

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные
процессы»
(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Разработка метода совершенствования геометрии кронштейна
крепления силового агрегата на основе оценки условий
и локализации его разрушения в САПР»

Обучающийся

К.М. Куликов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент каф. «СОМДиРП» П.Н. Шенбергер

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение.....	3
1 Обзор конструкции кронштейнов силового агрегата и программного обеспечения, применяемого для разработки электронной модели	8
1.1 Конструкции кронштейнов силового агрегата	8
1.2 Обзор программного обеспечения, применяемого для разработки электронных моделей	11
1.3 Построение в САПР электронной модели кронштейна силового агрегата.....	16
2 Инженерный анализ модели кронштейна силового агрегата в САПР.	21
2.1 Обоснование выбора программного продукта CAE.	21
2.2 Инженерный анализ электронной модели кронштейна силового агрегата в САПР.	26
3 Совершенствование конструкции кронштейна в САПР.....	46
3.1 Альтернативные конструкции кронштейна силового агрегата.	46
3.2 Анализ результатов CAE тестирования альтернативных конструкций кронштейна.	58
3.3 Разработка метода совершенствования геометрии кронштейна крепления силового агрегата на основе оценки условий и локализации его разрушения в САПР.....	62
Заключение	655
Список используемых источников.....	666

Введение

Актуальность исследования. Обзор требований к используемым в автомобильной промышленности материалам показал, что каждый элемент в конструкции автомобиля, оказывающий влияние на пассивную безопасность должен соответствовать ряду критериев, в их числе: коррозионностойкость, высокая прочность (в зависимости от локализации и предназначения детали), технологичность, низкий вес [4]. Все вышеперечисленное относится и к кронштейнам силового агрегата.

Кронштейн силового агрегата является крайне важным элементом в конструкции автомобиля. Наравне с элементами платформы и кузова на кронштейне силового агрегата сосредоточена серьезная нагрузка - вес двигателя, коробки переключения передач, а также прочих навесных элементов подкапотного пространства, которые крепятся на силовой агрегат. Его поломка или частичное разрушение может вызвать критические повреждения двигателя, элементов трансмиссии и шасси, а также повлечь за собой потерю управления транспортным средством, в виду полного или частичного отсоединения двигателя и коробки от силовой структуры автомобиля.

В случае, когда кронштейн силового агрегата не имеет надлежащей жесткости, это может вызвать вибрацию, которая приводит к раннему выходу из строя всех сопряженных элементов, включая сам кронштейн. Обусловлено это тем, что длительное воздействие вибрации приводит к появлению усталости металла и ослаблению соединений.

В связи с этими факторами важно, чтобы кронштейн силового агрегата обладал достаточной жесткостью и прочностью. Кроме того, необходимо учитывать, что помимо вибрации кронштейн испытывает статические и динамические нагрузки от элементов силового агрегата, кузова и платформы и чаще всего именно их динамическое воздействие (при резком разгоне, торможении, наезде на препятствие, дорожно-транспортном происшествии)

на кронштейн, во время движения автомобиля, приводит к его разрушению (рисунок 1) [1].



Рисунок 1 – Разрушенный задний кронштейн крепления силового агрегата двигателя

Для проверки свойств кронштейна на ранней стадии проектирования необходимо выполнить анализ прочности и вибронагруженности его модели в системе CAE. Современные программные комплексы CAE обладают большими возможностями по симуляции широкого спектра типов нагрузок, анализу результатов и способны обеспечить понимание о пригодности или не пригодности конструкции за долго до ее физического производства.

Тем не менее, CAE-анализ может содержать недостатки, которые останутся незамеченными до более поздних стадий разработки компонента. Причиной возникновения этих недостатков является то, что анализ прочности и вибронагруженности кронштейна проводится, как правило, в рамках сопряженных с кронштейном элементов и расчетных показателей нагрузок в крайних положениях, которые они ему передают, без учета влияния динамических нагрузок во время перемещения автомобиля по дорожному покрытию (инерция силового агрегата при разгоне и торможении, наезде на препятствие, резком отбое и пробитии амортизаторов). Кроме того, не учитывается специфическое влияние работы силового агрегата на

кронштейн при торможении двигателем и при резком подключении двигателя, работающего на высоких оборотах к трансмиссии. Для получения достоверных результатов о долговечности кронштейнов, чаще всего применяются дорогостоящие ресурсные пробеговые, а так же ускоренные испытания на надежность автомобиля [2].

Цель ускоренного тестирования надежности состоит в том, чтобы быстро и эффективно выявить неисправность, проанализировать ее и улучшить конструкцию. Тестирование также призвано доказать эффективность улучшения, используя фактическое чувствительное к нагрузкам состояние устройства, путем тестирования конструктивного дефекта изделия и повышения его надежности за счет корректировки мер и оценки уровня надежности продукта за короткое время. Суть ускоренного теста заключается в повышении нагрузки, усилении условий испытаний и ускорении выхода из строя прототипа при условии, что механизм отказа исходного прототипа не изменяется и не добавляются новые факторы отказа, чтобы спрогнозировать надежность изделия при нормальной нагрузке за относительно короткое время. Чтобы максимально точно смоделировать фактические условия эксплуатации учитываются следующие принципы:

- Коэффициент отказов при ускоренном испытании должен соответствовать фактическому рабочему состоянию автомобиля, что не должно приводить к увеличению коэффициента отказов.

- Механизм отказа, режим отказа, распределение и последовательность неисправностей должны быть аналогичны таковым при испытании реального автомобиля.

- Сокращение времени тестирования должно быть разумным [5].

Проблема связана с тем, что пробеговые испытания рассчитаны на гарантийный период эксплуатации автомобиля и даже в случае не удовлетворительных результатов по окончанию цикла испытаний, компанией может быть принято решение оставить действующую конструкцию

кронштейна без изменений с целью сохранения сроков внедрения и минимизации затрат на дополнительную подготовку производства.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки метода анализа условий разрушения существующего кронштейна силового агрегата и корректировки его геометрии в САПР. Это позволит повысить долговечность кронштейна и сопряженных узлов без существенных затрат со стороны производителя.

Цель работы заключается в разработке метода совершенствования геометрии кронштейна крепления силового агрегата на основе оценки условий и локализации напряжений в САПР.

Задачи исследования:

1. Провести обзор источников по теме проектирования и испытания кронштейна крепления двигателя легкового автомобиля.
2. Создать конечно-элементную модель кронштейна СА, провести САЕ-расчет для установления зон локализации пиковых напряжений.
3. Провести эксперимент в среде САЕ с последовательным внесением изменений в конструкцию кронштейна и последующим анализом данных.
4. Разработать методику совершенствования геометрии кронштейна.

Научная новизна заключается в разработке метода определения рациональной геометрии кронштейна в области разрушения, с минимальным влиянием на технологию производства, а именно: без замены методики производства, без замены материала, без корректировки режимов.

Метод проведения исследования: метод конечных элементов.

Теоретическая ценность: предлагаемый метод совершенствования геометрии кронштейна силового агрегата позволит выполнять качественную разработку электронной модели на ранних этапах проектирования.

Практическая ценность работы заключается в применении совершенствованной модели в производстве, что позволит уменьшить

затраты на послепродажное обслуживание, повысить срок службы автомобиля, его безопасность и, как следствие, повысить имидж компании.

Объект исследования: кронштейн крепления силового агрегата.

Предметом исследования являются условия и локализация разрушения кронштейна силового агрегата в САПР.

Личный вклад автора заключается в проведении эксперимента в среде CAE по итеративному внесению изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата.

Апробация результатов: результаты диссертационной работы были предоставлены и рассматривались на заседаниях кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» Тольяттинского государственного университета.

На защиту выносятся:

1. Метод совершенствования геометрии кронштейна силового агрегата.
2. Результаты эксперимента по оценке влияния изменения геометрии кронштейна на распределение напряжений.

Структура и объем магистерской диссертации: выпускная квалификационная работа содержит введение, три раздела, заключение и список используемой литературы. Объем работы составляет 70 страниц, 61 рисунок, 4 таблицы.

1 Обзор конструкции кронштейнов силового агрегата и программного обеспечения, применяемого для разработки электронной модели

1.1 Конструкции кронштейнов силового агрегата

Кронштейн силового агрегата (рисунок 2) – это деталь, которая крепит двигатель и коробку переключения передач к кузову автомобиля (рисунок 3).



Рисунок 2 - Задний кронштейн крепления силового агрегата двигателя

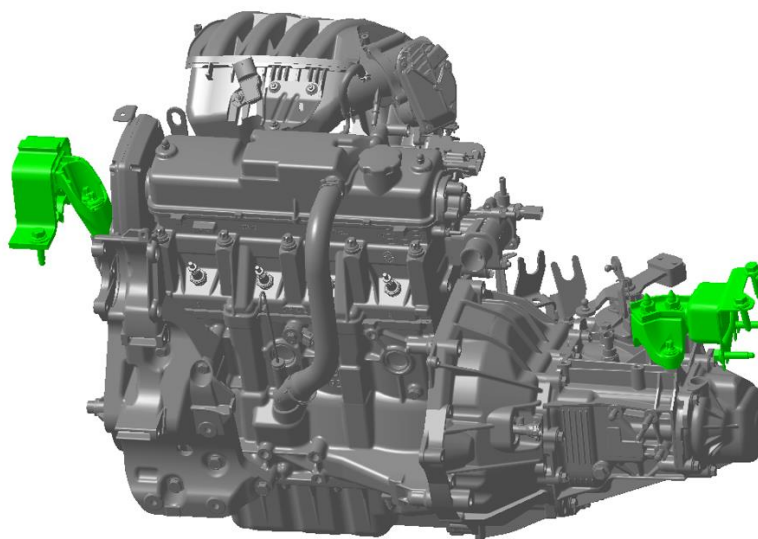


Рисунок 3 – Кронштейны крепления силового агрегата восьмиклапанного двигателя и механической КПП

Кронштейны в основном изготавливаются методом штампования, гибки и литья, реже - методом фрезеровки [20]. Основными материалами для

производства кронштейнов выступают: углеродистая сталь, цветные металлы и их сплавы (рисунок 4). Это обусловлено повышенными требованиями к прочности и надежности данных элементов конструкции силового агрегата. Помимо очевидных плюсов применения стали и цветных металлов для изготовления кронштейнов силового агрегата, так же есть и минусы. Они имеют довольно большой вес, некоторые виды таких кронштейнов подвержены коррозии и должны защищаться от нее дополнительно [21].

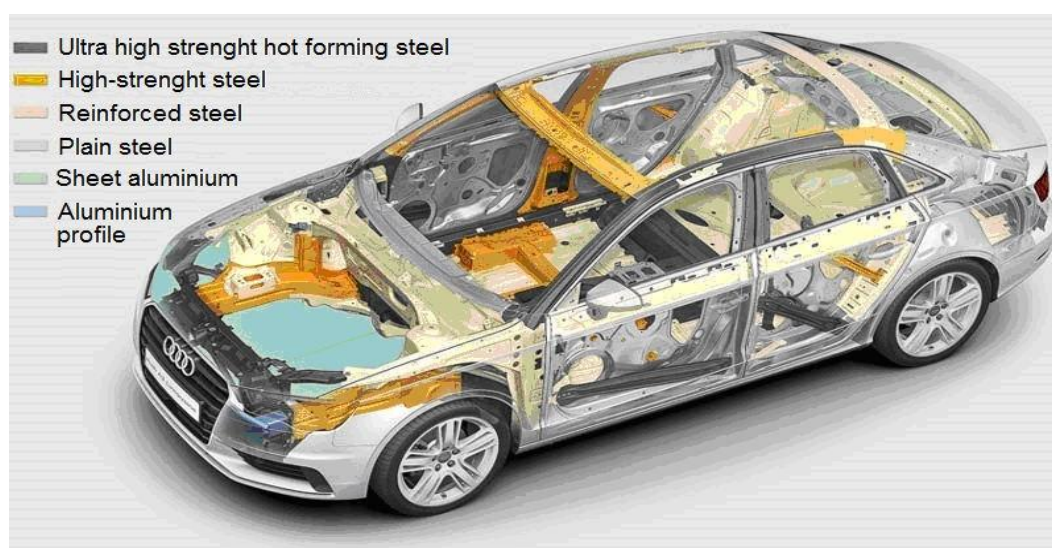


Рисунок 4 – Схема применения различных материалов в конструкции автомобиля [4]

Кроме металлических кронштейнов, так же применяются композитные. Они имеют малый вес, способны превосходить аналогичные стальные кронштейны по прочности в несколько раз. Но такой вид изделия так же имеет недостатки - высокую стоимость материалов, входящих в состав композита, сложную технологию производства, которая подразумевает практически ручной процесс изготовления с минимумом автоматизации [3]. Все это делает конечное изделие крайне дорогостоящим, соответственно и применяется композит в основном на автомобилях высокого ценового сегмента.

Чаще всего кронштейн силового агрегата прикрепляется к силовой установке напрямую, посредством болтовых соединений (рисунок 5). Ответная часть кронштейна приходит и крепится к демпфирующей опоре, которая позволяет гасить вибрации и перемещения силового агрегата, происходящие в процессе эксплуатации автомобиля. Опора, в свою очередь, жестко крепится к несущей конструкции автомобиля – кузову, раме или подрамнику.



Рисунок 5 – Пример крепления кронштейна силового агрегата

Опоры силового агрегата делятся на три основных категории:

1. Пассивные эластомерные опоры. Это опоры с применением вставок из упругих материалов, которые обладают свойством высокой пластичности. К таким материалам можно отнести резину, каучук, полиуретан и прочие виды. Данные опоры являются самыми распространенными, в виду своей высокой надежности и низкой стоимости [11].

2. Пассивные гидравлические опоры. Появились позже пассивных эластомерных опор. Имеют большую динамическую жесткость и возможность настройки реакции опоры на нагрузку [11].

3. Активные опоры. Оснащаются актуаторами различного типа и датчиками вибрации. Способны динамически изменять свою жесткость в зависимости от внешних условий. [11].

Внешний вид трех видов опор представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Пример внешнего вида опор силового агрегата

1.2 Обзор программного обеспечения, применяемого для разработки электронных моделей

Существует две основные категории компьютерных систем, которые применяются на этапе проектирования нового продукта: CAD и CAE-системы.

CAD (computer-aided design) — это общее название для программ и технологий, использующихся в проектировании различных объектов, конструкций и деталей. С помощью CAD-систем можно создавать двумерные (2D) и трехмерные (3D) модели объектов, выполнять различные расчеты, а также формировать конструкторскую документацию в соответствии с требованиями стандартов. CAD-системы широко используются в различных областях, таких как архитектура, машиностроение, электротехника,

строительство и других. Они позволяют ускорить процесс проектирования, улучшить качество проектов и сократить количество ошибок.

К основным функциям САД-систем относятся:

- Создание и редактирование геометрических объектов (точек, линий, кривых, поверхностей и т.д.).
- Работа с трехмерными моделями (моделирование, визуализация, анимация).
- Редактирование и оформление чертежей (нанесение размеров, штриховок, обозначений и т.п.).
- Поддержка различных стандартов и норм (ЕСКД, СПДС, ISO и др.) [22].

На рынке САД систем существует несколько крупных разработчиков, каждый из которых предлагает свои решения для различных областей проектирования.

Autodesk. Компания Autodesk является одним из крупнейших разработчиков программного обеспечения для проектирования. Продукты Autodesk включают: AutoCAD, 3ds Max и Revit, которые используются для 2D и 3D моделирования.

Dassault Systèmes. Эта французская компания предлагает широкий спектр программных решений, включая CATIA, которое используется для разработки продуктов в аэрокосмической и автомобильной промышленности.

PTC. PTC имеет несколько продуктов для проектирования, включая Creo и Pro/ENGINEER, которые используются в машиностроении и производстве.

Siemens. Разработчик предлагает продукты для управления жизненным циклом продукта (PLM), включая Siemens NX, который используется в машиностроении, производстве и других отраслях.

SolidWorks. Это программное обеспечение для 3D-моделирования, используемое в различных отраслях, включая машиностроение и дизайн изделий [23].

Siemens NX является одним из лидеров среди CAD-систем благодаря своим широким возможностям и высокой эффективности. Он имеет ряд преимуществ, таких как:

1. Высокая точность и детализация моделей. Siemens NX позволяет создавать 3D-модели с высокой степенью детализации, что обеспечивает более реалистичное представление объекта.

2. Удобный интерфейс. Интерфейс Siemens NX интуитивно понятен и удобен в использовании, что упрощает процесс проектирования и снижает вероятность ошибок.

3. Широкий спектр инструментов. Siemens NX предлагает большой выбор функционала для работы с 3D-моделями, включая инструменты для моделирования, анимации, визуализации и т.д.

4. Поддержка различных форматов файлов. Siemens NX поддерживает большое количество форматов файлов, что позволяет работать с моделями, созданными в других CAD-системах, без необходимости конвертации.

5. Интеграция с другими программами. Siemens NX интегрируется с другими программными продуктами Siemens, такими как Simcenter и Solid Edge, что позволяет использовать данные из других программ в процессе проектирования.

На основании проведенного обзора программного обеспечения установлено, что Siemens NX обладает всем необходимым функционалом, для использования его в рамках проводимого исследования.

Рассмотрим общий вид интерфейса Siemens NX (рисунок 7).

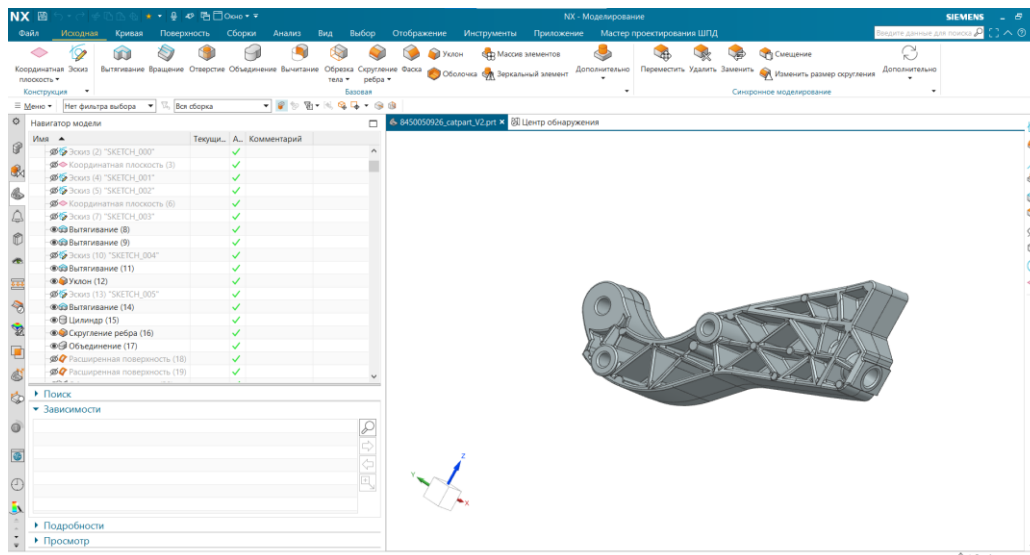


Рисунок 7 - Интерфейс Siemens NX

Рассмотрим подробнее группы инструментов Siemens NX:

1. Заголовок окна, отражающий в себе помимо названия самой системы также активное в данный момент приложение, имя обрабатываемой детали и ее состояние в случае внесения в него изменений (рисунок 8).

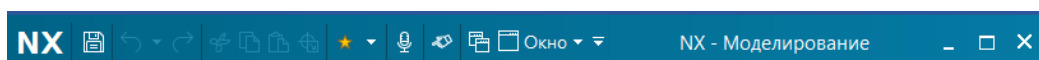


Рисунок 8 – Заголовок окна Siemens NX

2. Строка основного меню, структура которой зависит от активного в текущий момент приложения и выбранной роли (рисунок 9).



Рисунок 9 – Строка основного меню Siemens NX

3. Инструментальные панели, количество и состав которых определяется в зависимости от используемого приложения и заданной роли (рисунок 10).

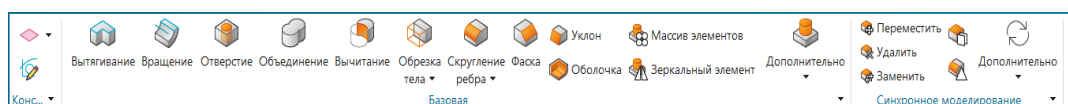


Рисунок 10 – Инструментальные панели Siemens NX

4. Панель выбора, содержащая определенный набор команд и параметров, регулирующих интерактивный выбор пользователя в ходе работы с моделью (рисунок 11).

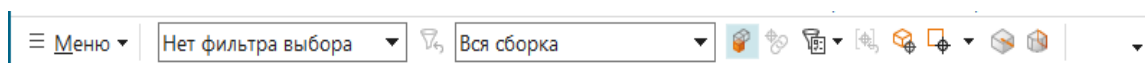


Рисунок 11 – Панель выбора Siemens NX

5. Графическая область, где визуализируется геометрия электронной модели проектируемого объекта (рисунок 12).



Рисунок 12 – Графическая область Siemens NX

6. Панель ресурсов, включающая в себя набор вкладок, каждая из которых выполняет определенную функцию. Например, вкладка «Навигатор модели», отображает каждый элемент модели, использованный во время проектирования (рисунок 13).

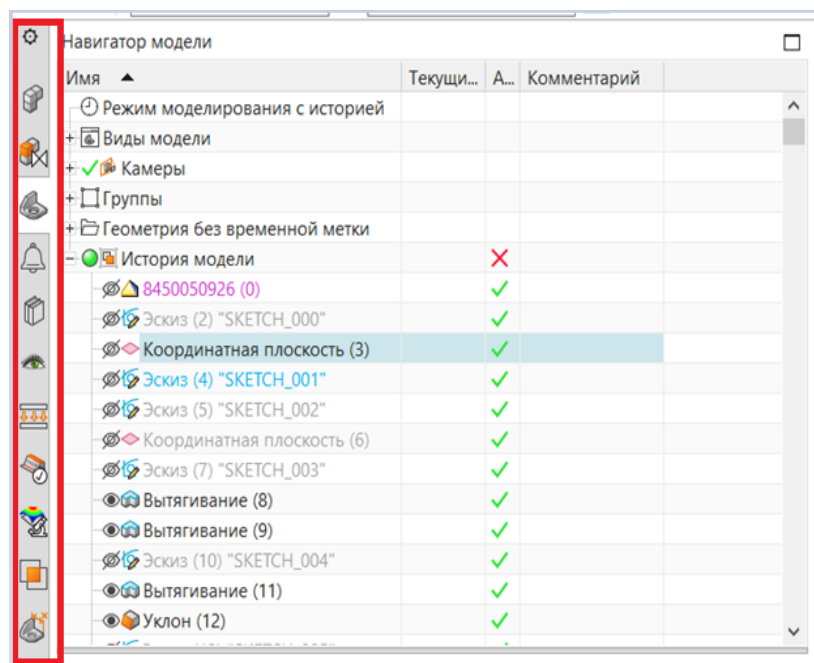


Рисунок 13 – Панель ресурсов Siemens NX

7. Строка состояния и подсказок, где отображаются контекстные советы для пользователя и текущий статус выполнения операции (рисунок 14).

Выберите объекты и нажмите MB3 или дважды щелкните мышью на объекте

Рисунок 14 – Строка состояния и подсказок Siemens NX

1.3 Построение в САПР электронной модели кронштейна силового агрегата

Перейдем к построению электронной модели кронштейна в программном комплексе Siemens NX.

— Запускаем Siemens NX, создаем новый файл модели и переходим в приложение «Моделирование» для начала построения.

— Произведем построение эскиза базовой геометрии кронштейна (рисунок 15). Для построения первой базы создаем координатную плоскость XZ в месте крепления кронштейна к силовой структуре автомобиля, создаем новый эскиз на координатной плоскости и строим окружность. Центр данной

окружности так же будет являться границей разъема детали. Создаем новый эскиз в плоскости ZY и описываем границы кронштейна в рамках заданной плоскости при помощи базовых элементов геометрии, привязываясь спроецированной точке центра ранее созданной окружности. Создаем дополнительный эскиз в плоскости ZY и строим окружности, которые впоследствии будут использованы для моделирования отверстий для крепления кронштейна.

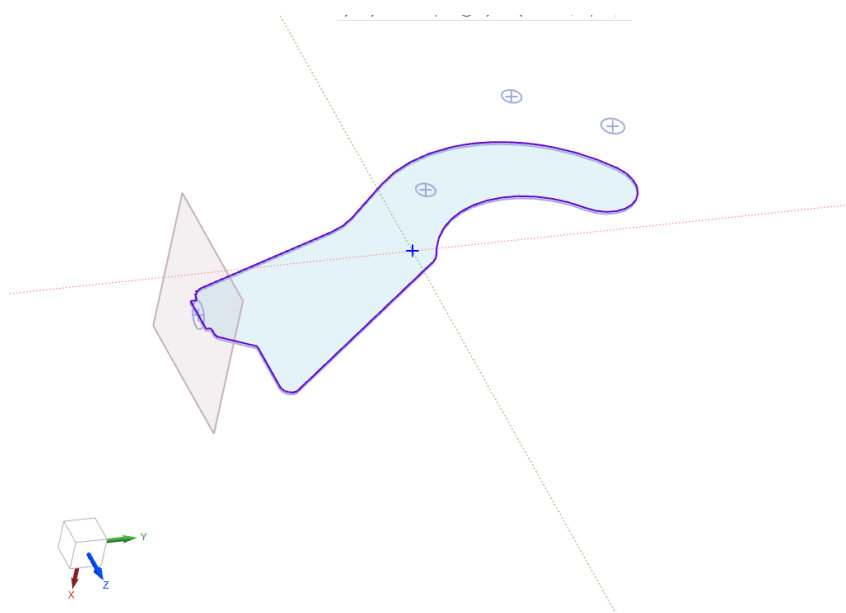


Рисунок 15 – Результат построения эскиза базовой геометрии кронштейна силового агрегата

— Применим операцию двухстороннего вытягивания к эскизу внешней границы кронштейна, после чего зададим уклон. Для каждой стороны кронштейна в плоскости ZY создадим эскиз геометрии для последующей идеализации модели. Произведем вычитание построенных эскизов с каждой из сторон будущего кронштейна, учитывая необходимый отступ от границы разъема детали. Построим цилиндры по ранее заданным эскизам окружностей, при помощи булевых операций задаем отверстия необходимого диаметра в построенных цилиндрах. Результат построения показан на рисунке 16.

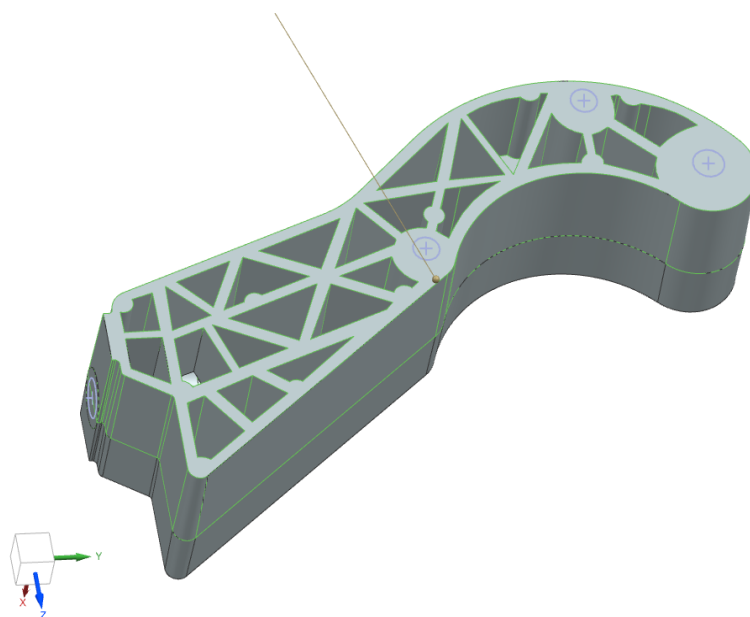


Рисунок 16 – Результат построения базовой геометрии кронштейна силового агрегата

— Построим эскизы вертикальных сечений и проведем их вытягивание с вычитанием наружного контура. Так же на данном этапе необходимо построить дополнительные выступы и цилиндры в местах пересечения ребер жесткости, которые предполагаются в конструкции данного кронштейна и произвести вытягивание цилиндров с отверстиями под крепеж до необходимых размеров. Результат данных операций показан на рисунке 17.

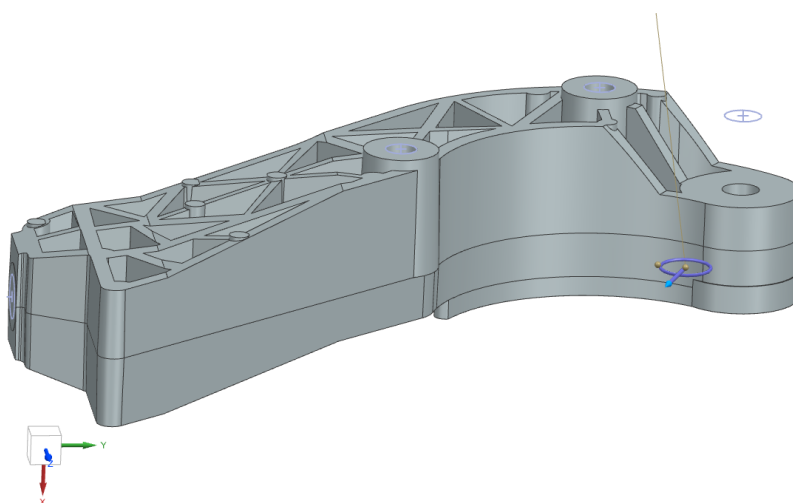


Рисунок 17 – Промежуточный результат построения электронной модели кронштейна

— На завершающем этапе произведем скругление всех ребер электронной модели кронштейна. Для минимизации возможности возникновения ошибок при скруглении ребер следует применять данную операцию итеративно, для схожих областей. Например, сначала для всех ребер внутреннего периметра углублений кронштейна, лежащих в плоскости YZ , затем для ребер тех же углублений, но лежащих в плоскости XZ . При применении операции скругления сразу к большому количеству ребер, в детали схожей по конструкции с представленным кронштейном вероятность возникновения конфликтов повышается. Окончательный результат построения электронной модели кронштейна представлен на рисунке 18.

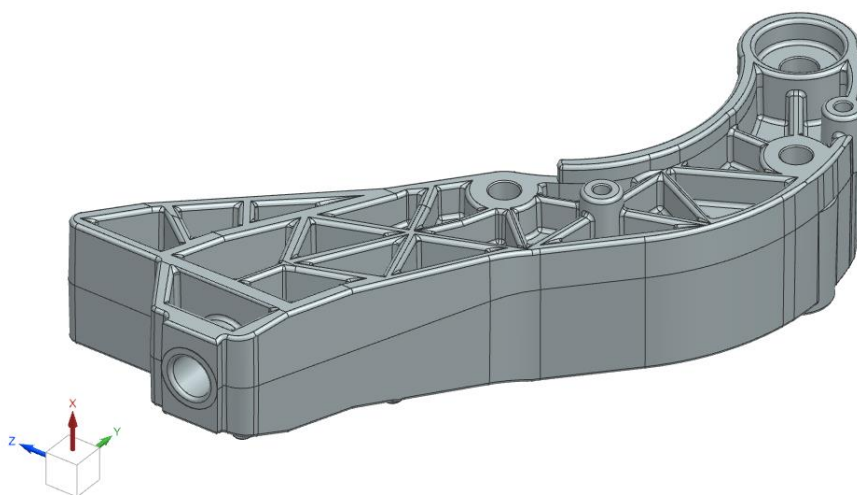


Рисунок 18 – Окончательный вид электронной модели кронштейна

По итогам проведенной работы была получена электронная модель кронштейна силового агрегата, для проведения последующего САЕ-анализа. Данная электронная модель в дальнейшем будет рассматриваться в качестве референса для сравнительного анализа с альтернативными версиями электронных моделей кронштейна.

Выводы по первому разделу

1. Установлено, что кронштейн крепления силового агрегата является ответственным элементом структуры автомобиля. Ошибка в конструкции кронштейна может привести к его разрушению, что в свою очередь влечет риск повреждения элементов окружения, а именно: двигателя, коробки переключения передач, элементов кузова. Помимо этого, существует риск потери управления транспортным средством, ввиду падения двигателя на дорожное покрытие.

2. Выявлена необходимость разработки метода и совершенствования геометрии кронштейна крепления силового агрегата в САПР.

3. Осуществлен выбор программного обеспечения (Siemens NX), для применения его функционала в процессе разработки электронных моделей.

4. Выполнена разработка электронной модели кронштейна силового агрегата.

2 Инженерный анализ модели кронштейна силового агрегата в САПР

2.1 Обоснование выбора программного продукта CAE

Тенденции развития современной промышленности диктуют тренд на стремительное сокращение сроков разработки продукции и ее валидации с целью сокращения срока выхода на рынок [30]. Основным инструментом сокращения возникающих издержек и времени выхода продукции на рынок является CAE [16].

CAE — это программное обеспечение, используемое для расчётов, анализа и симуляции любых физических процессов для решения задач проектирования. CAE-системы востребованы в легкой и тяжелой промышленности, особенно в авиастроении, ракетостроении, машиностроении и энергетике. Такие программы способны, при помощи расчётных методов, моделировать любое физическое воздействие на изделие, при этом доступны как числовые результаты симуляции, так и визуальные [28].

CAE можно условно разделить на три категории:

1. Полнофункциональные системы инженерного анализа с мощными инструментами, большими хранилищами типов для сеток конечных элементов, а также для всех видов физических процессов. Они предоставляют свои собственные инструменты моделирования геометрии.

2. Системы инженерного анализа среднего уровня. Такие системы не обладают мощными вычислительными возможностями и хранят данные в своих собственных форматах. Некоторые из них включают встроенный интерфейс в системах ACD, другие считывают геометрию из САПР.

3. Системы инженерного анализа, встроенные в тяжелые САПР. Данные системы имеют значительно менее мощные инструменты анализа, но они ассоциативны с геометрией, поэтому отслеживают изменения модели.

Расчетные данные структурируются и интегрируются в общую систему проектирования тяжелых САПР.

С помощью CAE можно осуществлять:

- прочностной анализ компонентов и узлов на основе метода конечных элементов;
- термический и гидродинамический анализ;
- кинематические исследования;
- моделирование таких процессов, как литье под давлением;
- оптимизацию продуктов или процессов;
- другие узконаправленные инженерные исследования.

Для проверки качества проектируемых изделий и оценки результата взаимодействия различных подсистем и компонентов друг с другом проводятся цифровые (виртуальные) испытания на виртуальных испытательных стендах и полигонах.

ГОСТ 16504-81 дает определение испытательного стенда как средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения условий испытаний [14]. Например, это может быть вибрационный стенд для проведения специализированных испытаний изделий, которые будут испытывать вибрационное воздействие (рисунок 19).



Рисунок 19 – Пример испытательного стенда

Понятие испытательного полигона, в рамках данного ГОСТ, истолковывается как территория и испытательные сооружения на ней, оснащенные средствами испытаний и обеспечивающие испытания объекта в условиях, близких к условиям эксплуатации объекта [14]. В качестве примера, можно привести испытательный полигон крупного производителя грузовых автомобилей, на полигоне которого автомобили проходят испытания связанные с разгоном и торможением, преодолением брода, подъем и спуск со склона и другие испытания (рисунок 20).



Рисунок 20 – Пример испытательного полигона

Обычно требуется провести десятки тысяч таких испытаний для подсистем и компонентов. При этом опыт показывает, что количество проведённых цифровых испытаний примерно соответствует количеству требований и целевых показателей. Виртуальные испытания являются актуальным подходом в современной промышленности, в рамках решения задач валидации конструкции, который позволяет существенно повысить эффективность, как фазы разработки, так и фазы индустриализации, за счет минимизации количества итераций корректировки геометрии уже спроектированного изделия [24].

Для ускорения процесса разработки компьютерных моделей и снижения себестоимости всего проекта проводятся цифровые испытания с

использованием виртуальных испытательных стендов и полигонов. Чтобы результаты были максимально приближены к реальности, необходимо разработать и применить точные цифровые модели всего оборудования, которое используется при реальных тестах. Виртуальные испытания на полигоне должны быть организованы таким образом, чтобы условия соответствовали реальной эксплуатации объекта [26], [27].

Явным преимуществом проведения испытаний на виртуальном стенде или полигоне является возможность их круглосуточной работы без перерывов на проведение технического обслуживания или ремонта. Кроме того, сам процесс испытания в цифровой среде происходит значительно быстрее за счет симуляции всех физических процессов [25]. Тем не менее, как у виртуальных, так и у реальных испытаний присутствуют как преимущества, так и недостатки [17] (рисунок 21). Окончательный выбор между концепцией виртуальных или физических испытаний производится на основании оценки совокупности актуальных факторов и доступных ресурсов.

Не все предприятия обладают достаточным уровнем компетенций для проведения полноценных виртуальных испытаний, не смотря на то, что современные отрасли промышленного производства находятся в условиях высокой конкуренции и отдают высокий приоритет повышению операционной эффективности [18].

В состав системы виртуальных испытаний входят следующие основные компоненты:

- подсистема математического моделирования агрегатов;
- подсистема планирования эксперимента;
- подсистема имитации погрешностей установки параметров и измерений;
- подсистема визуализации процесса испытаний и документирования.

Принципиальная схема проведения виртуальных испытаний на примере компании КАМАЗ представлена на рисунке 22. Ключевым в данной принципиальной схеме является наличие возможности выбора и

модификации виртуальных моделей ($A_1, A_2 \dots A_N$) в процессе проведения испытания, а так же наличие базы данных результатов виртуальных испытаний, которая обеспечивает системную запись, хранение и отображение результатов испытаний [19].

Преимущества и Недостатки ...

Виртуальное испытание на компьютере...	Реальное испытание в цехе...
Затраты финансовых средств минимальны	Затраты финансовых средств гораздо существеннее
Затраты времени минимальны	Затраты времени более ощутимы
Дают исчерпывающее представление о реальной работе конструкции	Не дают никакой информации о реальной работе конструкции
Практически безопасно для человека	Опасно для человека
Дают приближенное значение разрушающей нагрузки	Дают точное значение разрушающей нагрузки
Требуют специальных теоретических знаний	Не требуют специальных теоретических знаний

Рисунок 21 – Преимущества и недостатки виртуальных и реальных испытаний [17]

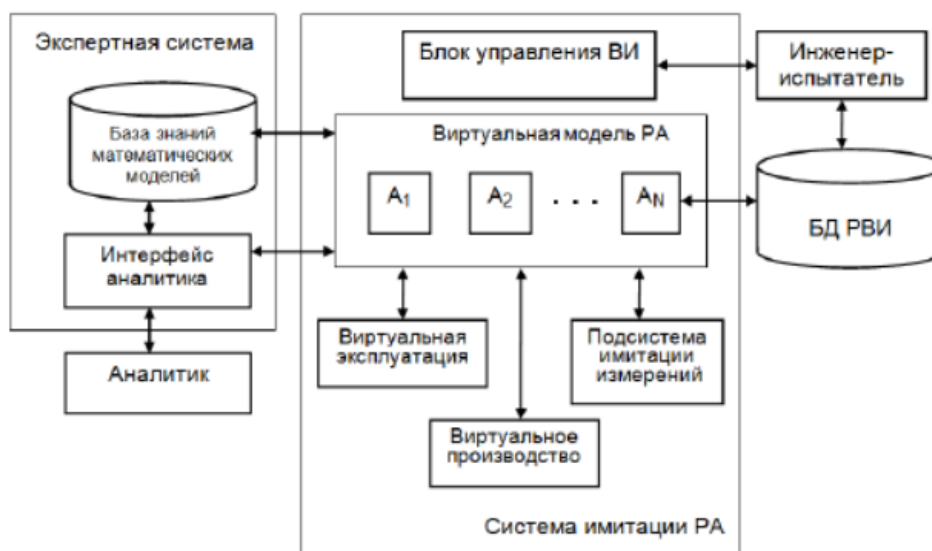


Рисунок 22 – «Общая структура системы виртуальных испытаний агрегатов»
(A_m - модели агрегатов; БД РВИ - база данных результатов виртуальных испытаний; РА - роботизированный автомобиль) [19]

К ключевым преимуществам Siemens NX можно отнести:

1. Широкий спектр инструментов для анализа по сравнению с конкурентами.
2. Результаты анализа в Siemens CAE более точны и надежны благодаря использованию передовых методов и алгоритмов, а также тесному сотрудничеству с научными и промышленными партнерами с целью разработки новых методов и алгоритмов анализа, повышающих точность результатов.
3. Siemens CAE обладает более удобным и понятным интерфейсом по сравнению с другими CAE-системами.
4. Siemens CAE хорошо интегрируется с другими продуктами Siemens, что облегчает работу с данными.
5. Siemens CAE поддерживает больше стандартов и форматов файлов по сравнению с другими системами.

В рамках решения задачи по совершенствованию конструкции кронштейна силового агрегата предполагается применение нескольких итераций по внесению изменений в электронную модель изделия и последующему проведению его инженерного анализа, что является основным критерием для использования программного комплекса Siemens NX, так как данное программное обеспечение является средой, которая позволяет оперативно производить корректировки в электронной модели, на основании данных полученных из CAE-модуля и сразу проводить повторный анализ, используя заданные ранее настройки NX Advanced Simulator.

2.2 Инженерный анализ электронной модели кронштейна силового агрегата в САПР

Порядок проведения инженерного анализа можно разделить на несколько основных этапов:

1. Определение геометрии модели.

Геометрия модели определяется электронной моделью и включает в себя назначение размеров, форм и других характеристик объекта.

2. Разбиение модели на конечные элементы.

Объект разбивается на множество конечных элементов, которые представляют собой простейшие геометрические формы, такие как треугольники, четырехугольники, тетраэдры и др.

3. Определение свойств материалов.

Для каждого элемента определяются свойства материала, такие как модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность и другие характеристики, которые влияют на поведение материала при нагрузках.

4. Задание граничных условий и нагрузок.

Определяются условия на границах модели, такие как закрепление, нагрузки, температурные условия и т.д.

5. Решение задачи.

Программное обеспечение выполняет численное решение задачи, используя метод конечных элементов, и выдает результаты в виде значений напряжений, деформаций, перемещений и множества других параметров необходимых для проведения анализа.

6. Анализ результатов.

Полученные результаты оцениваются и интерпретируются, чтобы получить информацию о поведении модели под действием нагрузки с целью установления ее прочности и надежности.

7. Внесение изменений в электронную модель изделия, при необходимости, на основании данных - результатов анализа.

Например, выполняется изменение сетки, повторяется решение. Если результаты анализа неудовлетворительны, то сетка может быть улучшена, путем добавления дополнительных элементов или изменения их размеров. Так же может быть изменен тип сетки. Кроме изменения вышеописанных параметров часто проводится изменение типа материала, что так же может

значительно отразиться на конечном результате. После внесения необходимых корректировок задача решается снова.

Данный цикл может повторяться неограниченное количество раз, пока не будут получены удовлетворительные результаты.

Рассмотрим описанный выше процесс в рамках проведения инженерного анализа электронной модели кронштейна силового агрегата, разработанного ранее.

Для перехода к инструментам CAE в Siemens NX необходимо перейти в «пре/постпроцессор». Для этого необходимо выбрать соответствующую опцию в выпадающем списке вкладки «Файл» (рисунок 23).

После перехода в «пре/постпроцессор» функционал рабочей области изменится, в том числе станут доступными инструменты создания сетки и назначения материала.

На следующем этапе необходимо задать тип и размер конечного элемента для конечно-элементной сетки электронной модели кронштейна. Данный этап является определяющим для качества результатов расчета, так как плотность сетки конечных оказывает прямое влияние на их точность, а так же определяет требования к программному и аппаратному обеспечению, применяемому для выполнения расчетов

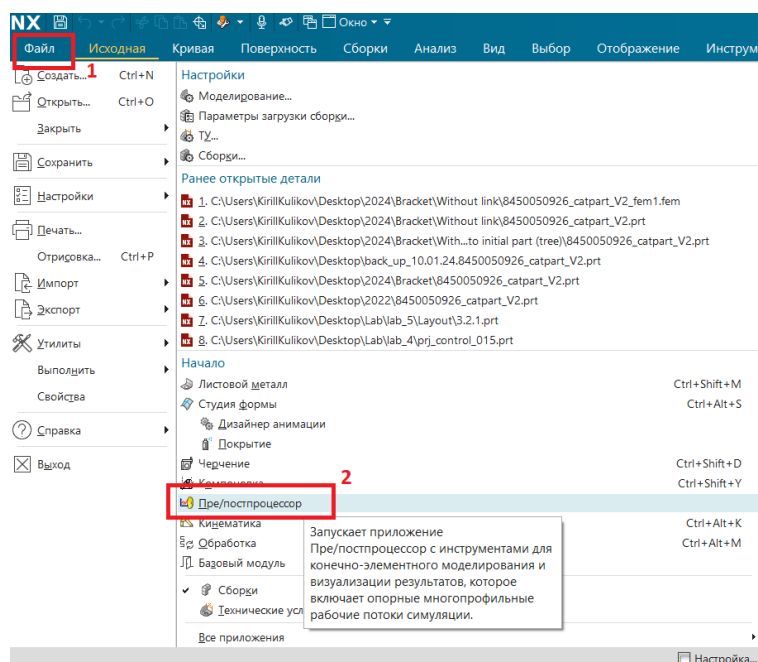


Рисунок 23 – Переход в «пре/постпроцессор»

Определение рационального размера конечного элемента (FE - finite element) в конечно-элементной сетке для последующего САЕ-анализа зависит от ряда факторов и способно, в конечном счете, оказывать значительное влияние на результаты исследования. При определении размера конечного элемента нужно исходить из специфики конкретной модели. Следует учитывать следующие аспекты:

1. Зависимость от типа проводимого исследования. Например, для структурного анализа размер конечного элемента часто выбирается, исходя из потребности в наиболее точной оценке деформаций и напряжений. В данном случае мелкий размер конечных элементов позволит получить более точные результаты. Для термического же анализа может быть достаточно крупного размера конечных элементов.

2. Чем сложнее геометрия модели, тем более меньший размер должны получать конечные элементы. Остроугольные и тонкие детали требуют мельчайших элементов для точного отображения формы и возможности проведения корректных расчетов.

3. Требования к точности анализа тоже влияют на подход к определению размера конечного элемента. Более мелкая сетка приведет к более точным результатам в модели, но увеличит время и ресурсы, затрачиваемые на анализ. Важно найти баланс между точностью и затрачиваемыми ресурсами. Например, если исследование предполагает анализ силовой структуры рамы, на предмет соответствия ее прочности критическим нагрузкам, которая содержит второстепенные, мелкие элементы, не оказывающие значительного влияния на прочность (табличка завода-изготовителя, закрепленная на заклепках) – допускается пренебречь заданием более мелкого размера конечных элементов.

Существует 4 типа конечных элементов:

- 0D-сетка. Предназначена для создания 0D-элементов, имитирующих упруго-демпферную связь, пружину, демпфер между объектами, элемент сосредоточенной массы и др. [6].

- 1D-сетка. Представляет собой стержневые элементы на ребрах и линиях [6].
- 2D-сетка. Применяется для оболочечных элементов на гранях и поверхностях.
- 3D-сетка. Применяется для объемных тел. 3D-сетка в свою очередь разделяется на:

3D-тетраэдральную сетку, которую рекомендуется использовать для объектов, имеющих сложную геометрическую форму, например, для корпусных деталей, заготовки которых получены литьем. Используют тетраэдральные элементы первого (СТЕТРА(4)) и второго (СТЕТРА(10)) порядка, содержащие 4 и 10 узлов соответственно (рисунок 24) [6].



Рисунок 24 – Тетраэдральные элементы

3D-гексаэдральную сетку рекомендуется использовать, если геометрия модели построена инструментами «заметания» (команды «Вытягивание» и «Вращение» модуля «Моделирование»). Различают элементы гексаэдральной сетки первого (СНЕХА(8)) и второго (СНЕХА(20)) порядка, содержащие 8 и 20 узлов соответственно (рисунок 25) [6].



Рисунок 25 – Гексаэдральные элементы

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что применение тетраэдральной сетки для рассматриваемого в рамках данной работы кронштейна силового агрегата является наиболее подходящим вариантом.

Переходим в меню задания параметров тетраэдральной сетки по одноименной клавише на инструментальной панели. После чего выбираем тело кронштейна, для определения объекта применения параметров сетки и указываем тип сетки.

Следует отметить, что при определении размера конечного элемента максимальный его размер должен быть сопоставим с наименьшим размером рассматриваемой части детали, но при этом вероятность получения не корректных данных анализа значительно повышается, результат может граничить или заходить за рамки приемлемых допусков. Рекомендуется задавать размер конечного элемента равному одной трети от размера значимого при проведении расчета элемента детали [7]. Минимальная толщина элемента в рассматриваемой модели составляет 3 мм (толщина ребра жесткости внутри кронштейна) из этого следует, что задание 1 мм в качестве размера конечного элемента будет достаточным. Задаем данный параметр и нажимаем кнопку «ОК».

Результат построения сетки на электронной модели кронштейна силового агрегата в увеличенном масштабе показан на рисунке 26. Мы можем наблюдать равномерную, однородную сетку. Все значимые радиусные элементы описаны хорошо и позволяют получить представление о нюансах геометрии рассматриваемого кронштейна. На рисунке 27 показан наименьший радиус в рамках рассматриваемой модели, описанный конечными элементами. Видно, что область радиуса описывается пятью конечными элементами. Данного количества достаточно, чтобы полноценно описывать все нюансы геометрии схожих областей. Производить дополнительное уменьшение размера конечного элемента не целесообразно, в виду значительного потенциального увеличения времени на проведение расчета против незначительного увеличения точности результатов.

Дополнительно, можно ознакомиться с тем, как визуализируются конечные элементы в теле самого кронштейна на сечении, представленном на рисунке 28.

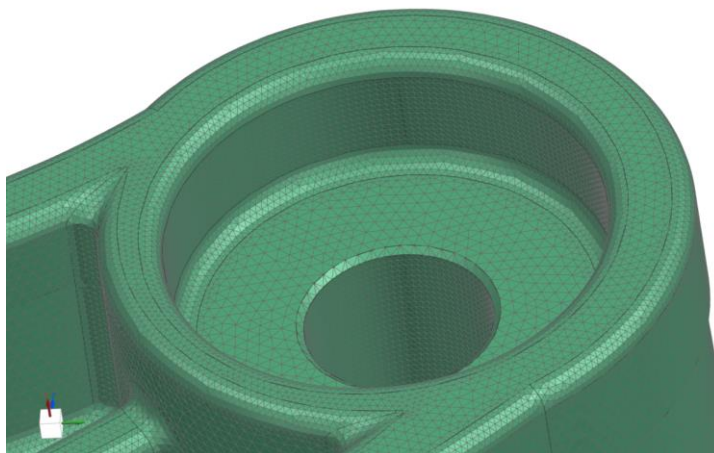


Рисунок 26 – Результат построения конечно-элементной тетраэдральной сетки

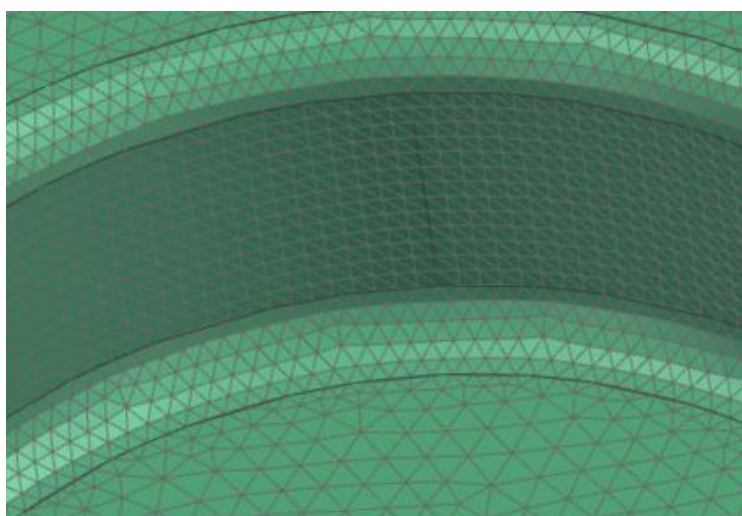


Рисунок 27 – Результат построения конечно-элементной тетраэдральной сетки

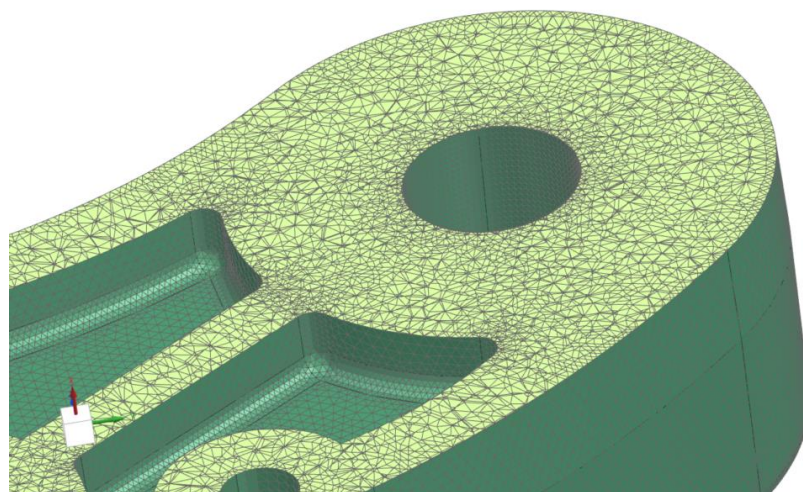


Рисунок 28 – Вид конечно-элементной сетки в теле кронштейна

После построения сетки следует убедиться в ее качестве, для этого переходим во вкладку проверки качества элементов на инструментальной панели и запускаем проверку, активировав предварительно формирование отчета по предупреждениям и ошибкам. Отчет по результатам проверки представлен на рисунке 29.

Журнал			
Файл(F) Изменить(E)			
=====			
Результаты проверки формы элемента			
=====			
Обзор			
	Ошибка номера	Предупреждение о номере	Номер проверен
Элементы	0	15070	5613166

Рисунок 29 – Отчет по результатам анализа конечно-элементной сетки на наличие ошибок и предупреждений

Помимо текстового отчета, доступно визуальное отображение результатов анализа (рисунок 30).

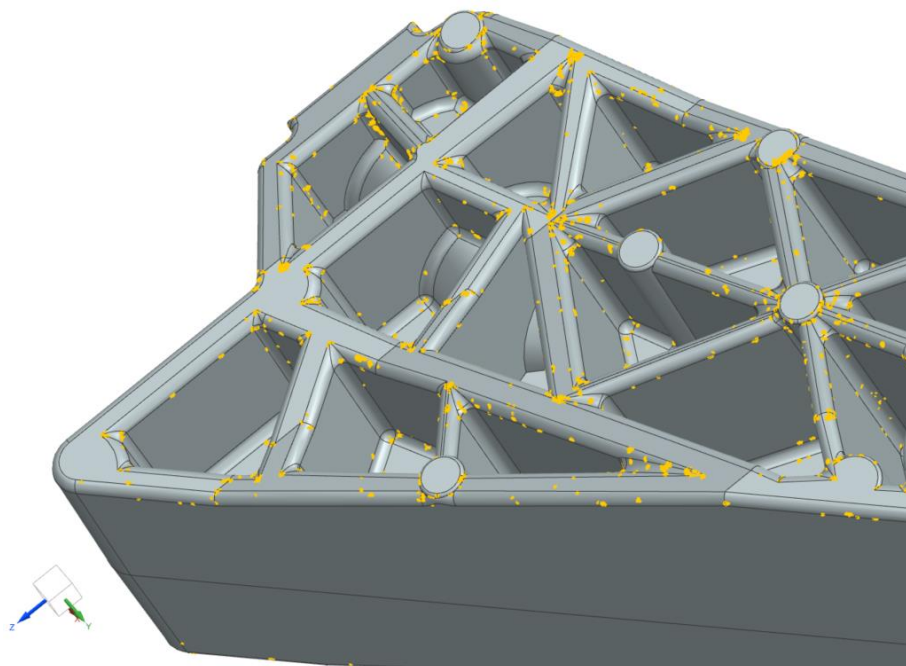


Рисунок 30 – Визуализация результатов анализа конечно-элементной сетки на наличие ошибок и предупреждений

Исходя из результатов проверки видно, что ошибки отсутствуют, но присутствуют предупреждения. Данное отклонение не является критическим, а лишь указывает на элементы сетки, которые могут оказывать незначительное влияние на результаты расчетов. В дальнейшем, при анализе данных, следует обратить особое внимание на подсвеченные области и провести параллель на предмет связи с локализацией напряжения и разрушений.

Помимо программных методов проверки можно использовать метод визуального контроля. Данный подход не даст абсолютно точных результатов, но позволит сэкономить время и оперативно выявить явные недостатки в сетке. Визуально, сетка должна быть равномерно распределена по телу. Конечные элементы не должны иметь сильно отличающиеся размер и геометрию. Пример некачественной конечно-элементной сетки представлен на рисунке 31.

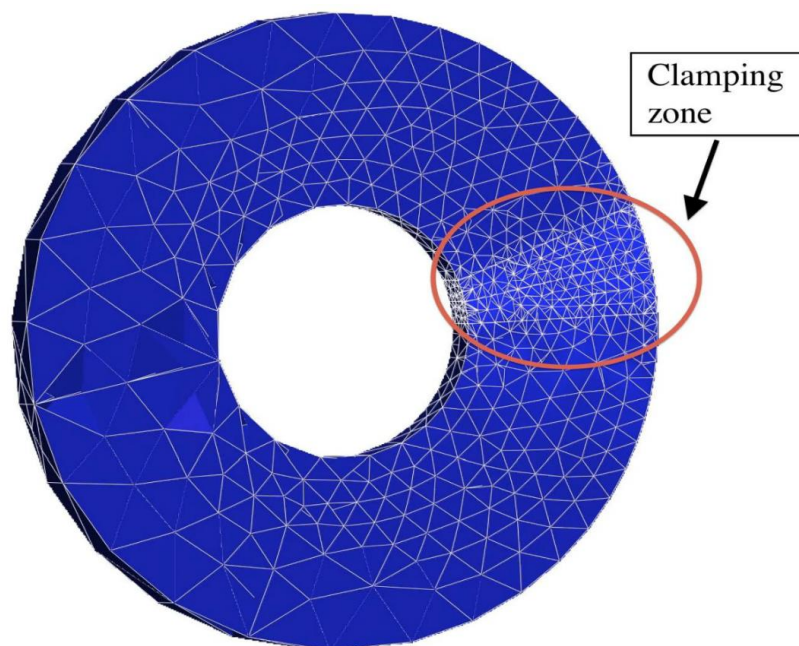


Рисунок 31 – Пример некачественной конечно-элементной сетки

После проверки качества сетки можно переходить к заданию свойств материала. Для этого необходимо развернуть вкладку «3D коллекторы» в навигаторе симуляции и открыть диалоговое окно коллектора созданной ранее сетки, после чего перейти в настройки нажатием на значок гаечного ключа, далее перейти в окно настройки материала (рисунок 32).

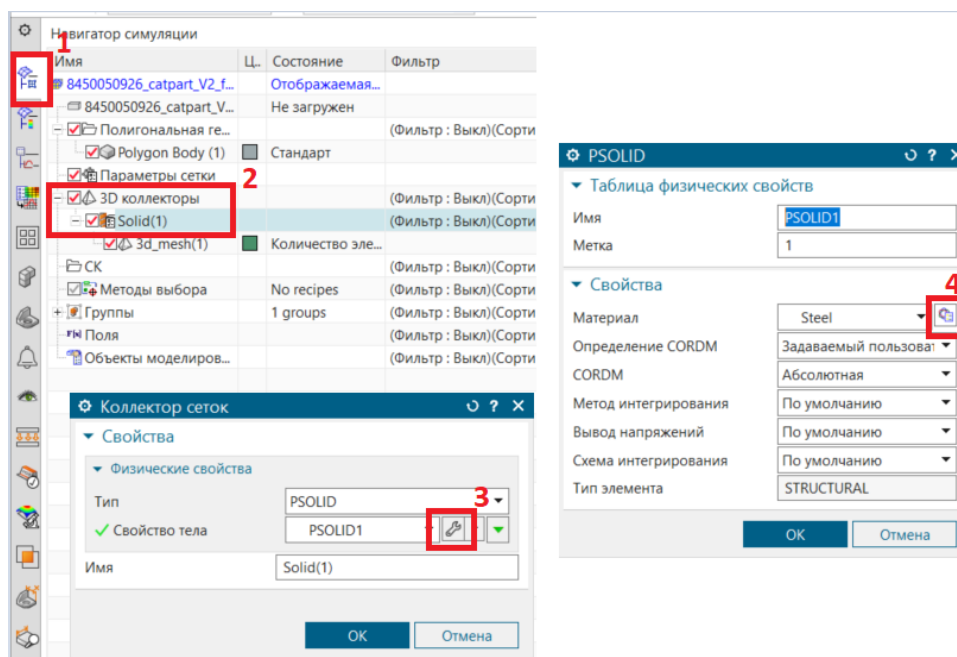


Рисунок 32 – Порядок действий для открытия меню «Список материалов»

Наиболее актуальным материалом в автомобильной промышленности с точки зрения физических свойств является алюминий. Сплавы алюминия являются легким и прочным материалом, отлично сопротивляются коррозии и чаще всего применяются для изготовления ответственных элементов, как в автомобильной, авиационной, космической, так и во многих других требовательных производственных отраслях [8]. В рамках данного исследования предполагается использование стандартного материала библиотеки NX - Aluminum 2014.

Использование материала из стандартной библиотеки обусловлено тем, что целью данной работы является разработка метода совершенствования геометрии кронштейна силового агрегата на основе оценки условий и локализации напряжений в САПР, что позволяет сделать вывод о необходимости применения идентичного материала в каждой симуляции в рамках эксперимента и в то же время об отсутствии необходимости воспроизведения свойств строго определенного материала.

После открытия окна «Список материалов» (рисунок 33) необходимо выбрать в списке «Aluminum 2014», после чего нажать «ОК» во всех окнах. После данных действий модели симуляции назначен материал.

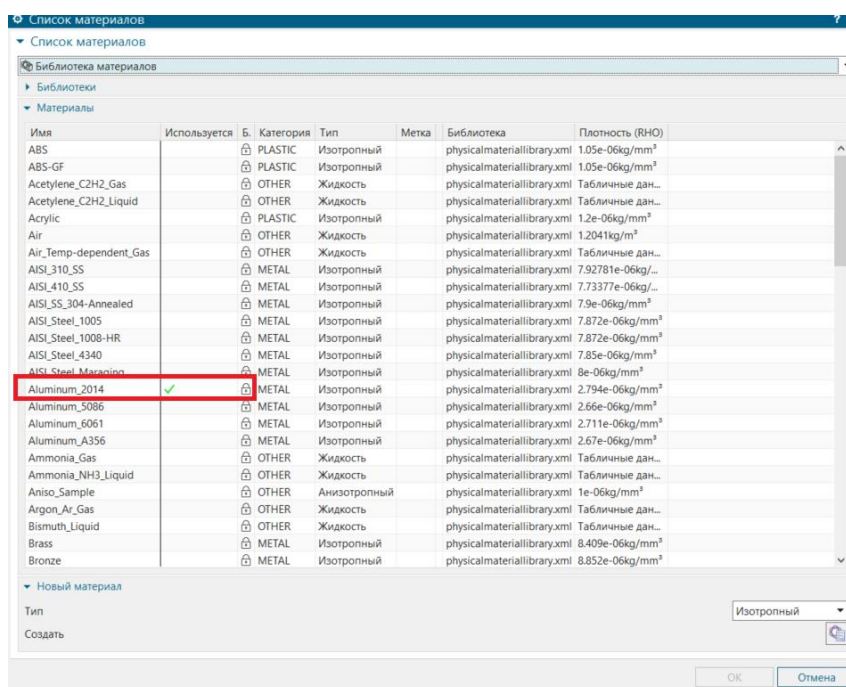


Рисунок 33 – Меню «список материалов»

Основные параметры материала Aluminum 2014 указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры материала Aluminum 2014

№	Параметр	Значение
1	Плотность	2650 кг/м ³
2	Предел текучести	390 МПа
3	Коэффициент Пуассона	0,33
4	Модуль Юнга	73119 МПа

После назначения материала необходимо сохранить файл и перейти в приложение для задания ограничений, нагрузок и проведения симуляции. Для этого на вкладке «Исходная» нажмем «Новая симуляция», откроется окно выбора типа решателя, выберем «Simcenter Nastran» (рисунок 34). Нажмем «ОК» на всех окнах.

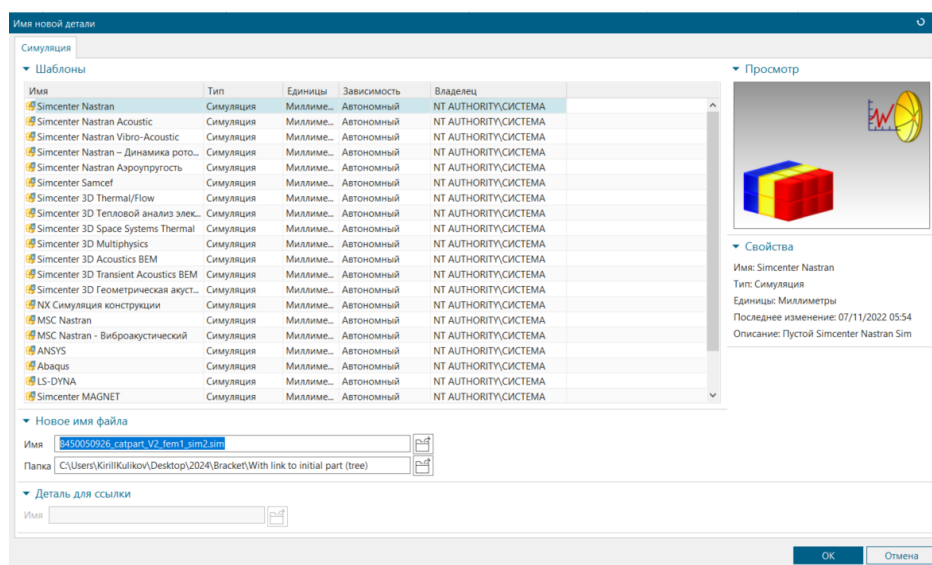


Рисунок 34 – Окно выбора типа решателя

После данных операций будет создан новый файл симуляции. Необходимо обратить внимание, что на инструментальной панели, во вкладке «Исходная», стали доступны новые функции такие как «Тип нагрузки», «Тип сопряжения» и т.п.

Важно подчеркнуть, что целью работы является разработка метода совершенствования конструкции кронштейна силового агрегата на основании оценки условий и локализации его разрушения в САПР, а не анализ причин разрушения кронштейна при симуляции условий, приближенных к реальным. По этой причине, в рамках данной работы не будет разрабатываться пространственная динамическая модель автомобиля (рисунок 35) [9].

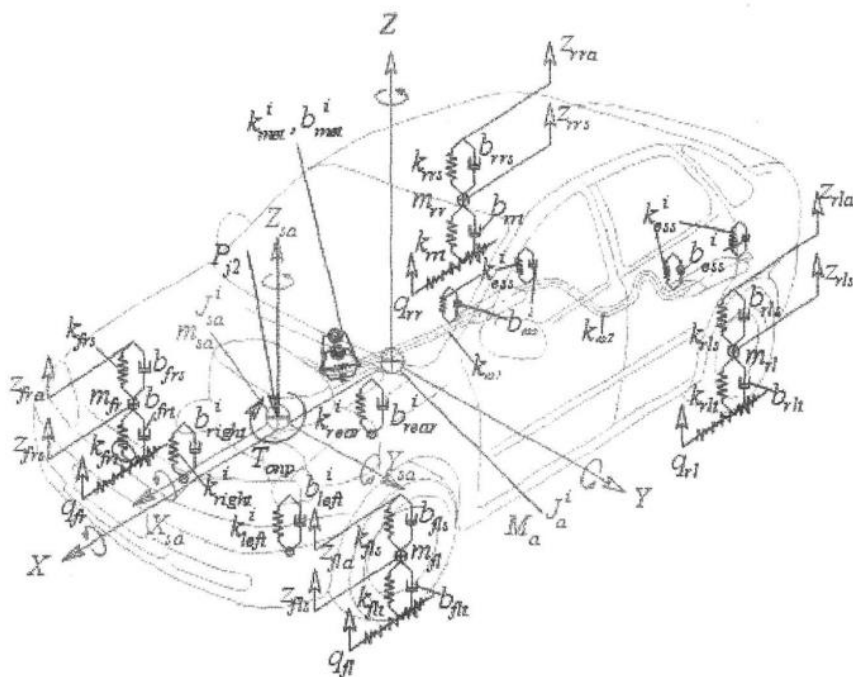


Рисунок 35 – Пространственная динамическая модель автомобиля [9]

Необходимо отметить, что методики проведения стендовых испытаний для кронштейнов силового агрегата разрабатываются производителями автомобилей индивидуально для каждого конкретного автомобиля, по причине большого количества факторов, оказывающих влияние на результаты тестирования. Кроме того, методика проведения испытания так же зависит от требований к качеству, определяемых конкретным автопроизводителем для автомобилей своего бренда, методика проведения испытаний может быть, как упрощена, так и расширена. Для формирования условий проведения стендовых испытаний кронштейна силового агрегата, приближенных к реальным, необходимо учесть ряд факторов [29]:

- Крайние положения двигателя в подкапотном пространстве.

- Распределение веса двигателя на опорах.
- Возникновение резких нагрузок, связанных с передачей энергии от двигателя к колесам, как, например, при резком трогании с места или при резком переходе со льда на сухой асфальт при высоких оборотах ведущих колес.
- Перегрузки, возникающие при перемещении транспортного средства в пространстве, в том числе при резком наезде на препятствие или попадании колеса автомобиля в яму.
- Влияние всех демпфирующих элементов автомобиля на поведение узлов и агрегатов, способных передавать нагрузку на кронштейн.

Исходя из цели работы, для получения репрезентативных результатов анализа альтернативных версий конструкции кронштейна силового агрегата после совершенствования изначальной модели, методика проведения анализа прочности кронштейна в САЕ, сформулированная автором, будет применяться для каждой итерации САЕ.

Принципиальная схема нагрузок и ограничений представлена на рисунке 36.

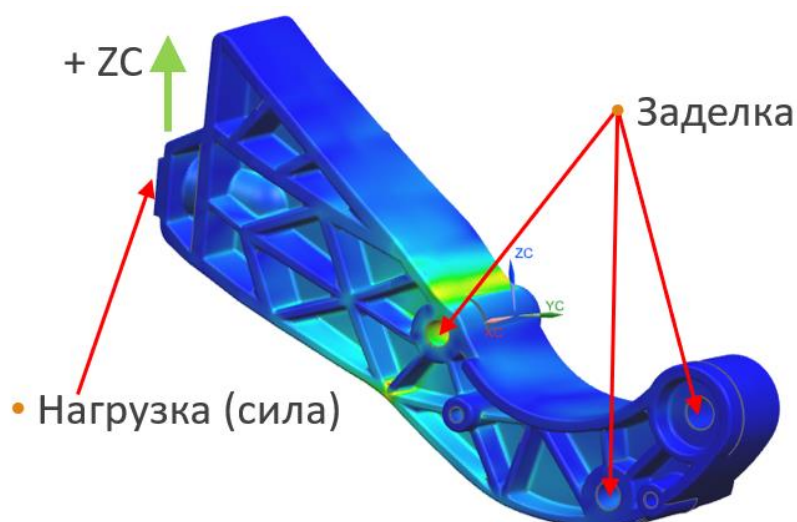


Рисунок 36 – Принципиальная схема нагрузок и ограничений

Перед тем как приступить к заданию нагрузок, определим основные данные для задания условий проведения анализа. Максимальное ускорение, воздействующее на компоненты автомобиля, $\sim 5G$ [10]. Обзор открытых источников показал, что вес двигателя внутреннего сгорания, не спортивного автомобиля с рабочим объемом не более 2 л. может весить в диапазоне от 72 кг до 200 кг. Для проведения расчета возьмем максимальное значение из данного диапазона. Так же, необходимо определить количество кронштейнов, на которые будет распределяться вес. В основном для легковых автомобилей применяется три кронштейна, примем данный показатель для расчета. Значение нагрузки можно рассчитать по формуле [10]:

$$\frac{5 * 10 * 200}{3} \approx 3330 \text{ Н} \quad (1)$$

Перейдем в меню «Тип сопряжения», выберем «Заделка» и зададим области модели, которые будут жестко зафиксированы во всех пространственных положениях (рисунок 37).

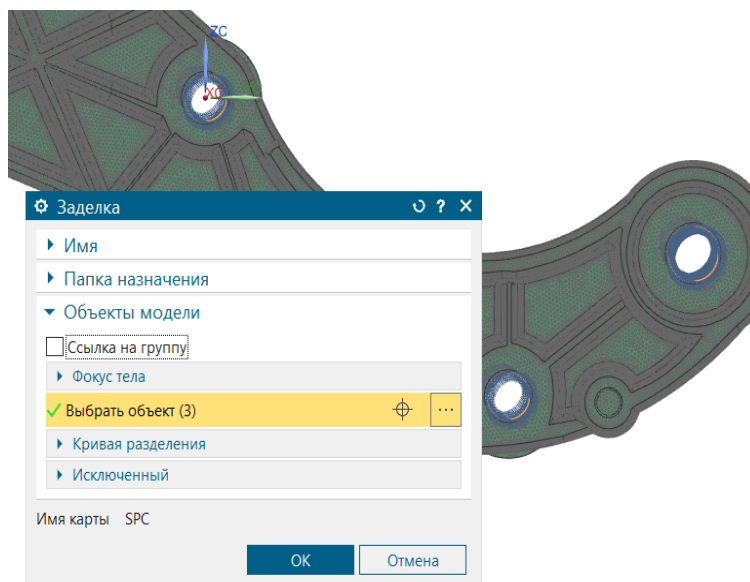


Рисунок 37 – Область применения заделки

После задания ограничений необходимо указать параметры прикладываемой силы, перейдем в меню «Тип нагрузки» на панели

инструментов и выберем пункт «Сила». Для обеспечения возможности анализа результатов, полученных после изменения геометрии кронштейна, обусловимся, что нагрузка всегда будет прикладываться на противоположную от заделки сторону кронштейна, внутри отверстия для крепления ответной части опоры, приходящей в кронштейн, вдоль оси ZС. Зададим область применения нагрузки, а также ее величину и направление (рисунок 38). После задания всех параметров нажимаем «ОК».

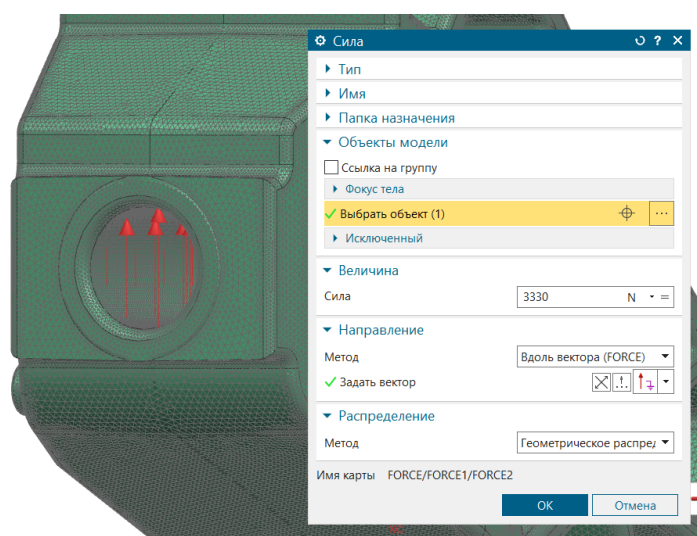


Рисунок 38 – Параметры нагрузки

После того, как основные параметры заданы, можно переходить к самому решению. Создадим новое решение, кликнув по соответствующей клавише на инструментальной панели. Откроется окно, в котором можно задать параметры решения (рисунок 39).

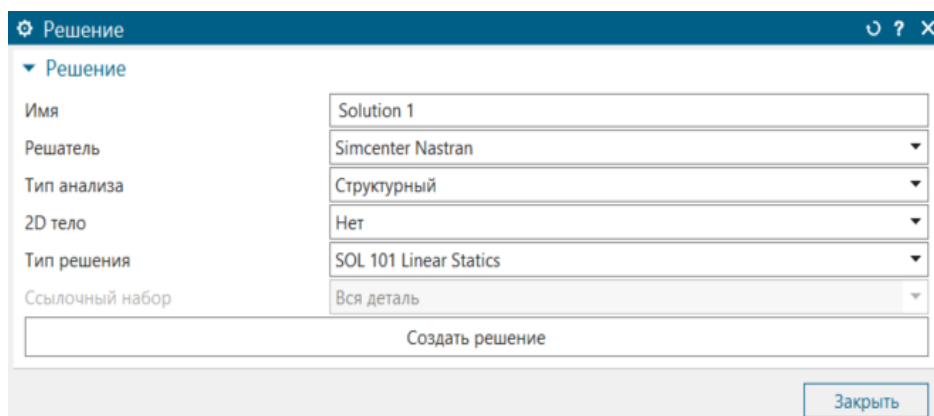


Рисунок 39 – Параметры решения

Нажимаем «Создать решение», применяем заданные параметры ограничения и нагрузки к созданному решению (рисунок 40).

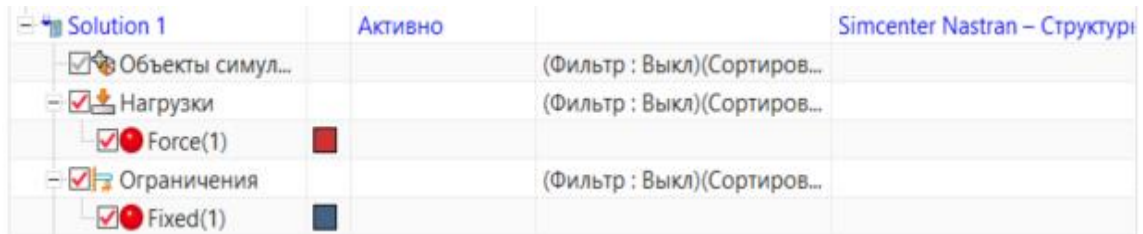


Рисунок 40 – Вид решения в навигаторе симуляции

Запускаем решение задачи. После завершения расчета можно закрыть все окна. В навигаторе симуляции необходимо перейти в «Результаты» двойным щелчком мыши. После чего выбрать «Напряжение - по элементам», «По Мизесу» (рисунок 41).

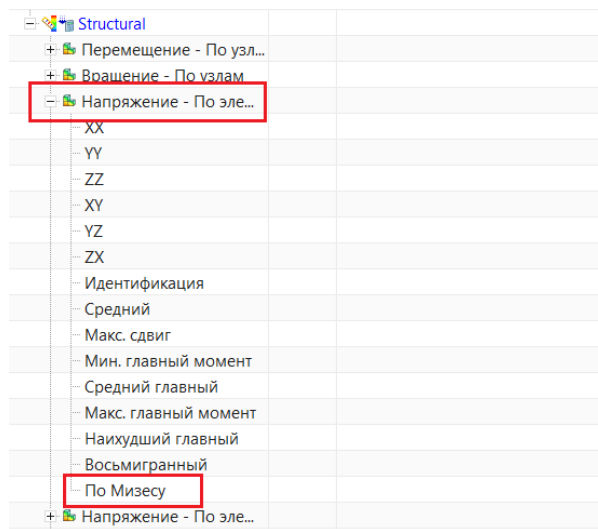


Рисунок 41 – Окно выбора отображаемых результатов анализа

После данных действий в рабочем окне отобразится визуализация кронштейна с цветовой шкалой, обозначающей напряжения, возникающие вследствие приложения силы (рисунок 42).

Импортированный результат: 8450050926_catpart_v2_fem1_sim1-solution_1
SUBCASE - STATICS 1 SUBCASE 1, Статический шаг 1
Напряжение - По элементам/узлам, Неусредненный, По Мизесу
Мин. : 0.00, Макс. : 44.36, Единицы = МПа
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

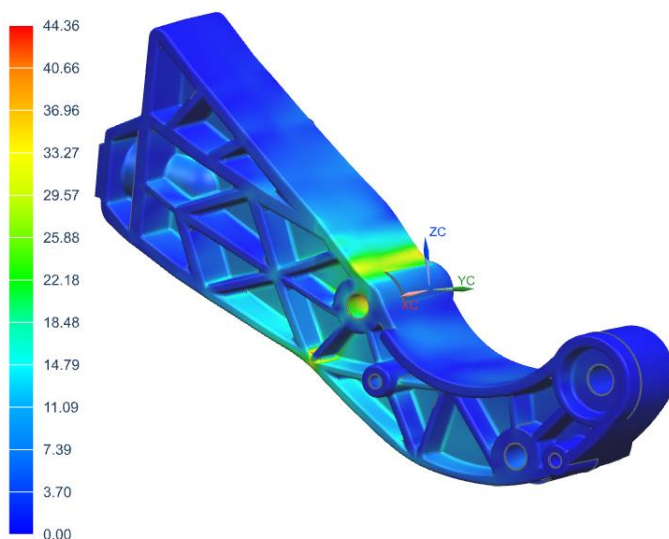


Рисунок 42 – Общий вид отображения результатов анализа

Настроив обозначение локализации максимального и минимального напряжений, можно увидеть выноски, указывающие на данные области (рисунок 43).

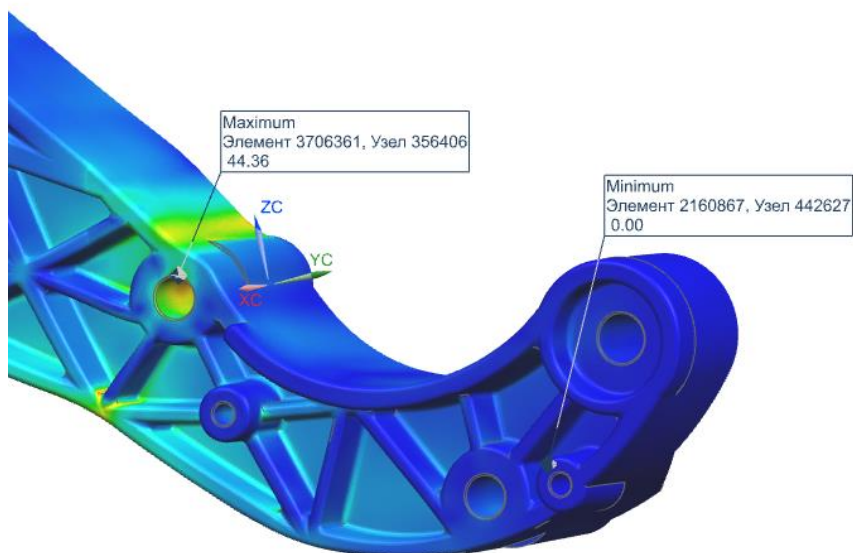


Рисунок 43 – Зоны локализации максимальных и минимальных напряжений

На рисунке 44 наблюдаем области максимальных напряжений, в той же зоне, где был показан конечный элемент с наибольшим напряжением в рамках всего расчета.

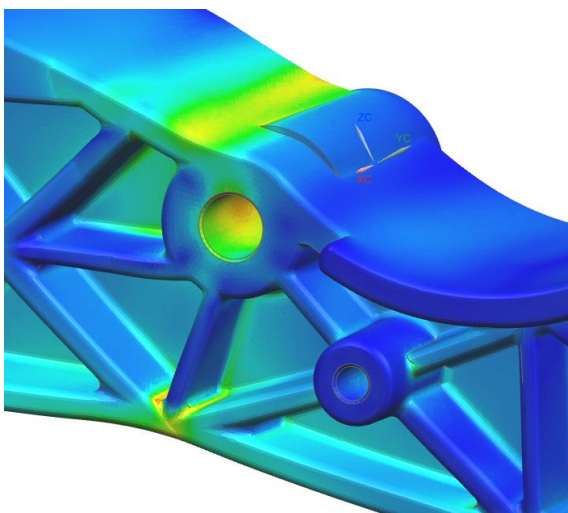


Рисунок 44 – Область максимальных напряжений

Именно эта часть кронштейна более уязвима к нагрузке. И хотя по результатам статического анализа наблюдается достаточный запас прочности в рамках заданных параметров нагрузки при нормальных условиях эксплуатации автомобиля - 44,36 МПа при допустимом напряжении материала в рамках диапазона упругих деформаций - 390 МПа, необходимо учитывать факторы:

- При дорожно-транспортном происшествии с участием двух автомобилей при суммарной скорости ≈ 40 км/ч пиковая перегрузка может достигать 15 G [12].
- Накопленные усталостные разрушения могут значительно снижать прочность кронштейна.

Таким образом, совершенствование конструкции геометрии кронштейна, для более равномерного распределения зон напряжения с целью повышения его эксплуатационных характеристик является актуальной необходимостью.

На рисунке 45 показано сечение в плоскости ZY , проходящее посередине границы разъема кронштейна. По сечению можно провести оценку того, как распределяются напряжения во внутренней структуре кронштейна.

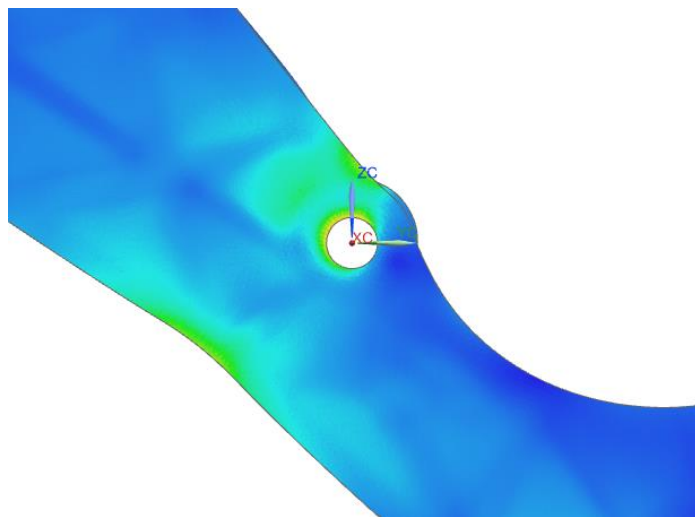


Рисунок 45 – Распределение напряжений во внутренней структуре кронштейна

Выводы по второму разделу

1. На основе анализа особенностей проведения реальных и цифровых испытаний сделан выбор в пользу проведения виртуальных расчетов.
2. Установлено, что программное обеспечение Siemens NX является предпочтительным продуктом в рамках проводимого исследования, объединяющим необходимые функции для последовательного внесения изменений в САД-модель и последующего САЕ-тестирования.
3. Определены необходимые параметры модели для проведения САЕ-тестирования кронштейна, такие как: тип и размер конечных элементов, материал, области заделки и приложения силы, тип решателя.
4. Проведено САЕ-тестирование модели кронштейна. Установлены области локализации пиковых напряжений.

3 Совершенствование конструкции кронштейна силового агрегата в САПР

3.1 Альтернативные конструкции кронштейна силового агрегата

Для систематизации дальнейшей работы по внесению изменений в электронную модель кронштейна будут проведены испытания в упрощенном виде с последующим анализом полученных результатов. Испытания в упрощенном виде означают эксперимент, который проводят над изделием с целью выявления соответствия его характеристик заявленным требованиям. [13].

Термин «испытания» определяется ГОСТ 16504-81 как экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий. Так же, ГОСТ 16504-81 определяет термин «Модель для испытаний» как изделие, процесс, явление, математическую модель, находящиеся в определенном соответствии с объектом испытаний и (или) воздействиями на него и способные замещать их в процессе испытаний [14].

Кроме того, ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» устанавливает следующее определение: цифровые (виртуальные) испытания — определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) этого объекта [15].

Из вышеизложенного следует, что проведение корректировки геометрии математической модели кронштейна и последующий анализ результатов посредством CAE-тестирования является легитимным подходом в рамках решения задач данной работы.

Из результатов анализа разработанной конечно-элементной модели кронштейна следует, что она содержит более 5,5 миллионов конечных элементов, изменение свойств и пространственного положения каждого из которых способно влиять на полученные результаты. В рамках проводимого исследования математическая модель кронштейна будет корректироваться в местах локализации пиковых напряжений на основании данных, полученных посредством САЕ-анализа до получения значимого снижения пиковых напряжений в конструкции кронштейна.

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V2)

В первом варианте скорректированной версии математической модели (V2) будет рассмотрено влияние увеличения толщины материала в местах сосредоточения максимальных напряжений. Была произведена корректировка геометрии кронштейна в вышеупомянутых областях в модуле «Моделирование» NX. Параметры материала, сетки конечных элементов, области заделки, приложения силы и ее величина не изменялись. Результаты САЕ-тестирования модели «V2» показаны на рисунке 46.

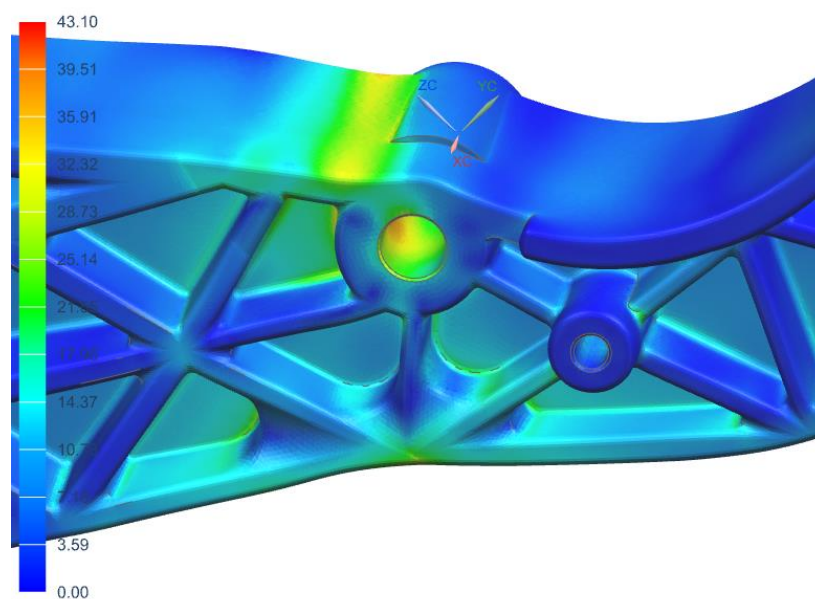


Рисунок 46 – Результаты САЕ тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V2)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила -1,26 МПа относительно первой версии модели. Можно сделать вывод, что увеличение толщин и радиусов скруглений в местах концентрации напряжений приводит к перераспределению пиков напряжения в детали более равномерно. Тем не менее, общая картина локализации напряжений не меняется кардинально.

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V3)

На следующем шаге будет рассмотрен вариант добавления ребра-дуги в нижней части кронштейна, в точке схождения трех ребер. В теории подобная геометрия должна обеспечить большую свободу прилегающих ребер и уменьшить концентрацию напряжения в точке их схождения. Результаты CAE-тестирования модели «V3» показаны на рисунке 47.

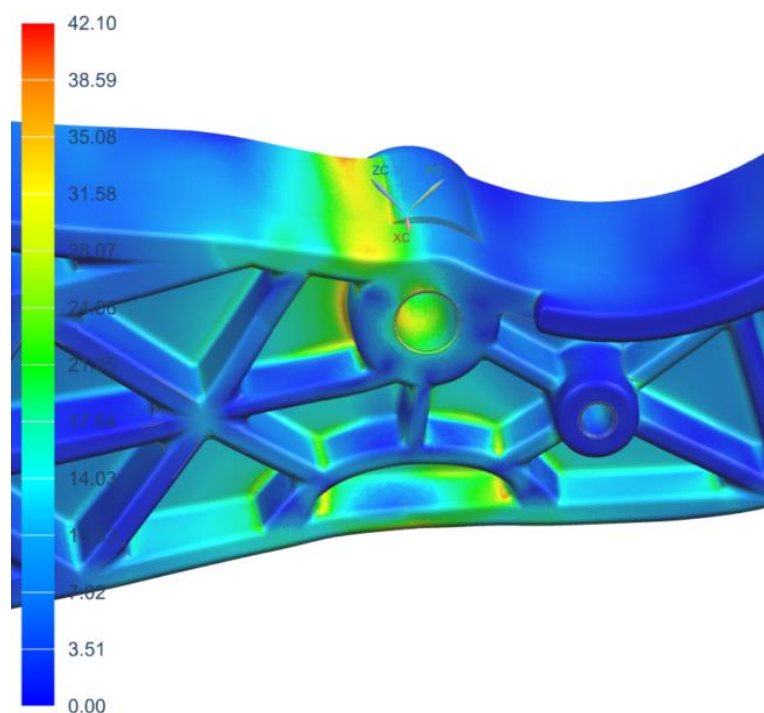


Рисунок 47 – Результаты CAE тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V3)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила -2,26 МПа относительно первой версии модели. Пики напряжений

были распределены по детали более равномерно, тем не менее, за счет повышения эластичности детали, повысились напряжения в области бобышки (рисунок 48).

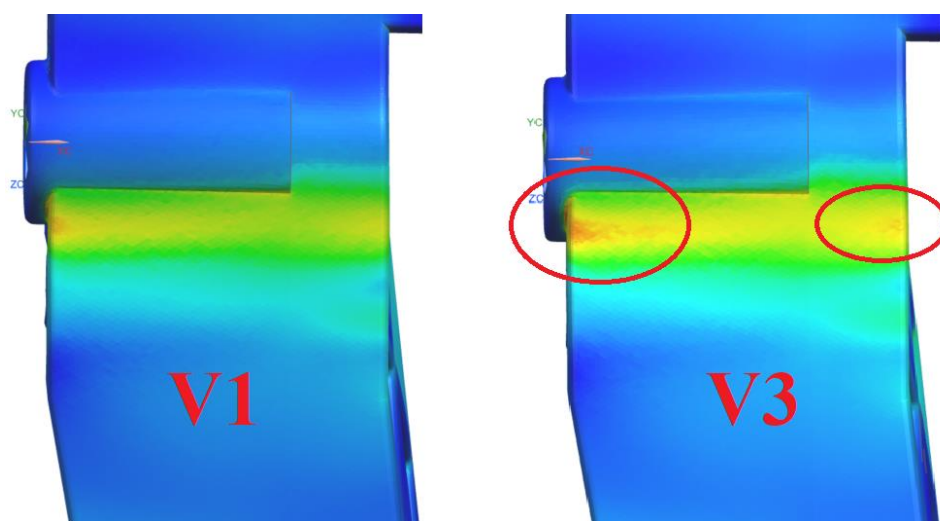


Рисунок 48 – Сравнение моделей V1 и V3 в области концентрации напряжения, прилегающей к бобышке

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V4)

За основу данной версии модели будет взята модель V3 с применением утолщения ребра-дуги с практически полным заполнением материалом внутреннего объема данной зоны. Результаты CAE-тестирования модели «V4» показаны на рисунке 49.

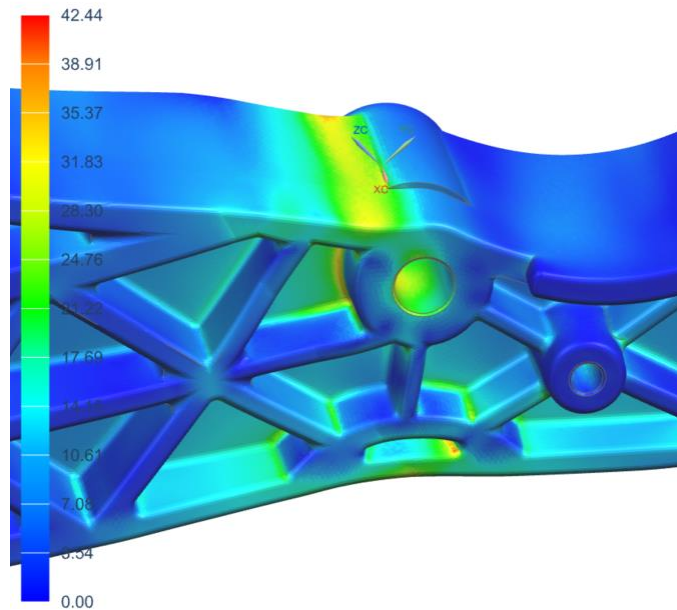


Рисунок 49 – Результаты CAE тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V4)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила $-1,92$ МПа относительно первой версии модели и $+ 0,34$ МПа относительно V3. Можно сделать вывод, что применение ребра-дуги в области концентрации напряжения от ребер, сходящихся в одной точке, является действенным методом для более равномерного распределения напряжений по детали, при этом, увеличение толщины ребра-дуги не только не улучшает показатели по пиковым напряжениям, но ухудшает их.

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V5)

В следующей версии модели будет рассмотрено изменение конструкции кронштейна в области бобышки. Версии V2-V4 рассматривали возможность снижения пиковых напряжений путем изменения геометрии кронштейна в областях его работы в рамках растягивающих нагрузок. Версия V5 будет затрагивать изменение геометрии в области, испытывающей сжимающую нагрузку. Результаты CAE-тестирования модели «V5» показаны на рисунке 50.

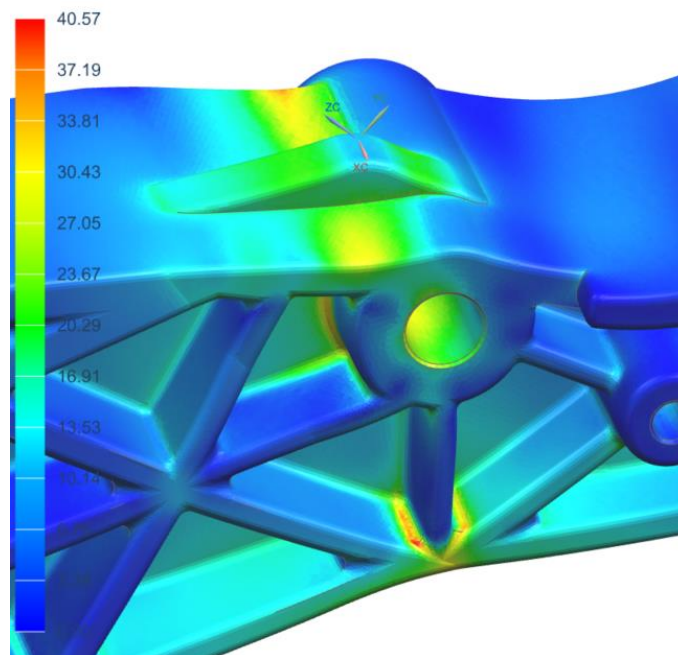


Рисунок 50 – Результаты CAE тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V5)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила -3,79 МПа относительно первой версии модели. Можно сделать вывод, что изменение геометрии с целью снижения пиковых напряжений более эффективно именно в областях детали, испытывающих сжимающую нагрузку.

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V6)

Версия модели V6 будет рассматривать в себе совокупность изменений в рамках моделей версий V3 и V5, как наиболее эффективных с точки зрения снижения максимального значения напряжения в детали. Результаты CAE-тестирования модели «V6» показаны на рисунке 51.

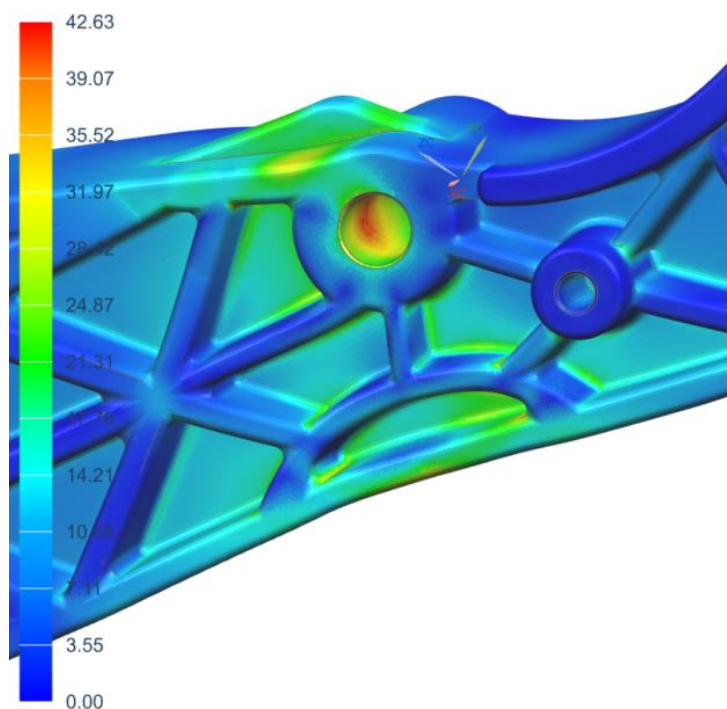


Рисунок 51 – Результаты CAE-тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V6)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила $-1,73$ МПа относительно первой версии модели и $+ 2,06$ МПа относительно V5. Область пиковых напряжений сосредоточена с внутренней стороны бобышки, в месте прилегания ребра кронштейна проходящего вдоль границы разъема детали. Можно сделать вывод, что ребро-дуга, в силу повышения эластичности кронштейна в области, испытывающей растягивающие нагрузки, перенесло напряжение на бобышку.

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V7)

Для проверки теории, о влиянии толщины ребра-дуги на концентрацию напряжений на бобышке, изложенной в разделе 3.1.5., в версии модели V7 будет произведен анализ совокупности изменений заложенных в моделях версий V4 и V5. Результаты CAE-тестирования модели «V7» показаны на рисунке 52.

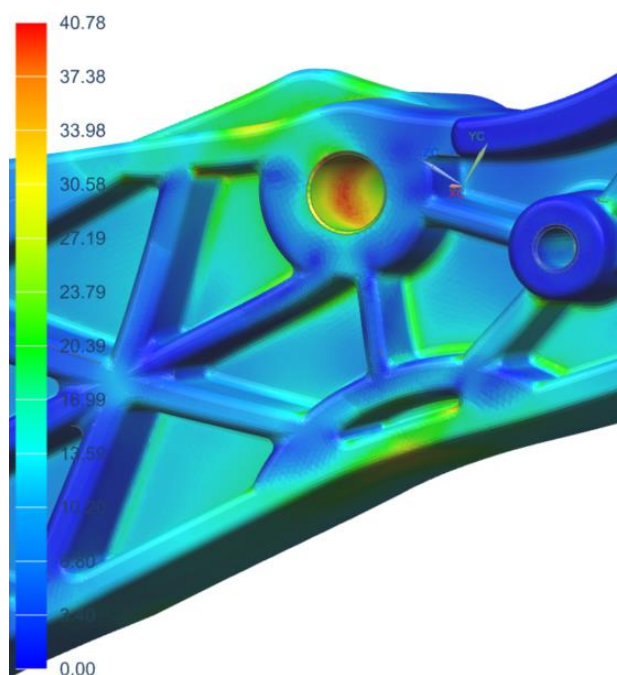


Рисунок 52 – Результаты CAE-тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V7)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила -3,58 МПа относительно первой версии модели и - 1,85 МПа относительно V6. По результатам проведенного анализа видно, что область пиковых напряжений сохранила свою локализацию на внутренней стороне бобышки, но показатель пикового напряжения был снижен на 1,85 МПа. Из вышеизложенного, можно сделать вывод, что усиление области, испытывающей растягивающую нагрузку уменьшает напряжения в области работающей на сжатие.

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V8)

В версии модели V8 будет рассмотрено изменение конструкции кронштейна с применением усиления над бобышкой с большей шириной, чем в варианте V5 и скорректированной геометрией. Результаты CAE-тестирования модели «V8» показаны на рисунке 53.

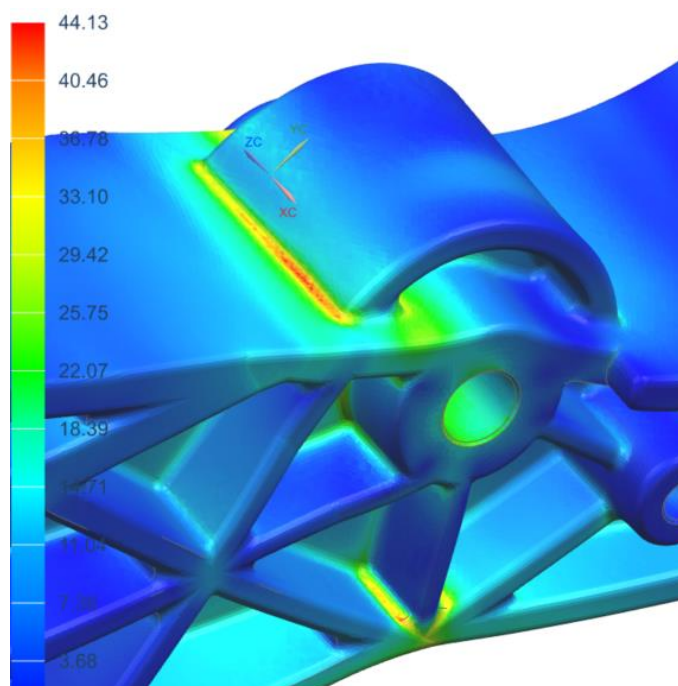


Рисунок 53 – Результаты CAE-тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V8)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила $-0,23$ МПа относительно первой версии модели и $+ 3,56$ МПа относительно V5. Максимальное напряжение сконцентрировано на границе стыковки элемента усиления и плоскости части кронштейна, к которой прикладывается нагрузка. Можно сделать вывод, что место стыковки усиления имеет недостаточный радиус и не эффективно распределяет напряжение, приходящееся на данную область. Тем не менее, данный вид усиления положительно повлиял на показания напряжения внутри бобышки, снизив напряжение на ~ 4 МПа (рисунок 54).

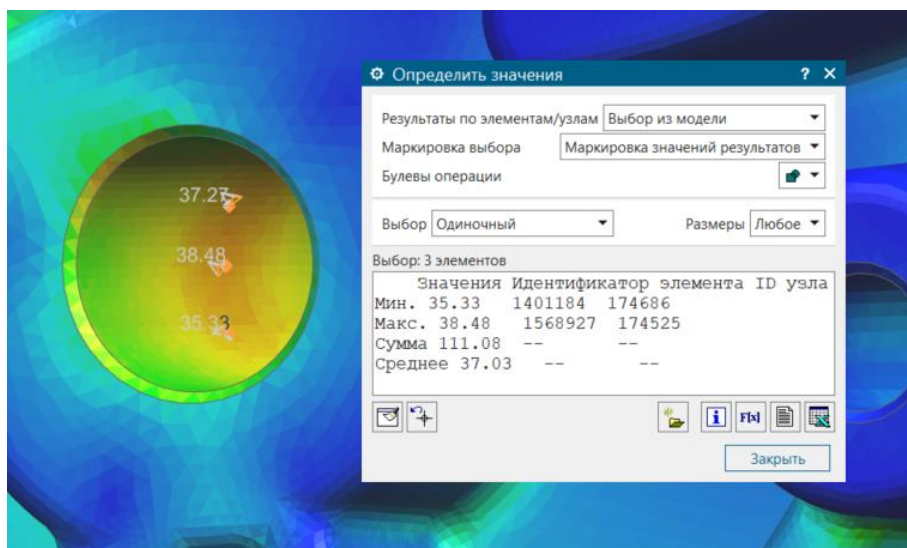


Рисунок 54 – Результаты замеров напряжения на внутренней стороне бобышки

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V9)

Версия модели кронштейна V9 будет рассматривать применение большего радиуса сглаживания в местах стыковки усилителя, рассмотренного в V8 к кронштейну. Результаты CAE-тестирования модели «V9» показаны на рисунке 55.

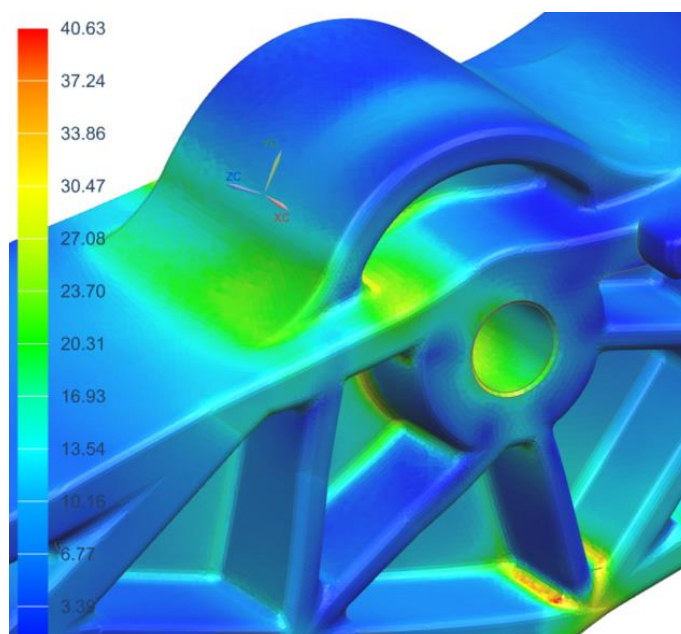


Рисунок 55 – Результаты CAE-тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V9)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила -3,73 МПа относительно первой версии модели и - 3,5 МПа относительно V8. Из результатов CAE-анализа можно увидеть, что применение больших радиусов в местах присоединения усилителя к кронштейну является эффективным методом для распределения сконцентрированных напряжений. Так же, видно, что зона максимальных напряжений сместилась в нижнюю часть кронштейна.

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V10)

Версия модели V10 будет рассматривать совокупность геометрических изменений версий V4 и V9. Результаты CAE-тестирования модели «V10» показаны на рисунке 56.

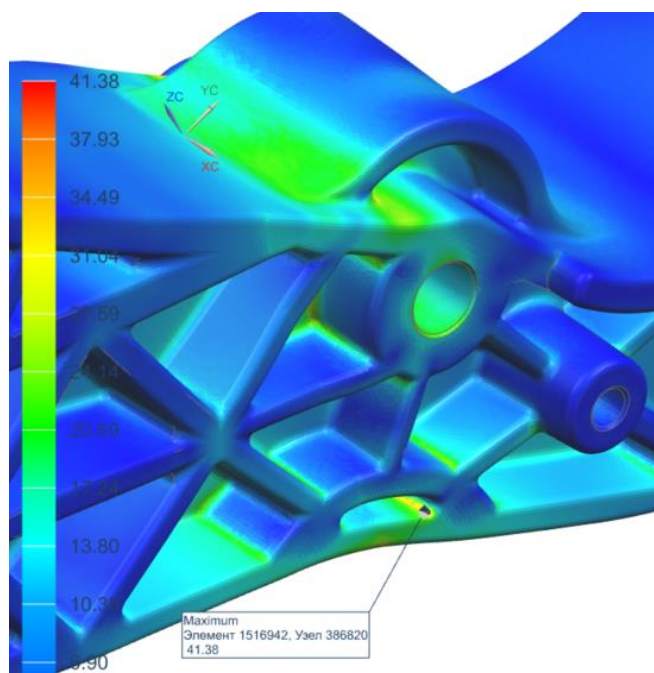


Рисунок 56 – Результаты CAE-тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V10)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила -2,98 МПа относительно первой версии модели и + 0,75 МПа относительно V8. Видно, что наибольшая масса напряжений в области близкой к максимальным значениям эффективно распределилась по

кронштейну. Тем не менее, пиковое значение перешло в область ребра-дуги в нижней части кронштейна и превышает показатели модели V9.

Внесение изменений в электронную модель кронштейна силового агрегата. (V11)

Версия модели V11 будет рассматривать изменения, заложенные в модель V10 и полное заполнение материалом внутренней части ребра-дуги, расположенной в нижней части кронштейна. Результаты CAE-тестирования модели «V11» показаны на рисунке 57.

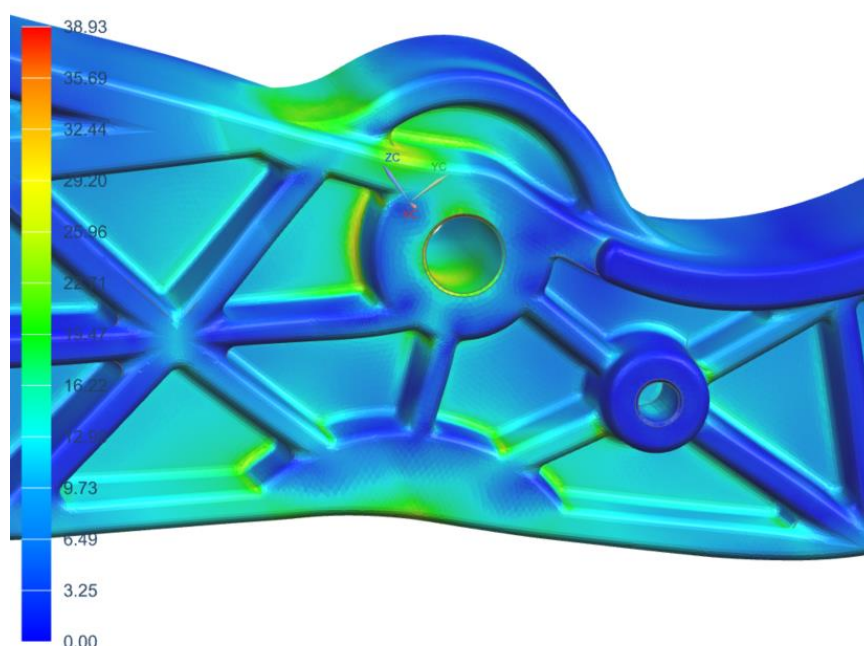


Рисунок 57 – Результаты CAE-тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата (V11)

Разница между максимальными показателями напряжения в детали составила -5,43 МПа относительно первой версии модели и - 2,45 МПа относительно V10.

3.2 Анализ результатов CAE-тестирования альтернативных конструкций кронштейна

В рамках подраздела 3.1. был проведен эксперимент в среде CAE NX в ходе которого разработано и проанализировано 10 электронных моделей кронштейна силового агрегата. Результаты проведенного исследования можно увидеть в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты CAE-анализа математических моделей кронштейна силового агрегата с измененной геометрией

Версия модели	Напряжение max (МПа)	Δ от V1 (МПа)
V1 (референс)	44,36	0,00
V2	43,1	-1,26
V3	42,1	-2,26
V4	42,44	-1,92
V5	40,57	-3,79
V6	42,63	-1,73
V7	40,78	-3,58
V8	44,13	-0,23
V9	40,63	-3,73
V10	41,38	-2,98
V11	38,93	-5,43

Ранжирование полученных результатов в порядке от наибольших пиковых напряжений к наименьшим представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты CAE-анализа математических моделей кронштейна силового агрегата с измененной геометрией в порядке от наибольших пиковых напряжений к наименьшим

Версия модели	Напряжение max (МПа)	Δ от V1 (МПа)
V11	38,93	-5,43
V5	40,57	-3,79
V9	40,63	-3,73

Продолжение таблицы 3

V7	40,78	-3,58
V10	41,38	-2,98
V3	42,1	-2,26
V4	42,44	-1,92
V6	42,63	-1,73
V2	43,1	-1,26
V8	44,13	-0,23
V1	44,36	0,00

Из результатов, представленных в таблице следует, что наибольший эффект снижения пиковых напряжений оказала модель V11. В рамках анализа модели V11 установлено снижение пикового напряжения на 5,43 МПа (~55 кг/см.кв.) или на 12,24% относительно первоначальной версии кронштейна.

Для сравнения распределения напряжений версий модели V1 и V11 в каждом из представлений было построено сечение, проходящее по границе разъема кронштейна в плоскости YZ и выбраны 11 конечных элементов по зоне концентрации основной массы напряжений. Для V1 и V11 были выбраны идентичные конечные элементы по уникальному номеру конечного элемента. После анализа полученных данных можно установить, что произошло перераспределение напряжений из областей с более высокими показаниями в области с более низкими. Результаты замеров представлены на рисунке 58. Совокупное влияние подобного перераспределения напряжений между конечными элементами модели позволило достичь более эффективного распределения нагрузки на всю конструкцию в целом.

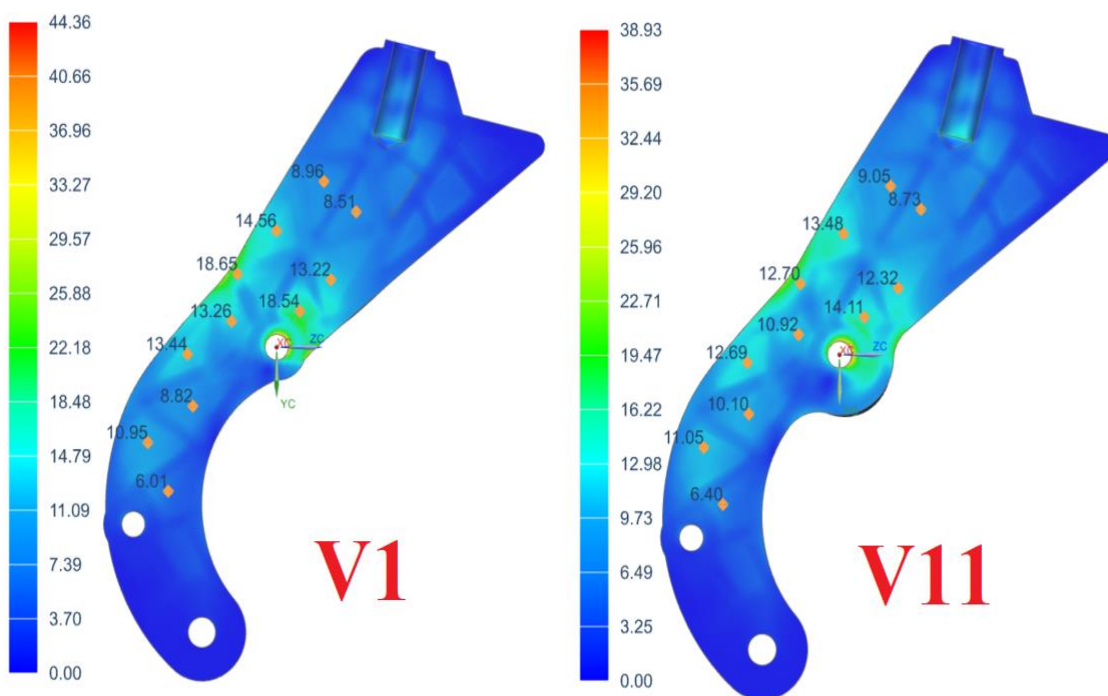


Рисунок 58 – Результаты замеров напряжения в симуляциях V1 и V11

Эффективным элементом, позволяющим снять напряжение с точки схождения двух и более ребер, при условии приложения в данной зоне растягивающих нагрузок, зарекомендовало себя дугообразное ребро. Сравнение результатов V1 и V11 с зоной применения дугообразного ребра представлено на рисунке 59.

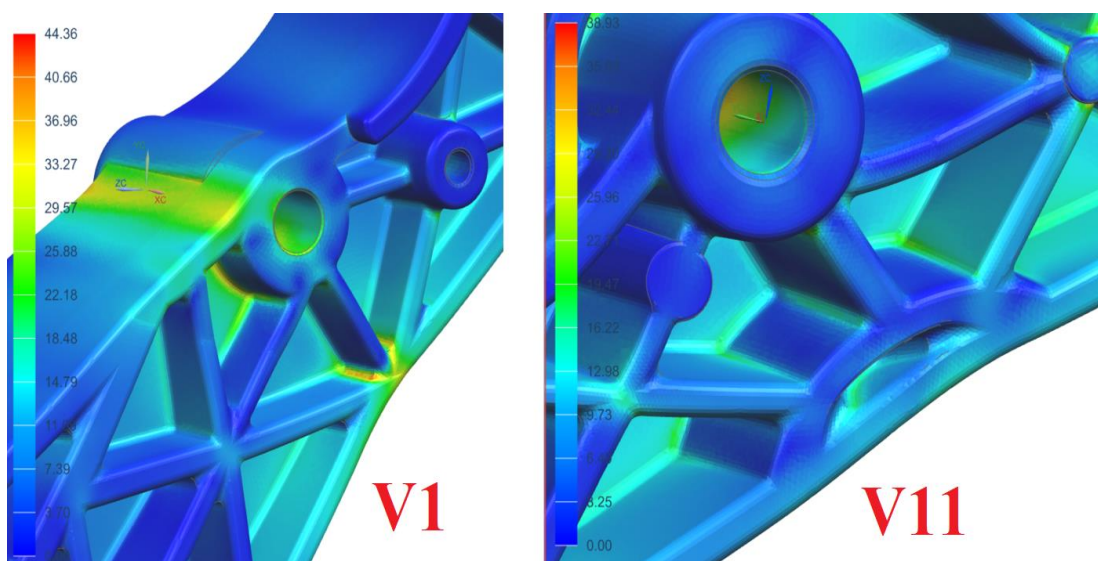


Рисунок 59 – Результаты замеров напряжения в симуляциях V1 и V11 в зоне применения дугообразного ребра

На визуализации видно, что подобная геометрия ребра позволяет значительно снизить пиковые напряжения в области применения. Тем не менее, следует учитывать, что подобное изменение повышает эластичность детали и переносит напряжения в области, испытывающие сжимающую нагрузку (рисунок 60).

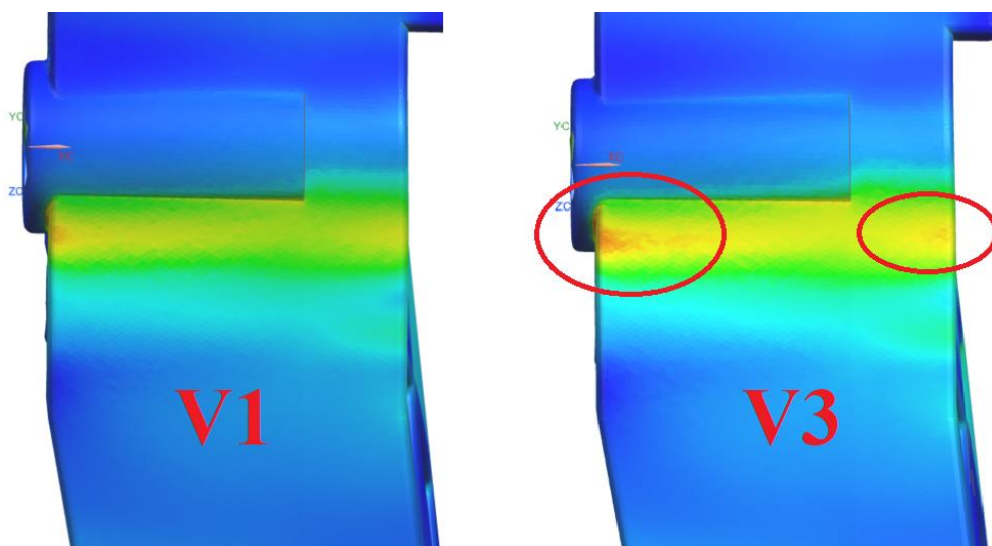


Рисунок 60 – Сравнение визуализации напряжений в области, испытывающей сжимающие нагрузки. V1- начальная версия модели, V3 – версия модели с примененным дугообразным ребром

В ходе эксперимента установлено, что для компенсации такого перераспределения напряжений следует применять усилитель в области, испытывающей сжимающую нагрузку. Наиболее эффективным является применение усилителя большей ширины, а также задание больших радиусов в местах стыковки усилителя к детали (рисунок 61).

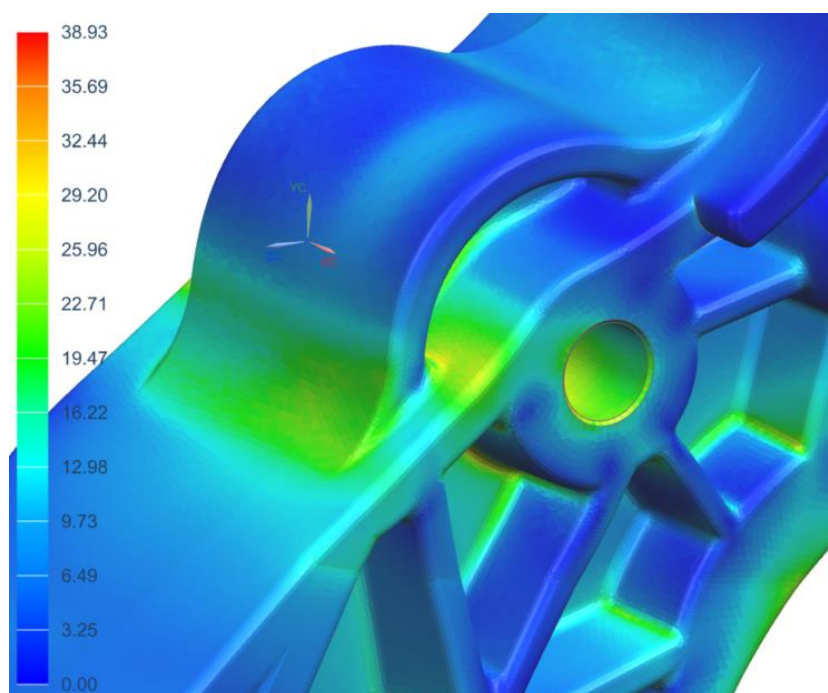


Рисунок 61 – Результаты CAE-тестирования измененной модели кронштейна силового агрегата с применением усилителя в области, испытывающей сжимающую нагрузку

3.3 Разработка метода совершенствования геометрии кронштейна крепления силового агрегата на основе оценки условий и локализации его разрушения в САПР

Целью настоящей диссертации является разработка метода совершенствования геометрии кронштейна крепления силового агрегата на основе оценки условий и локализации напряжений в САПР.

На основе проведенной работы разработан метод описывающий порядок действий для совершенствования геометрии кронштейна крепления силового агрегата на основе оценки условий и локализации напряжений в САПР (таблица 4).

Таблица 4 – Метод совершенствования геометрии кронштейна

№ шага	Шаг	Подробное описание шага
1	Загрузка электронной модели	1. Открыть CAD модель

Продолжение таблицы 4

	кронштейна в NX Advanced simulation	2. Перейти в «Файл» «Пре/постпроцессор»
2	Построение сетки конечных элементов	1. Произвести анализ геометрии электронной модели для определения необходимого типа и размера конечного элемента. 2. Задать тип и размер конечных элементов. 3. Произвести построение сетки конечных элементов на электронной модели.
3	Проверка качества сетки	1. Произвести визуальную проверку качества сетки 2. Воспользоваться инструментами NX для проверки качества сетки. 3. При наличии замечаний к качеству сетки произвести корректировку параметров сетки.
4	Назначение материала	1. Произвести назначение материала
5	Переход в Simcenter Nastran	1. Перейти в приложение симуляции: «Исходная» → «Новая симуляция» 2. Выбрать тип решателя и задать дополнительные настройки при необходимости.
6	Задание ограничений и нагрузок	1. Задать ограничения 2. Задать нагрузки
7	Проведение CAE-расчета	1. Провести CAE-расчет по заданным параметрам.
8	Анализ полученных результатов	1. Визуально изучить области концентрации напряжений. 2. Отобразить аннотацию с обозначением конечного элемента с максимальным напряжением. 3. Построить и изучить сечения в наиболее нагруженных областях. 4. Определить значения напряжения по нескольким точкам. 5. Воспроизвести анимацию расчета. Изучить механику возникновения напряжений при утрированном отображении деформаций.
9*	Внесение изменений в электронную модель на основе анализа данных CAE	1. Внести изменения в математическую модель изделия, направленные на более эффективное распределение пиковых напряжений в области с наименьшим напряжением. 2. При наличии областей, испытывающих растягивающую нагрузку, с концентрацией пиковых напряжений в области схождения двух и более ребер жесткости – применить построение дугообразного ребра в данной зоне. 3. При применении дугообразного ребра, в области испытывающей растягивающую нагрузку, следует применить усиление зоны, противолежащей дугообразному ребру, при условии, что данная область работает на сжатие.

Продолжение таблицы 4

		4. К местам стыковки усилителя к детали должны быть применены большие радиусы, с целью эффективного распределения напряжений.
10*	Проведение САЕ-расчета скорректированной версии электронной модели	1. Провести САЕ-расчет для скорректированной электронной модели не изменяя параметры ограничения и нагрузки.
11*	Анализ совокупности результатов	1. Внести результаты САЕ-расчета скорректированной модели в таблицу для сбора и анализа результатов в рамках нескольких расчетов. 2. Для каждого расчета задавать порядковый номер и указывать максимальный показатель напряжения.
12	Выбор наиболее подходящей версии электронной модели	1. Произвести выбор версии электронной модели на основании данных, полученных из таблицы анализа совокупных результатов.
Примечание - при необходимости, шаги могут повторяться неограниченное количество раз, до получения требуемого результата.		

Выводы по третьему разделу

1. Проведен эксперимент в среде САЕ по оценке 10 альтернативных вариантов математической модели кронштейна силового агрегата с точки зрения распределения напряжений.

2. Проведена оценка влияния различных конструктивных элементов на распределение напряжений в кронштейне.

3. Установлено, что модель версии V11 показала наилучший результат по снижению пиковых напряжений.

4. Проведен подробный сравнительный анализ моделей версии V1 и V11 с точки зрения распределения напряжений.

5. Разработан метод совершенствования геометрии кронштейна силового агрегата на основе оценки условий и локализации напряжений в САПР.

Заключение

Целью данной работы являлась разработка метода совершенствования геометрии кронштейна крепления силового агрегата на основе оценки условий и локализации напряжений в САПР.

В рамках представленной работы в первом разделе были рассмотрены существующие типы кронштейнов силового агрегата, их конструктивные и технологические особенности, основные методы проведения испытаний. Проведен обзор и выбор программного обеспечения, для разработки электронной модели кронштейна силового агрегата, разработан эскиз и САД-модель кронштейна.

Второй раздел включает в себя проведение обзора программного обеспечения для CAE-тестирования. Определен набор основных параметров, таких как размер и тип конечного элемента, параметры материала и методика для проведения тестирования. Произведена генерация сетки конечных элементов с последующей проверкой ее качества стандартными инструментами Siemens NX. Проведен CAE-расчет на основе первоначальной версии электронной модели кронштейна силового агрегата с последующим анализом полученных результатов для установления зон локализации максимальных напряжений.

В третьем разделе проведен эксперимент в среде CAE, целью которого было совершенствование конструкции кронштейна силового агрегата, путем последовательного внесения изменений в электронную модель с последующим анализом полученных данных. Проведен сравнительный анализ распределения напряжений в начальной версии электронной модели кронштейна и альтернативного варианта электронной модели кронштейна, показавшего наилучший результат с точки зрения распределения пиковых напряжений. Разработан метод совершенствования геометрии кронштейна силового агрегата на основе оценки условий и локализации напряжений в САПР.

Список используемых источников

1. P.M. Khanwalkar. A Review on Optimization of Engine Mounting Bracket // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2016. Volume 35. URL: <https://ijettjournal.org/assets/year/2016/volume-35/number-1/IJETT-V35P210.pdf>
2. K. Tahera., C. Earl., C. Eckert. Integrating virtual and physical testing to accelerate the engineering product development process. // Int. J. Information Technology and Management. 2014. Vol. 13. PP. 4-5. URL: https://www.researchgate.net/publication/244483881_Integrating_virtual_and_physical_testing_to_accelerate_the_engineering_product_development_process
3. B. Ravi., M.Satyanarayana Gupta. Design and Development of Automotive Carbon Fiber Bracket. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 455. PP. 1-5. URL: https://www.researchgate.net/publication/329791663_Design_and_Development_of_Automotive_Carbon_Fiber_Bracket
4. Pererva V. I., Rudenko S. G. Modern materials for automotive industry. // Journal of Engineering Sciences. 2017. Vol. 4. PP. 3-10. URL: https://www.researchgate.net/publication/322096172_Modern_materials_for_automotive_industry
5. Rui Liu, Wanying Liu, Yihui Zhao. The reliability acceleration test method of special vehicle transfer box // E3S Web of Conferences ICPEME. 2021. Vol.243. PP. 2. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/19/e3sconf_icpeme2021_02006.pdf
6. А.Н. Унягин., Учебное пособие «Инженерные расчеты с помощью программного комплекса NX» // ФГБОУ «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ». 2017. PP. 17-20. URL: <http://lib.ulstu.ru/venec/disk/2017/88.pdf>
7. И.И. Кулешов., В.М. Ходаковский., Статья «Экспериментальное обоснование выбора размера конечного элемента при расчете головок

поршней» // Вестник Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского. 2017. Том 9. №3. PP. 609. URL:

8. Murithi Alfred Muchangi., An investigation of the fatigue properties of the aluminum-copper alloy 2014 // University of Nairobi. 2022. PP. 1. URL: http://erepository.uonbi.ac.ke/bitstream/handle/11295/161920/Murithi%20A_An%20Investigation%20of%20the%20Fatigue%20Properties%20of%20the%20Aluminum-copper%20Alloy%202014.pdf?sequence=1

9. Окунев А.П., Автореферат «Выбор рациональных характеристик опор силового агрегата переднеприводного легкового автомобиля» // Тольяттинский государственный университет. 2010. PP. 9. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01004875369.pdf

10. Гурьянов А.И., Диссертация «Совершенствование конструкции кронштейна крепления силового агрегата автомобиля в САПР» // Тольяттинский государственный университет. 2021. PP. 50. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/19858/1/Гурьянов%20А.И._МСМ-1902a.pdf

11. Fadi Alkhatib ., Dissertation «Techniques for Engine Mount Modeling and Optimization» // University of Wisconsin-Milwaukee. 2013. PP. 2-6. URL: <https://dc.uwm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1349&context=etd>

12. D.S. Dima, D. Covaciu., Solutions for acceleration measurement in vehicle crash tests // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 252. PP. 6-7. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/252/1/012007/pdf>

13. Шишкин И.Ф., Сергушев Г.Ф. Испытания и испытательное оборудование: учеб.пособие. – СПб.: СЗТУ, 1999. – 37 с.

14. ГОСТ 16504–81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=147680>

15. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – URL: <http://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=241313>
16. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, А.А. Михайлов, А.С. Немов, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 8 с. – URL: https://fea.ru/spaw2/uploads/files/2012_Книги_СИО_и_КИ/2013_0101_НИУ_СПбГПУ_Боровков_А_И_и_др__Компьютерный_инжиниринг-2012.pdf
17. Богомолов М.В. Виртуальные испытания изделий // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2010. – № 38. – 7 с. – Режим доступа: <https://mai.ru/upload/iblock/552/virtualnyeispytaniya-izdeliy.pdf>
18. Паскарь Д.А. ОБЗОР РЫНКА PLM СИСТЕМ. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева г. Кемерово. 2017. с.1. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/Articles/0403007-.pdf>
19. Cristian P., The Influence of Mesh Density on the Results Obtained by Finite Element Analysis of Complex Bodies // Department of Engineering and Industrial Management, Transilvania University of Brasov, 500036 Brasov, Romania. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/7/2555>
20. П.А. Петров, И.А. Бурлаков. Изготовление гибридных деталей типа кронштейн методом осадки с кручением и последующей горячей объемной штамповкой. Московский политехнический университет. 2024. с.3 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izgotovlenie-gibridnyh-detaley-tipa-kronshteyn-metodom-osadki-s-krucheniem-i-posleduyuschey-goryachey-obemnoy-shtampovkoj/viewer>
21. И.Ю. Дмитриев. Коррозионные процессы металлов. Ульяновский государственный университет им. П.А. Столыпина. 2022. с. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/korrozionnye-protsessy-metallov/viewer>
22. О.М. Огородникова. Исследовательская роль программ CAE в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM. Вестник машиностроения. Уральский

федеральный университет, г. Екатеринбург. 2012. №1. с.25-31. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/22392/1/ogorodnikova_2012.pdf

23. О.К. Зяблов. Обзор современных CAD/CAM/CAE систем и перспективы применения на отечественных судоремонтных предприятиях. Вестник ФГАВТ. Выпуск 44. 2015. с.168-173. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennyh-cad-cam-cae-sistem-i-perspektivy-ih-primeneniya-na-otechestvennyh-sudoremontnyh-predpriyatiyah/viewer>

24. Основы функционирования систем сервиса: учебник для вузов / М. Е. Ставровский [и др.]. – М.: Издательство Юрайт, 2020. – 190 с. URL: <https://avidreaders.ru/book/osnovy-funkcionirovaniya-sistem-servisa-uchebnik-dlya.html>

25. Кукушкин К.В. Автомобиль как идеальный полигон разработки и испытаний передовых производственных технологий // АБС-авто. – 2018. – № 4. – С. 38–43. URL: <https://fea.ru/news/6723>

26. Челпанов И.Б. Автоматические технологические машины и оборудование. Испытания машин: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2008. – 296 с.

27. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» // Цифровая подстанция. – 2019. – № 12. – С. 20–25. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/09/cifrovye_dvyinii.pdf

28. Алешин М.В. Опыт применения технологий суперкомпьютерного инжиниринга в деятельности Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» / М.В. Алешин, Ю.Я. Болдырев, А.И. Боровков, И.С. Давыдов, О.И. Клявин, А.П. Петкова, А.Ю. Тамм // Суперкомпьютерные дни в России, 2018 (Russian Supercomputing Days 2018, RussianSCDays.org). – 717–727 с. URL: <https://2018.russianscdays.org/files/pdf18/717.pdf>

29. Городецкий А.Е. Интегрированные системы автоматизации НИОКР: учеб. пособие / А. Е. Городецкий, И. Л. Тарасова. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 1998. – 25-78 с.

30. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / под науч. ред. А.И. Боровкова. – М.: Альянсспринт, 2020. – 401 с. – URL: <https://dfnc.ru/wp-content/uploads/2020/09/Kniga-TSfirovoj-dvojn timer.pdf>