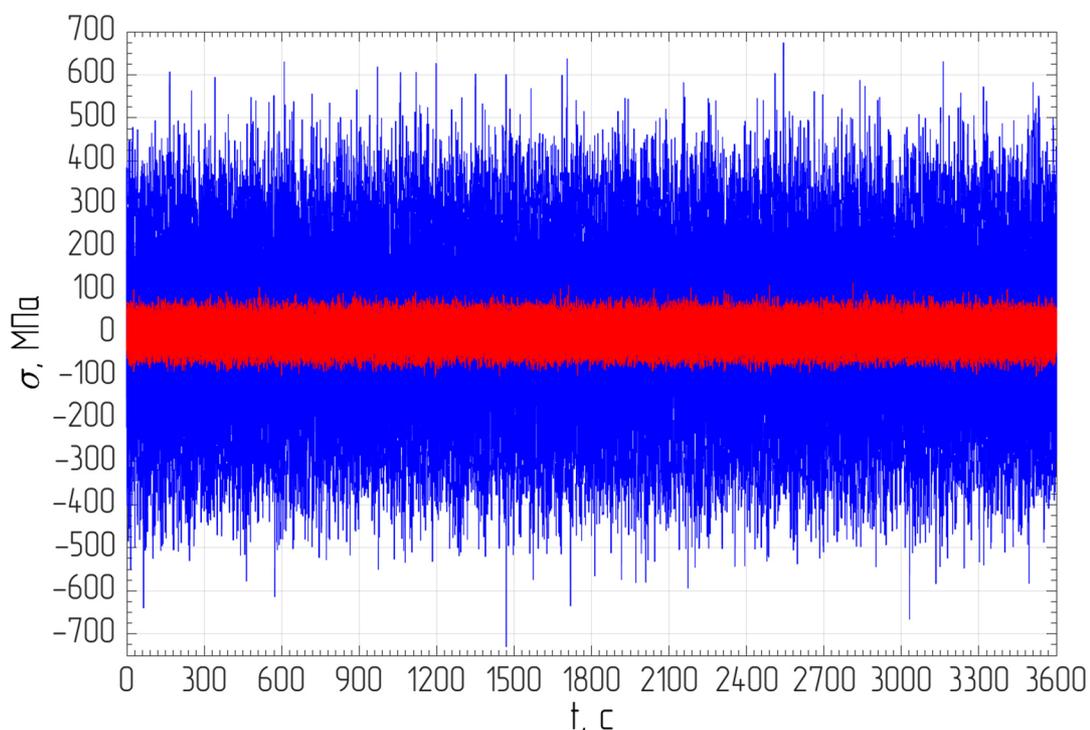


Рис. 3.43. Временная реализация процесса $\sigma(t)$ (первый и второй интервалы)

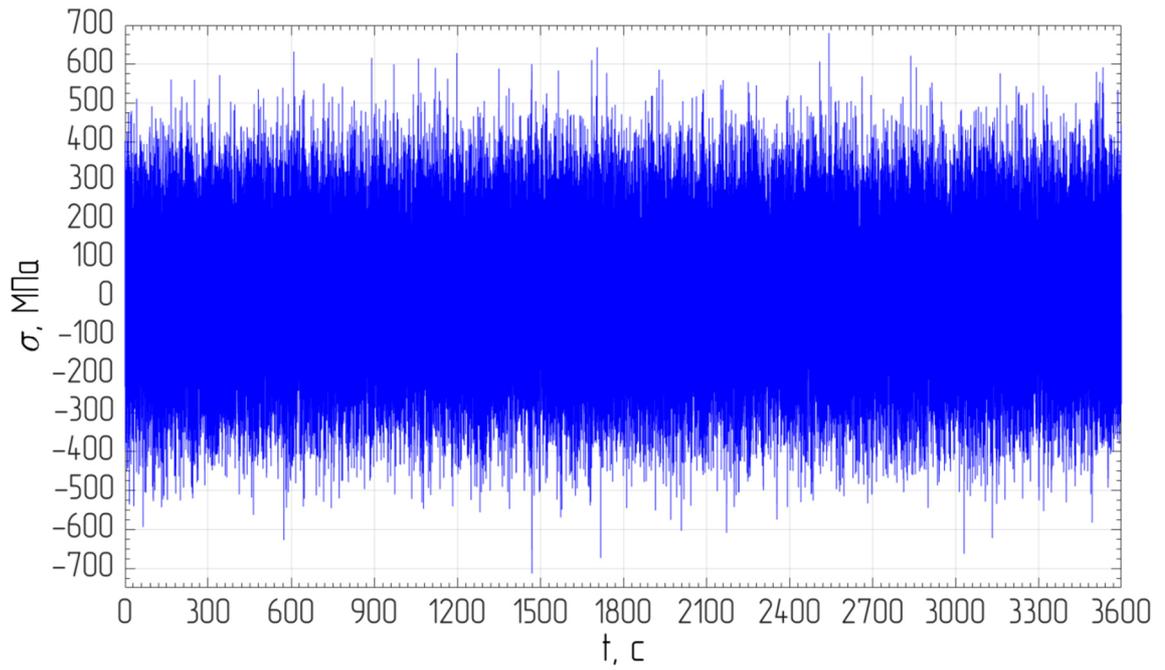


Рис. 3.44. Суммарная временная реализация процесса $\sigma(t)$

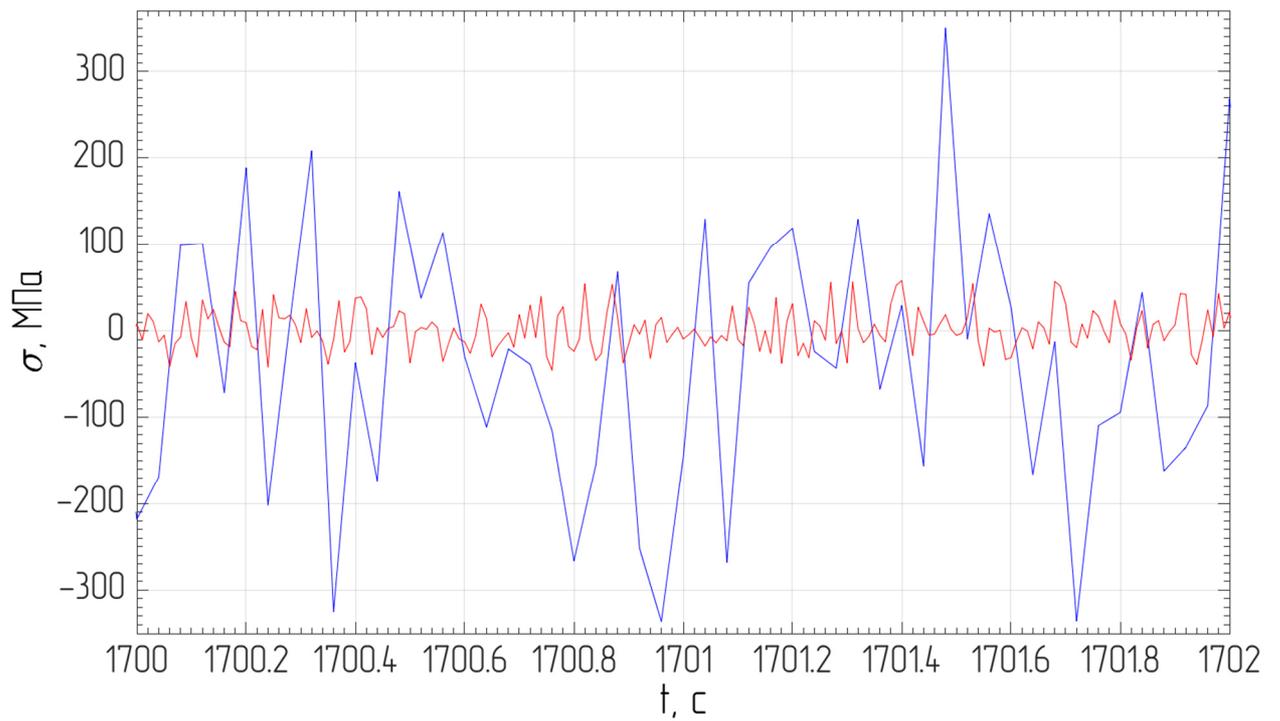


Рис. 3.45. Временная реализация процесса $\sigma(t)$ длительностью 2 с (первый и второй интервалы)

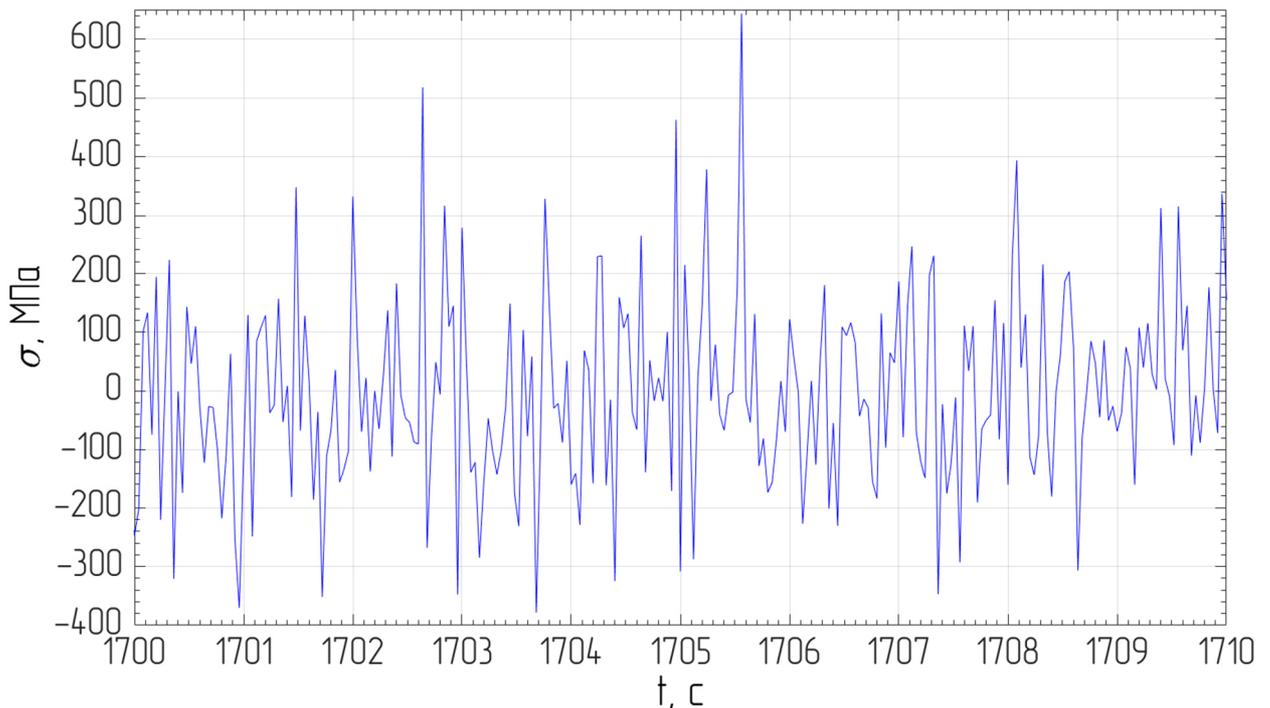


Рис. 3.46. Суммарная временная реализация процесса $\sigma(t)$ длительностью 10 с

В соответствии с алгоритмом моделирования значения процесса напряжений $\sigma(t)$ имеют распределение близкое к нормальному. Для нормально распределенного процесса значения напряжений с вероятностью близкой к единице не должны превышать величину $3D_\sigma^{1/2}$, где D_σ – суммарная дисперсия процесса. Процесс $\sigma(t)$ в узле 232603 имеет значение $3D_\sigma^{1/2} = 484$ МПа и максимумы процесса превышающими это значения являются редкими, что показывает корректность моделирования процесса (рис. 3.44).

Для оценки усталостной долговечности конструкции, реализации случайных процессов напряжений, полученные в результате моделирования, схематизируются, т.е. приводятся к набору регулярных циклов эквивалентных по повреждающему действию случайному процессу.

Для схематизации случайного процесса здесь применяется метод «дождя» [62], который наряду с методом полных циклов дает наиболее приемлемые оценки долговечности [77]. В алгоритм схематизации вводятся значения времени t и соответствующие им значения случайного процесса напряжений $\sigma(t)$ (рис. 3.44).

В результате вычислений получены графики функции удельной повторяемости (за 60 с) амплитуд приведенных симметричных циклов напряжений (рис. 3.47). Эти графики соответствуют участкам реализации различной продолжительности (300, 600, 900, 1800, 3600 с) и показывают сходимость результатов схематизации при увеличении продолжительности участка реализации [51, 78]. Наиболее важной является сходимость повторяемости амплитуд в области значений напряжений, превышающих предел ограниченной выносливости для рассматриваемого элемента конструкции.

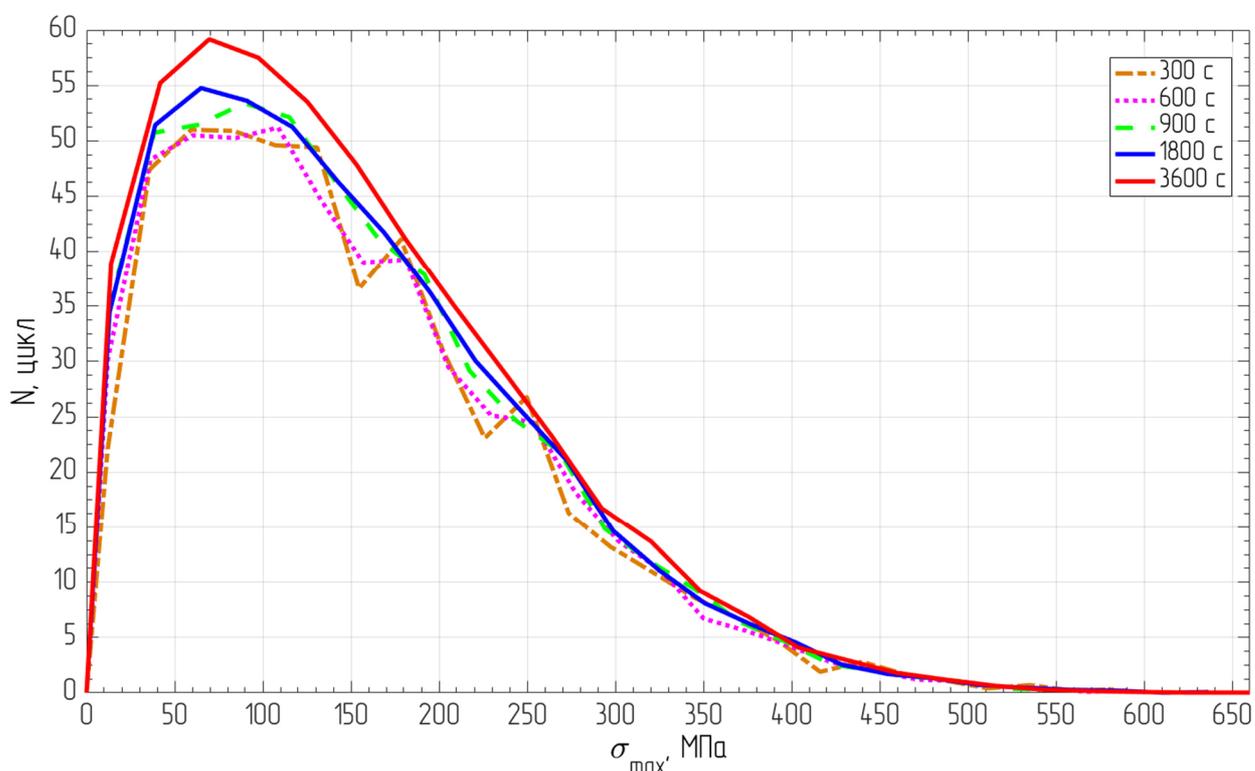


Рис. 3.47. Удельная повторяемость амплитуд циклов напряжений

Для оценки долговечности используется линейная гипотеза суммирования повреждений, в которой условие усталостного разрушения имеет вид:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3.6)$$

где n_i и N_i – количество число циклов наработки и количество циклов до появления усталостного разрушения при напряжении σ_i , k – число ступеней регулярных циклов напряжений.

Значения n_i определяются по кривой повторяемости для реализации процесса напряжений продолжительностью 1800 с (рис. 3.47). Далее для соответствующих значений напряжений σ_i с использованием приведенной кривой усталости для материала в зоне сварной точки определяются значения N_i [51, 77].

С использованием полученных кривых повторяемости (рис. 3.47) и соотношения линейной гипотезы суммирования повреждений (3.6) получено, что удельная относительная повреждаемость (за один час эксплуатации изделия) точечного сварного соединения при возбуждении колебаний конструкции случайным стационарным процессом со спектральной плотностью ускорения, соответствующей реальному эксплуатационному нагружению составляет 0,73 %, а усталостная долговечность – 137,8 часа.

Экспериментально установлено, что использование линейной гипотезы суммирования повреждений, дает существенно заниженную оценку накопленной усталостной повреждаемости. Более точная оценка накопленной повреждаемости может быть получена на основе скорректированной линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, в которой условие разрушения имеет вид [77]:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = a_p, \quad a_p = \sum_{i=1}^k \frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}} \cdot \frac{v_{i\sigma}}{v_{\sigma}^*} \quad (3.7)$$

где k – число ступеней амплитуд напряжения, σ_{a_i} – среднее значение амплитуды напряжения для i -ой ступени, $\sigma_{a_{max}}$ – максимальное значение амплитуды напряжения, $v_{i\sigma}$ – число повторений амплитуд напряжений σ_{a_i} , v_{σ}^* – суммарное число циклов.

Для функции повторяемости напряжений, соответствующей длительности реализации 1800 с получено значение корректировочного коэффициента $a_p = 0,24$. Тогда значение удельной повреждаемости точечного сварного соединения составляет 3,08 %, а усталостная долговечность – 32,4 часа.

3.4.3. Оценка ресурса точечного сварного соединения по гипотезе спектрального суммирования

Так как результатом решения задачи о случайных колебаниях методом спектральных представлений являются спектральные плотности реакции, то необходимо также по спектральным плотностям восстанавливать соответствующие случайные процессы с использованием алгоритмов статистического моделирования.

Непосредственное вычисление характеристик долговечности по спектральной плотности напряжений без моделирования случайного процесса возможно на основе алгоритмов теории спектрального суммирования усталостных повреждений [69–70, 79].

В рамках этой теории средняя накопленная удельная (в единицу времени) повреждаемость, вызванная действием стационарного нормального случайного процесса напряжений, определяется по формуле:

$$\xi = \frac{1}{2\pi C} D_{\sigma}^{m/2} L(m) \left[\int_{\omega} \bar{\Phi}(\omega) \omega^{2/m} d\omega \right]^{m/2}, \quad (3.8)$$

Тогда для медианной долговечности \bar{T} имеет место соотношение:

$$\bar{T} = \frac{2\pi C}{D_{\sigma}^{m/2} L(m) \left[\int_{\omega} \bar{\Phi}(\omega) \omega^{2/m} d\omega \right]^{m/2}}, \quad (3.9)$$

В выражениях (3.8), (3.9) $\bar{\Phi}(\omega)$ – нормированная спектральная плотность напряжений $\bar{\Phi}(\omega) = \frac{S_{\sigma}(f)}{2\pi D_{\sigma}}$, $L(m) = (\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right)$ – функция показателя степени кривой усталости m , Γ – гамма-функция, C – параметр уравнения кривой усталости $C = N\sigma^m$.

Вычисление интеграла от сложной функции, включающей спектральную плотность напряжений в формулах (3.8, 3.9) в общем случае проводится с использованием численных алгоритмов. Для спектральной плотности напряжений в сварной точке (рис. 3.36) интегрирование можно приближенно проводить только для частотных интервалов, соответствующих основным пикам зависимости $\overline{\Phi}(\omega)$, в которых сосредоточена практически вся энергия процесса напряжений [51]. В первом приближении эти сложные пики можно заменить равными по площади прямоугольниками с аналогичной шириной частотных интервалов. Тогда выражение (3.9) для средней долговечности будет:

$$\overline{T} = \frac{2\pi C}{L(m) \left[\frac{h}{D_\sigma} \int_{\omega}^{\omega^{2/m}} d\omega \right]^{m/2}}, \quad (3.10)$$

где $h = D_\sigma / \omega$, D_σ – суммарная дисперсия процесса напряжений, ω – величина частотного интервала в рад/с.

Рассматривается частотный интервал [34,9; 39,9] рад/с ([5,55; 6,35] Гц) с суммарной дисперсией $D_\sigma = 26045 \text{ МПа}^2$, $h = 5209 \text{ МПа}$. Применяя формулу (3.10) с использованием характеристик кривой усталости для материала сварной точки (раздел 3.4.1), получим:

$$\overline{T} = \frac{I}{\frac{K^{m_{N_I}}}{2\pi N_{G,\Pi}} \cdot \Gamma\left(\frac{m_{N_I} + 2}{2}\right) \cdot \left[\frac{h}{D_\sigma} \int_{34,9}^{39,9} \omega^{2/m_{N_I}} d\omega \right]^{m_{N_I}/2}} = 2,28 \cdot 10^5 \text{ с} = 63,2 \text{ ч}, \quad (3.11)$$

Здесь безразмерный параметр $K = \frac{\sqrt{2D_\sigma}}{\sigma_{N_{G,\Pi}}}$.

Получено, что значение усталостной долговечности составляет 63,2 часа, соответствующее среднее относительное значение удельной повреждаемости точечного сварного соединения (соответствующее одному часу эксплуатационного нагружения) равно 1,58 %.

Далее вычисляется значение усталостной долговечности того же точечного сварного соединения для случая, в котором пики спектральной плотности более подробно описываются с помощью линейных функций частоты (рис. 3.48).

Пик спектральной плотности, содержащий основную энергию процесса напряжений, представлен прямоугольными и треугольными областями, причем треугольные области заменяются эквивалентными по площади прямоугольными по теореме о среднем значении, по которой вычисляются эквивалентные высоты прямоугольников:

$$h = \frac{I}{b-a} \int_a^b f(x) dx,$$

где a и b – нижняя и верхняя границы треугольной области соответственно.

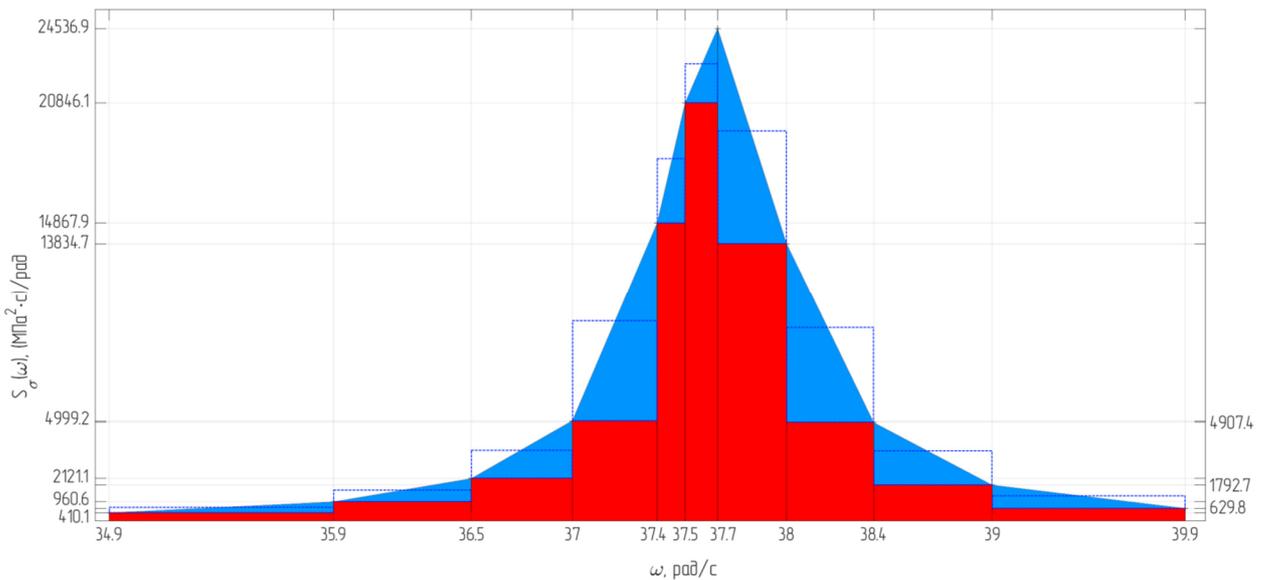


Рис. 3.48. Пик спектральной плотности, представленный линейными функциями частоты

Тогда формула (3.11) примет вид:

$$\bar{T} = \frac{I}{\frac{K^{m_{N_I}}}{2\pi N_{G,\Pi}} \cdot \Gamma\left(\frac{m_{N_I} + 2}{2}\right) \cdot \left[\sum_i^k \frac{h_i}{D_{\sigma} a_i} \int_{a_i}^{b_i} \omega^{2/m_{N_I}} d\omega \right]^{m_{N_I}/2}}, \quad (3.12)$$

где $K = \frac{\sqrt{2D_\sigma}}{\sigma_{N_{G,\Pi}}}$; i, k – номер и общее число интегрируемых областей; h_i – i -я

высота рассматриваемой области, a_i и b_i – соответственно верхняя и нижняя i -я границы частотных интервалов.

Подставив значения в формулу (3.12), получено, что для той же сварной точки, значение удельной повреждаемости будет равно 1,61 %, соответствующее значение усталостной долговечности составляет 62,3 часа.

Таким образом, оценки долговечности, полученные по различным теориям, имеют существенные различия [80]. Результаты вычислений, полученных по различным теориям расчета усталостной долговечности, сведены в таблицу 3.7. 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.

Таблица 3.7

Метод расчета усталостной долговечности	Усталостная долговечность, ч	Повреждаемость в единицу времени, %
Линейная гипотеза суммирования	137,8	0,73
Скорректированная гипотеза суммирования	32,4	3,08
Гипотеза спектрального суммирования (первое приближение – прямоугольник)	62,8	1,59
Гипотеза спектрального суммирования (линейные функции частоты)	62,3	1,61

Следует отметить, что расчет долговечности по теории спектрального суммирования ведется с учетом только левой ветви кривой усталости, а расчет с применением гипотезы линейного суммирования повреждений – левой и правой ветвей кривой усталости.

Глава 4. Сопоставление данных моделирования с результатами испытаний

Для оценки корректности методики моделирования проведено сопоставление полученных результатов моделирования с данными лабораторных испытаний конструкции авиационного изделия [81]. 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 Х-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 [82] (рис. 4.1), обеспечивающего заданное пространственное положение изделия и реализующего реальные условия закрепления изделия на носителе.

Случайное пространственное кинематическое возбуждение, соответствующее условиям транспортирования изделия на носителе, передается на изделие через узлы подвески. При испытаниях использовались форсированные режимы широкополосной случайной вибрации.

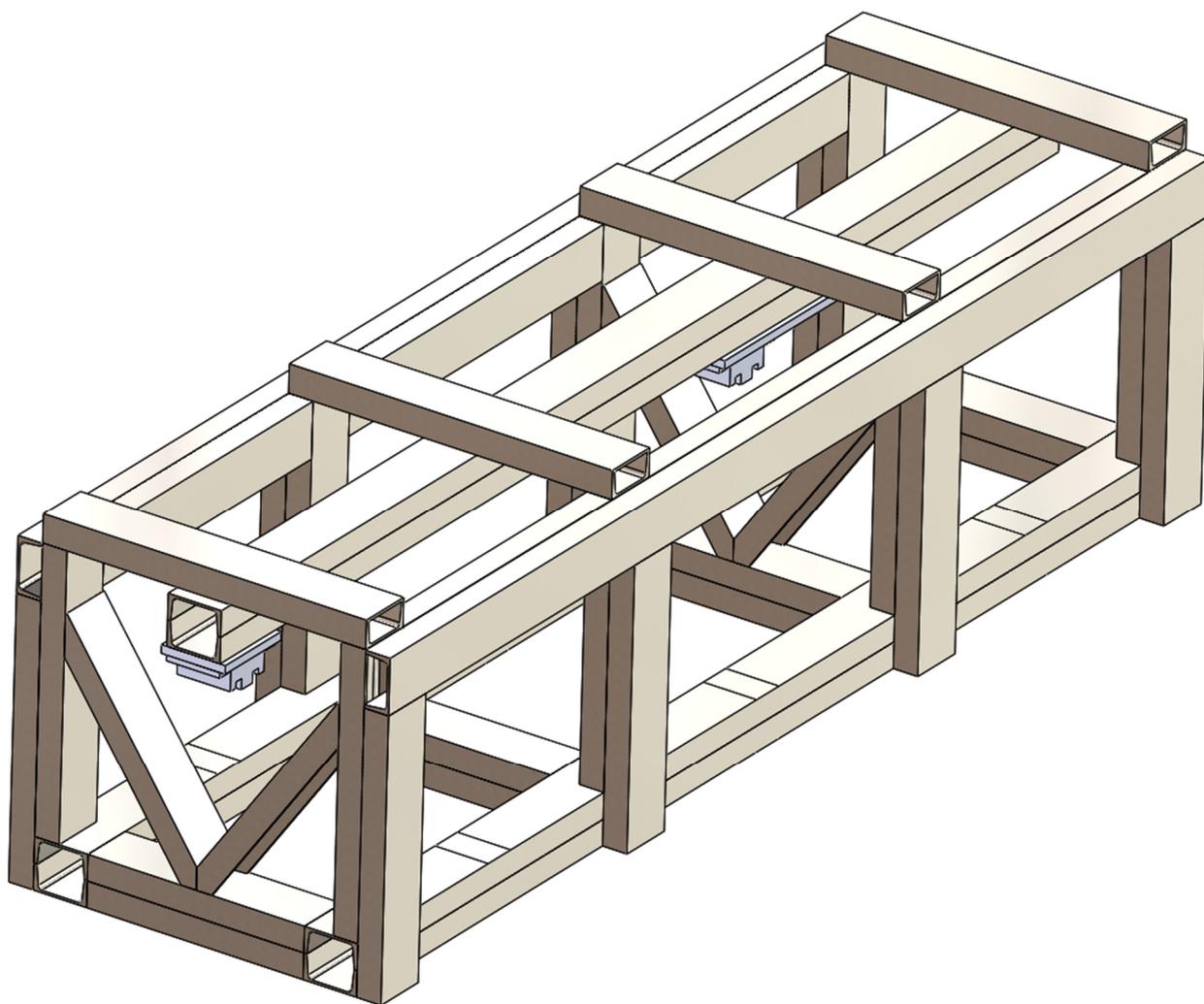


Рис. 4.1. Модель крепежного приспособления

Для регистрации характеристик вибрации используются датчики ускорения, которые ориентированы в направлении осей X , Y и Z системы координат, связанной с изделием. Две группы датчиков, по три в каждой, установлены вблизи переднего узла подвески и в средней зоне конструкции. По два датчика, установленные между задними узлами подвески и у стыка с хвостовым отсеком, ориентированы в направлении осей Y и Z . Схема расположения датчиков показана на рис. 4.2. 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 [81].

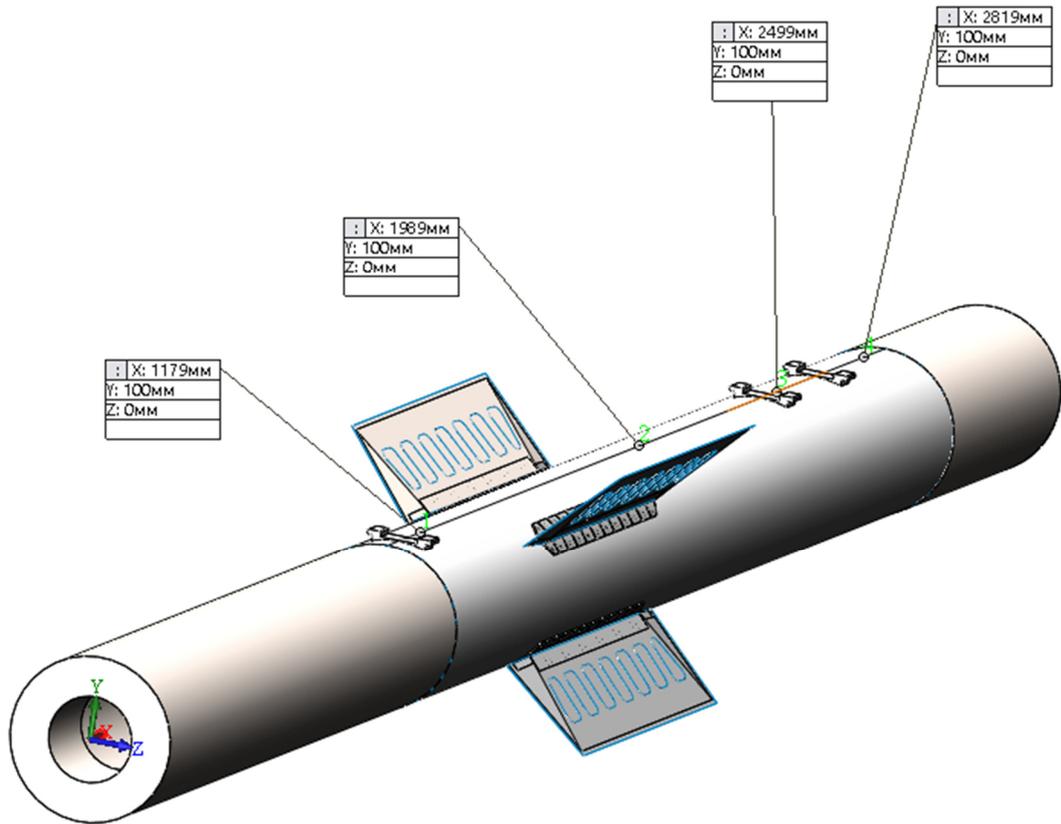


Рис. 4.2. Схема расположения датчиков на конструкции изделия

Сопоставление результатов экспериментальных данных с результатами моделирования проводилось для случая возбуждения конструкции по оси Y . Контроль результатов велся по датчику №1, расположенному вблизи переднего узла подвески ($X: 1179$ мм, $Y: 100$ мм, $Z: 0$ мм). График спектральной плотности ускорения для случая кинематического нагружения при возбуждении конструкции по оси Y приведен на рис. 4.3.

В результате испытаний определены уровни составляющих вибрационного ускорения a_x , a_y , a_z в направлениях осей X , Y и Z , в различных точках конструкции изделия. Определены зоны наибольших уровней ускорения. Количественно уровень ускорения определяется среднеквадратическим значением (СКЗ) ускорения, определяемым по реализации процесса определенной продолжительности. Получено, что при возбуждении колебаний в направлениях осей X и Y возникают существенные составляющие колебаний в направлении оси Z .

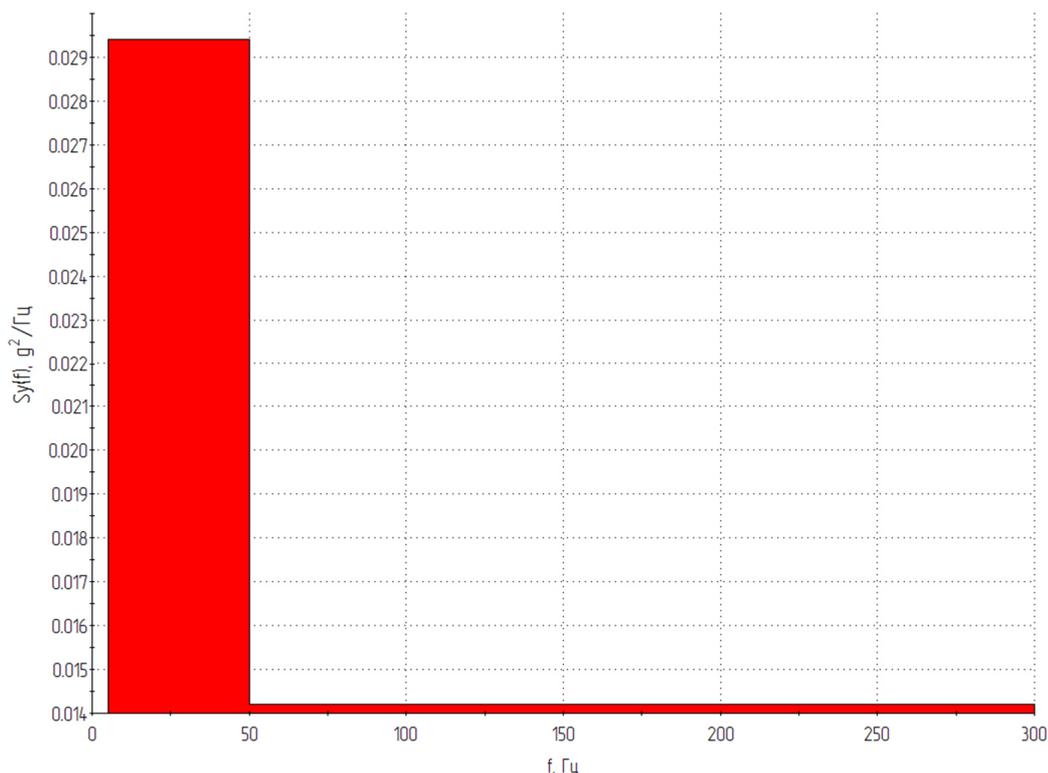


Рис. 4.3. Спектральная плотность ускорения случая кинематического нагружения по оси Y в эксперименте

Моделирование динамического состояния от воздействия случайного кинематического нагружения проводилось с применением программного комплекса SolidWorks. Были определены первые 50 собственных форм колебаний. Изделие моделировалось в системе, совместно с крепежным приспособлением. Расчетная модель конструкции изделия, закрепленного в крепежном приспособлении, используемая для сравнения результатов расчета с экспериментальными данными представлена на рис. 4.4.

Величина учитываемой эффективной модальной массы (ЭММ) для первых 50 форм колебаний по оси X – 70 %, оси Y – 40 %, оси Z – 77 %. В результате моделирования получены спектральные плотности ускорений в местах расположения датчиков, а также распределение СКЗ составляющих вибрационных ускорений по осям X и Y. Полученные спектральные плотности и поля ускорений для датчика № 1, расположенного вблизи узла переднего узла подвески (X: 1179 мм, Y: 100 мм, Z: 0 мм) представлены на рис. 4.5, 4.6 и 4.7, 4.8,

соответственно. Спектральные плотности для датчика № 1, полученные по результатам лабораторных испытаний представлены на рис. 4.9, 4.10.

Полученные по результатам экспериментальной обработки данные с датчиков и данные результатов моделирования сведены в таблицу 4.1.

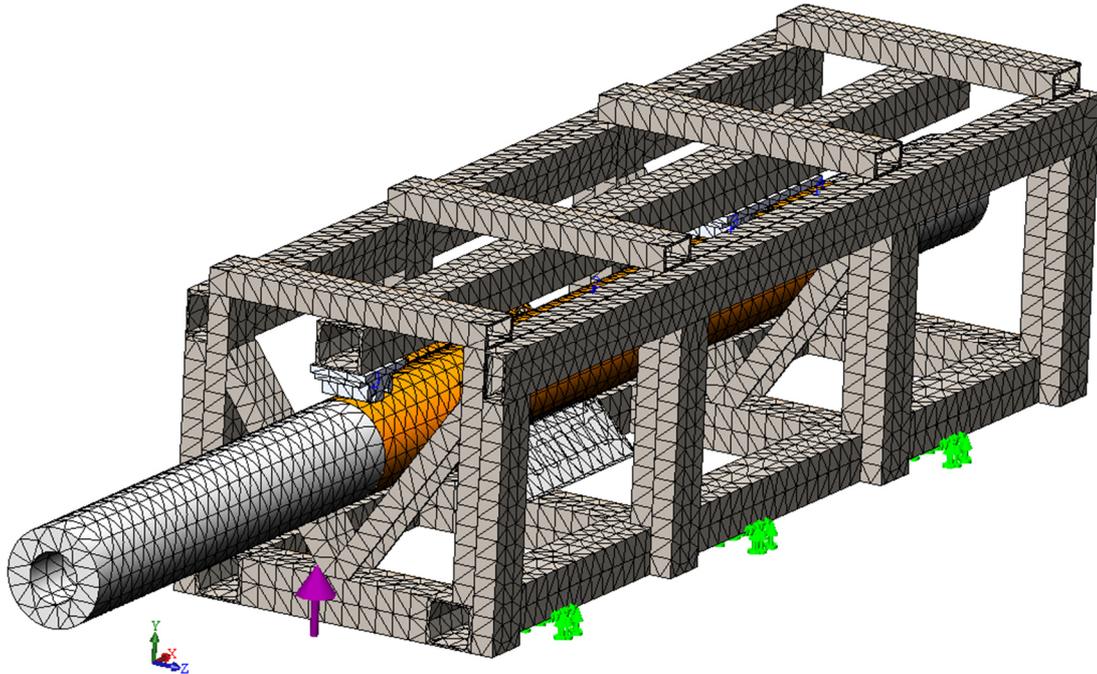


Рис. 4.4. Расчетная модель конструкции изделия совместно с крепежным приспособлением

Табл. 4.1

Вибрационное ускорение	Номер датчика и значение СКЗ							
	Эксперимент				Моделирование			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
По оси X – a_x, g	0,61	0,24	-	-	0,6	0,3	-	-
По оси Y – a_y, g	1,96	1,68	1,14	1,54	1,73	5,17	1,1	8,57

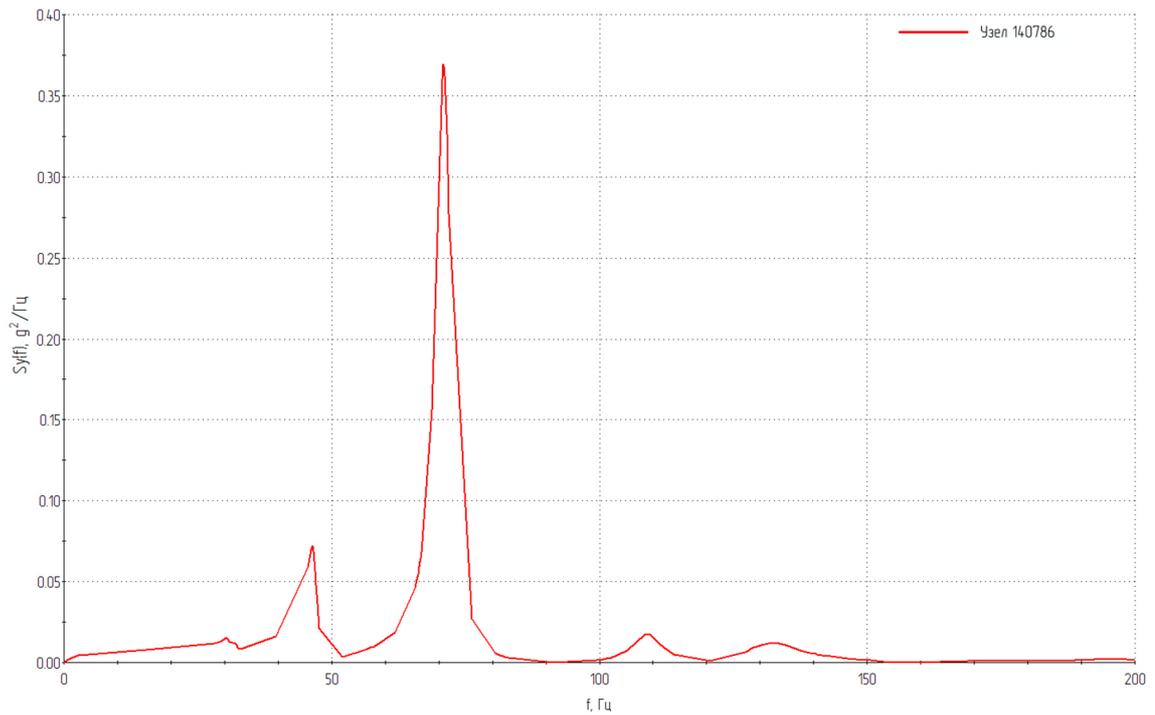


Рис. 4.5. Спектральная плотность вибрационных ускорений $S_y(f)$ в узле 140786

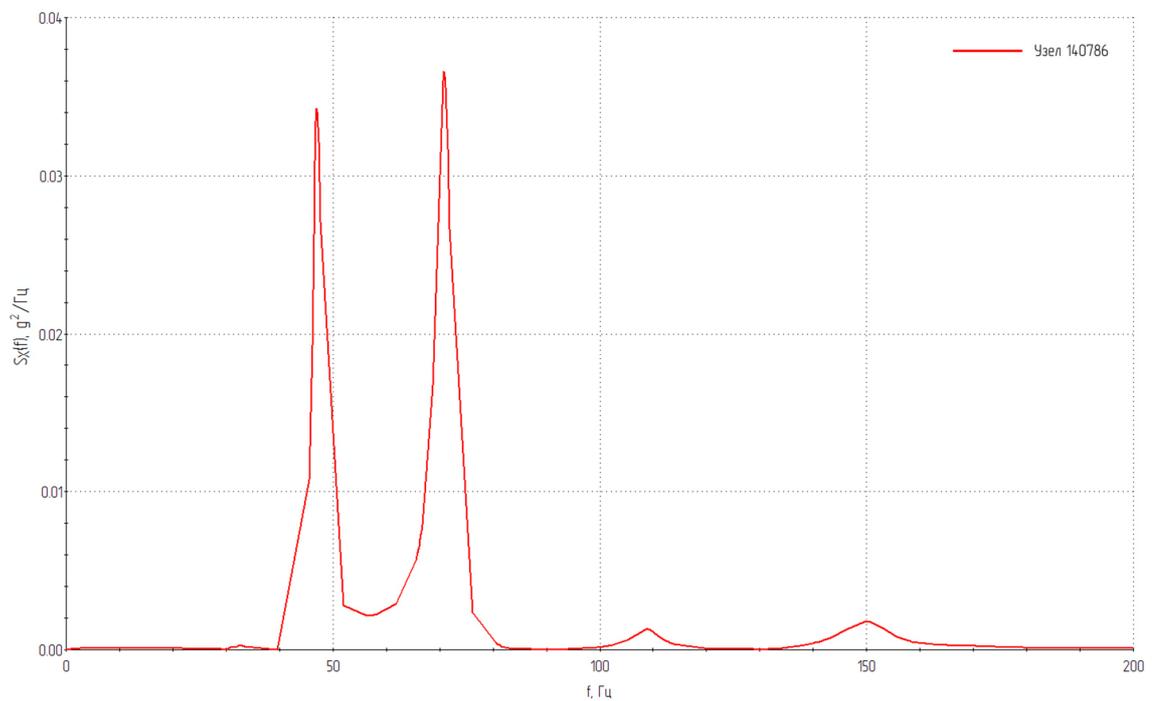
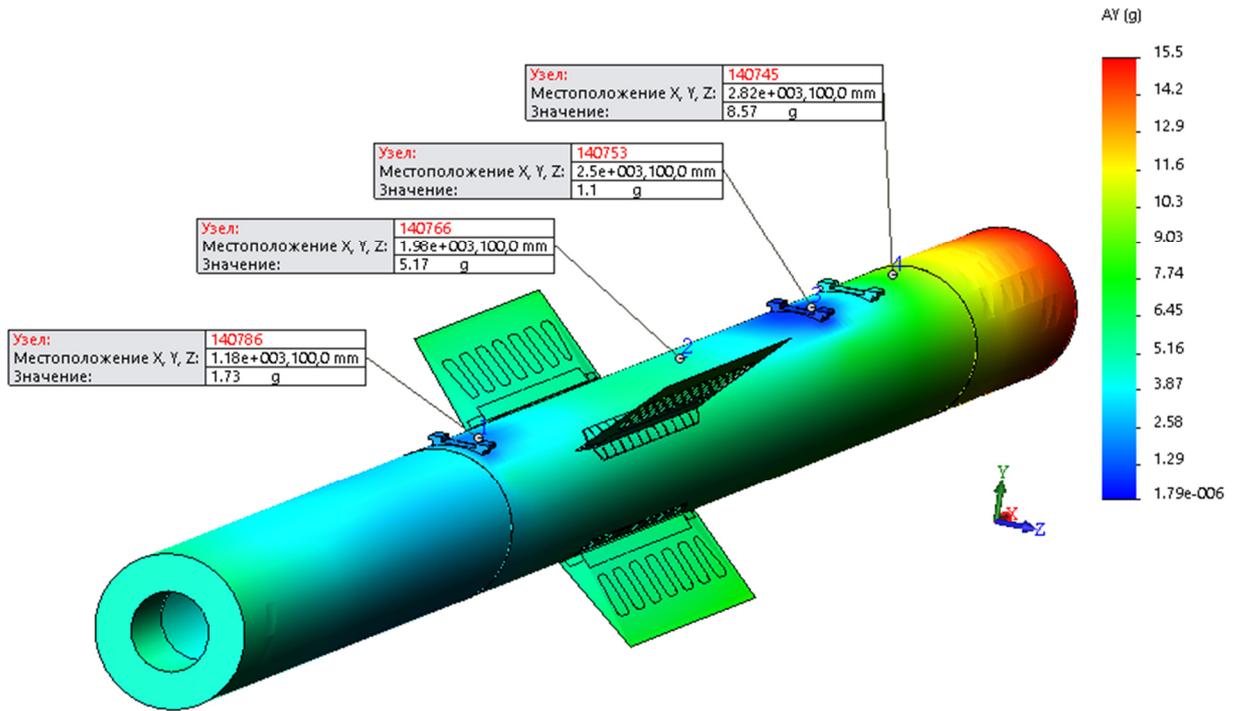
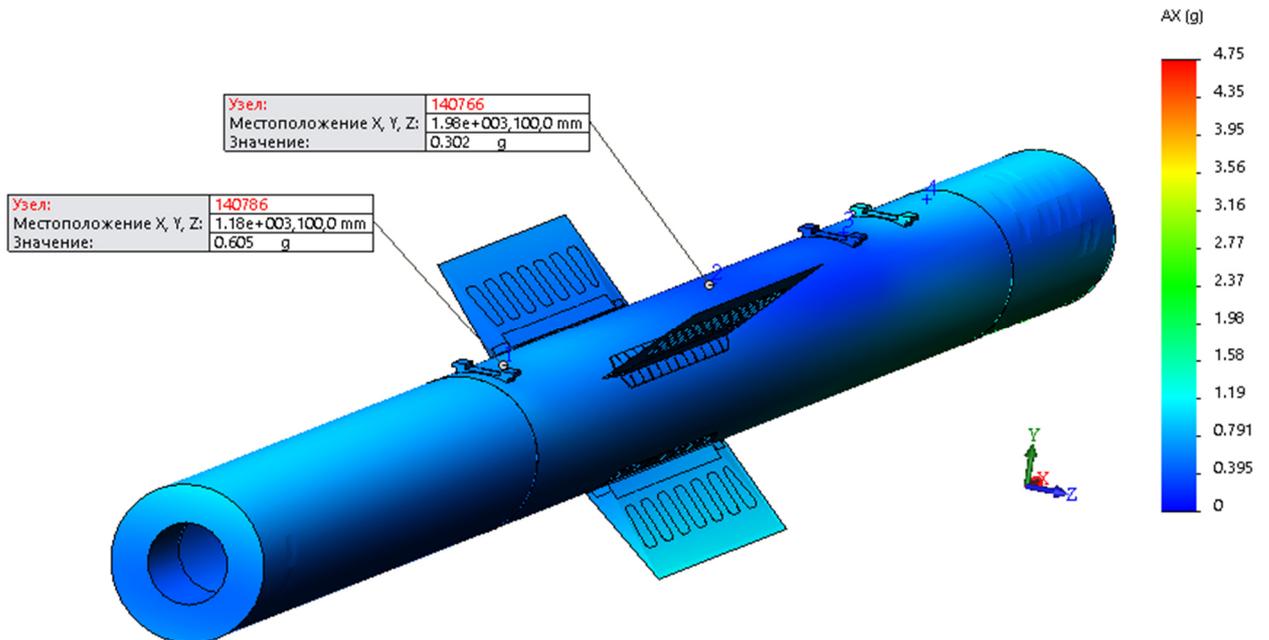


Рис. 4.6. Спектральная плотность вибрационных ускорений $S_x(f)$ в узле 140786

Рис. 4.7. Распределение вибрационных ускорений a_y Рис. 4.8. Распределение вибрационных ускорений a_x

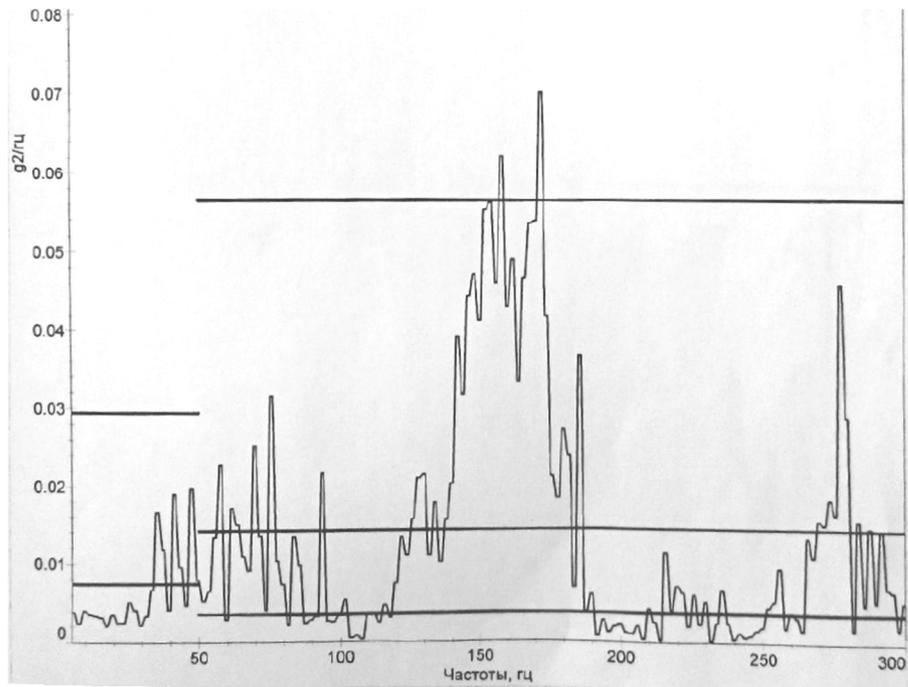


Рис. 4.9. Экспериментальная спектральная плотность вибрационных ускорений $S_y(f)$

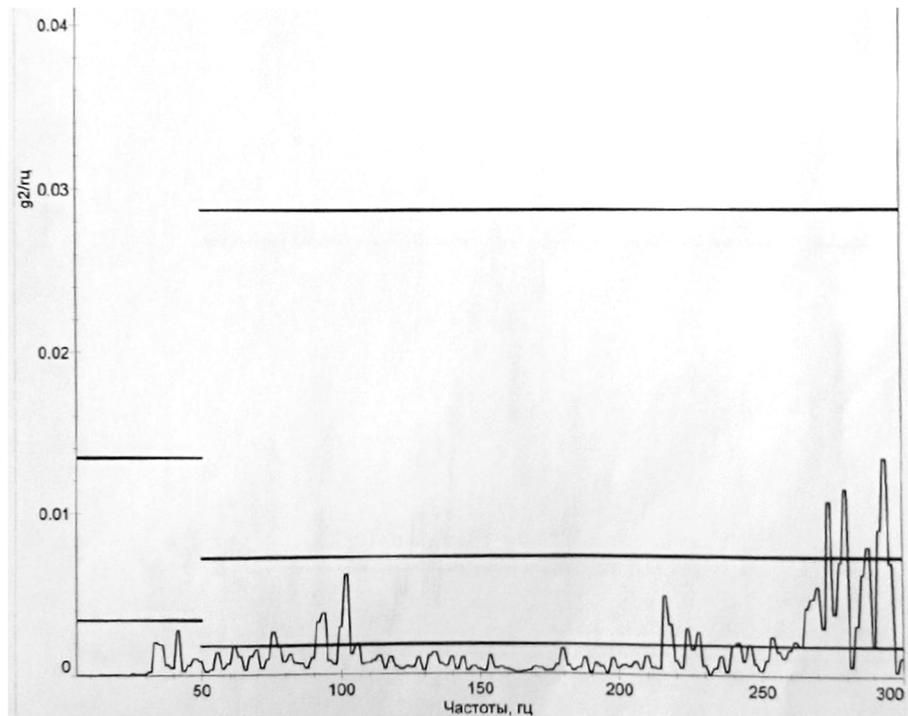


Рис. 4.10. Экспериментальная спектральная плотность вибрационных ускорений $S_x(f)$

Расчетные и экспериментальные спектральные плотности вибрационных ускорений по осям X и Y (рис. 4.5, 4.6 и 4.9, 4.10, соответственно) имеют существенные различия по частотному составу. Наблюдается удовлетворительное соответствие по характеру изменения и по суммарной дисперсии. Такие различия обусловлены зависимостью спектрального состава в эксперименте от сравнительно малого изменения механических и геометрических параметров конструкции, условий закрепления и времени действия вибрации.

Наиболее удовлетворительное соответствие по величинам СКЗ вибрационных ускорений получено по датчикам, расположенным вблизи узлов подвески и наблюдается для уровней составляющих виброускорения по оси X. Наиболее существенное различие уровней виброускорений имеет место для составляющих ускорения по оси Y. Наибольшие уровни ускорения по оси Y наблюдаются на массово-габаритном имитаторе, по оси X – в упругом заполнителе. На результаты моделирования существенное влияние может оказывать количество учитываемой ЭММ в расчете, так по оси X учтено до 70 %, а по оси Y – 40 %.

В целом, результаты моделирования имеют удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными по уровням виброускорений. 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.

Заключение

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.

По основным результатам можно сделать следующие выводы:

- проблема изучена в полном объеме в соответствии с поставленной целью;
- разработанная методика позволяет проводить оценку НДС, определять ресурс конструкции, содержащей точечные сварные соединения, при действии случайных кинематических нагрузок на различных этапах разработки и авиационного изделия, обосновано уменьшить объем его экспериментальной отработки.

Список литературы

1. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. / Ред. Совет: В. Н. Челомей (пред.). Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.
2. Орлов, Б.Д. О прочности соединений из сплава Д16АТ, выполненных точечной сваркой / Б.Д. Орлов, В.Н. Шавырин, Н.А. Новосельцев. – 2010. – Режим доступа: <http://k-svarka.com/content/o-prochnosti-soiedinienii-iz-splava-d16at-vypolniennykh-tochiechnoi-svarkoi> (дата обращения: 11.08.2016).
3. Труфяков, В. И. Усталость сварных соединений / В. И. Труфяков. – Киев: Наукова думка, 1973. – 216 с.
4. Фирсанов, В. В. Расчетные модели напряженного состояния тонкостенных авиационных конструкций с дискретными соединениями / В. В. Фирсанов // Известия ТулГУ. – 2014. – Вып. 11, часть 1. – С. 300-306.
5. Фирсанов, В. В. Метод расчета напряженно-деформированного состояния систем с односторонними связями / В. В. Фирсанов // Известия РАН: Механика твердого тела. – 2003. – № 1. – С. 150-163.
6. Гудков, А. И. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов / А. И. Гудков, П. С. Лешаков. – Изд. 2-е. М.: Машиностроение, 1968. – 470 с.
7. Образцов, И. Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / И. Ф. Образцов, Л. М. Савельев, Х. С. Хазанов. – М.: Высш. школа, 1985. – 392 с.
8. Vibrations of cylindrical pipes and open shells / N. M. Price, M. Liu, R. Eatock Taylor // Journal of Sound and Vibration. – 1998. – 218(3). – P. 361-387.

9. Зарецкий, М. В. Динамика конструкции авиационного изделия при случайном кинематическом нагружении / М. В. Зарецкий, А. С. Сидоренко // Труды МАИ. – 2012. – Вып. 58. – 17 с.
10. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. Пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М.: Высш. Школа, 1982. – 272 с.
11. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник, 4-е изд., перераб. и доп. / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 639 с.
12. Макаревский, Д. И. О несущей способности сварных точек. / Д. И. Макаревский, И. У. Вышедкевич, 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. – 2013. – т. 2. – С. 30-32.
13. Дорофеев, А. Н. Расчет прочности сварных точечных соединений / А. Н. Дорофеев. – М.: Машиностроение, 1964. – 139 с.
14. Иванов, М. Н. Детали машин: Учеб. Для студентов втузов / М. Н. Иванов; Под ред. В. А. Финогенова. – 10-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2006. – 383 с.
15. Exploring the Mechanical Properties of Spot Welded Dissimilar Joints for Stainless and Galvanized Steels / M. Alenius, P. Pohjanne, M. Somervuori, and H. Hanninen // Welding Journal. – 2006. – 85 (12). – P. 305-313.
16. Муратов, В. С. Исследование точечных сварных соединений и определение механических свойств при повышенных температурах листов из алюминиевого сплава 1151 / В. С. Муратов, Д. П. Юдаев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 9. – С. 14-16.
17. Зуев, Л. Б. Структура и свойства сварных соединений, выполненных лазерной и точечной сваркой / Л. Б. Зуев, С. Г. Псахье, А. М. Оришич [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2005. – 8, Спец. Выпуск. С. 87-90.

18. Low-cycle fatigue life prediction of spot welds based on hardness distribution and finite element analysis / Rui-Jie Wang, De-Guang Shang // *International Journal of Fatigue*. – 2009. – 31. – P. 508-514.
19. A spot weld finite element for structural modeling / Pietro Salvini, Francesco Vivio, Vincenzo Vullo // *International Journal of Fatigue*. – 2000. – 22. – P. 645-656.
20. The robustness of dynamic vehicle performance to spot weld failures / S. Doners, M. Brughmans, L. Hermans [et al.] // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2006. – 42. – P. 670-682.
21. Spot weld arrangement effects on the fatigue behavior of multi-spot welded joints / Soran Hassanifard, Mohammad Zehsaz, Firooz Esmaceli // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2011. – 25 (3). – P. 647-653
22. Monte Carlo Simulation of Single Spot and Multi-Spot Welded Lap Shear Specimen by Using Finite Element Method / Mr. Prasad P Kulkarni, Prof. M.L. Kulkarni // *International Journal of Engineering Research and Applications*. – 2012. – Vol. 2. – Issue 2. – P. 715-718
23. Vibration fatigue analysis for multi-point spot-welded joints based on frequency response changes due to fatigue damage accumulation / Seung-Ho Han, Dae-Gyun An, Seong-Jong Kwak, Ki-Weon Kang // *International Journal of Fatigue*. – 2013. – 48. – P. 170-177.
24. A parametric study on fatigue strength of spot-welded joints / Ahmet H. Ertas, Fazil O. Sonmez // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2008. – 31, P. 766-776.
25. Failure characterization of spot welds under combined axial-shear loading conditions / J. H. Song, H. Huh // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2011. – 53. – P. 513-525.
26. Finite Element Model for Spot Welds Using Multi-Point Constraints and its Dynamic Characteristics / Fumiyasu Kuratani, Kazuhei Matsubara, Takashi Yamauchi // *SAE International*. – 2011. – 9 p.
27. Finite-element modelling and updating of laser spot weld joints in a top-hat structure for dynamic analysis / N.A. Husain, H.H. Khodaparast, A. Snaylam [et al.]

- // Proc. IMechE Vol. 224 Part C: J. Mechanical Engineering Science. – 2009. – P. 851-861.
28. Investigation of Tensile Shear fracture of Advanced High Strength Steel spot welds / S. Dancette, D. Fabregue, V. Massardier [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2012. – 25. – P. 112-122.
29. Алямовский, А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 С.
30. Finite element models of spot welds in structural dynamics: review and updating / Matteo Palmonella, Michael I. Friswell, John E. Mottershead, Arthur W. Lees // Computers and Structures. – 2005. – 83. – P. 648-661.
31. Справка SolidWorks Premium. – Режим доступа: <http://help.solidworks.com>, (дата обращения 12.08.2016).
32. Зарецкий, М. В. Моделирование динамического напряженного состояния конструкции авиационного изделия при случайном нагружении / М. В. Зарецкий, А. С. Сидоренко // Труды МАИ. – 2014. – Вып. 75. – 20 с.
33. Effect of fatigue damage on the dynamic response frequency of spot-welded joints / De-Guang Shang, Mark E. Barkey, Yi Wang, Teik C. Lim // International Journal of Fatigue. – 2003. – 25. – P. 311-316.
34. Evaluation of the Cumulative Fatigue Damage on the Spot Welded Joints using 590 МПа-class Steel under Random Loading Conditions / Ryota Tanegashima, Hiroyuki Akebono, Masahiko Kato and Atsushi Sugeta // Proceedings of ESIS Conferences, ECF 19. – 2012. – 8 p. Режим доступа: <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/esis/ECF19/paper/download/8951/5726> (дата обращения 12.08.2016).
35. Finite element based investigation of buckling and vibration behavior of thin walled box beams / K. Ramkumar, H. Kang // Applied and Computational Mechanics. – 2013. – 7. – P. 155-182.

36. Fatigue Life Prediction of Spot-Welded Structures: A Finite Element Analysis Approach / M. M. Rahman, Rosli A. Bakar, M. M. Noor, [et al.] // *European Journal of Scientific Research*. – 2008. – Vol. 22. – No. 3. – P. 444-456.
37. Бутушин, С. В. Обеспечение летной годности воздушных судов гражданской авиации по условиям прочности / С. В. Бутушин, В. В. Никонов, Ю. М. Фейгенбаум, В. С. Шапкин. – М.: МГТУГА, 2013. – 768 с.
38. Стрижиус, В. Е. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций: справочное пособие / В. Е. Стрижиус. – М.: Машиностроение, 2012. – 272 с.
39. ГОСТ 15878-79 Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 11 с.
40. ПИ 1.4.853-2002 Сварка контактная точечная и шовная сталей, жаропрочных и титановых сплавов. – М.: НИАТ, 2002. 108 с.
41. 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.
42. 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. – 2014. – С. 74-75.
43. Overload failure curve and fatigue behavior of spot-welded specimens / Hyungyil Lee, Nahmho Kim, Tae Soo Lee // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2005. – 72. – P. 1203-1221.
44. Кочергин, К. А. Контактная сварка. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 240 с.
45. ГОСТ 22762-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 12 с.

46. Стоев, П. И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости / П. И. Стоев, В. И. Мощенок // Вестник ХНУ им. Каразина. – 2003. – Т. 601. – № 2(22). – С. 106–112.
47. Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
48. Assessing the effect of residual stresses on the fatigue strength of spot welds / D.H. Bae, I.S. Sohn, and J.K. Hong // Welding Journal. – 2003. – 82(1). – P. 18-23.
49. Strain-rate dependence in spot welds: Non-linear behaviour and failure in pure and combined modes I/II / Bertrand Langrand, Eric Markiewicz // International Journal of Impact Engineering. – 2010. – 37. – P. 792–805.
50. Stress intensity factors in spot welds / Ning Pan, Sheri D. Sheppard // Engineering Fracture Mechanics. – 2003. – 70. – P. 671–684.
51. 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.
52. 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.
53. Random Vibrations in Spacecraft Structures Design / Jaap Wijker. – Springer Netherlands, 2009. – 516 p.
54. Effective modal mass & modal participation factors. Revision G / T. Irvine. – 2012. – 25 p. Режим доступа: <http://vibrationdata.com> (дата обращения 12.08.2016).
55. Seismic Design and Retrofit of Bridges / M.J.N. Priestly, F. Seible, G.M. Calvi. – John Wiley & Sons, Inc. – 1996. – 704 p.
56. Essential of Applied Dynamic Analysis / Junbo Jia. – Springer Berlin Heidelberg, 2014. – 424 p.

57. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
58. Зайчик, Л. В. Контактная электросварка легких сплавов / Л. В. Зайчик, Б.Д. Орлов, П.Л. Чулошников. – М.: Машгиз, 1963. – 219 с.
59. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. / Редкол.: Г.А. Николаев (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1978. Т. 1 / Под ред. Н. А. Ольшанского. – 1978. – 504 с.
60. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. Т. 1. – 510 с.; Т. 2. – 825 с.
61. Гусев, А. С. Расчет конструкций при случайных воздействиях / А. С. Гусев, В. А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
62. ГОСТ 25.101–83 Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 21 с.
63. ГОСТ 25.504–82 Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 55 с.
64. Сидоренко, А. С. Статистическая механика и надежность систем: учеб. пособие / А. С. Сидоренко. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 111, [1] с.
65. Суммирование усталостных повреждений. Обзор по материалам иностранной печати за 1946 – 1959 гг. – № 34. – М.: ЦАГИ, 1959. – 97 с.
66. Effect of Variable Load and Cumulative Damage on Fatigue in Vehicle and Airplane Structures / Gassner E. // Intern Conf. on Fatigue of Metals. – London. – 1956. – P. 304-309.
67. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
68. Гусев, А. С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках / А. С. Гусев. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.

69. Райхер, В. Л. Гипотеза спектрального суммирования и ее применение для определения усталостной долговечности при действии случайных нагрузок / В. Л. Райхер. – Труды ЦАГИ. – 1969. – вып. 1134. – 41 с.
70. Райхер, В. Л. Усталостная повреждаемость / В. Л. Райхер: учеб. Пособие. – М.: МАТИ, 2006. – 239 с.
71. Resistance Spot Weldability of High Strength Steel (HSS) Sheets for Automobiles / Hatsuhiko Oikawa, Tatsuya Sakiyama, Tadashi Ishikawa, [et al] // Nippon Steel Technical Report. – 2007. – No. 95. – P. 39–45.
72. Fatigue Strength Prediction of Spot-Welded Joints Using Small Specimen Testing / E. Nakayama, M. Fukumoto, M. Miyahara, [et al.] // Proceedings of ESIS Conferences, ECF 16. – 2006. – 8 p. Режим доступа:
<http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/esis/ECF16/paper/download/7136/3630>
(дата обращения 12.08.2016).
73. ГОСТ 22761-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 9 с.
74. 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.
75. 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.
76. Static and Fatigue Strength of Spot Welded Joints in Ultra-High-Strength Cold-Rolled Steel Sheets / K. Yamazaki, K. Sato & Y. Tokunaga // Welding International. – 2000. – Volume 14. – Issue 7. – P. 533–541.

77. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
78. 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.
79. Бессолова О. А. Расчет усталостной повреждаемости при циклическом и случайном нагружении с ненулевым средним значением / О. А. Бессолова, .., В. Л., Райхер, А.С. Устинов // Ученые записки ЦАГИ. – 1989. – том XX. – № 3. – с. 72-80.
80. 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. – 2016. – С. 160-161.
81. Будник Г.Д. Экспериментальное исследование вибродинамического состояния авиационного изделия со сварными соединениями / Г. Д. Будник, 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. – 2016. – Т. 1. – С. 57-59.
82. 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. – 2016. – Т. 2. – С. 40-42.