

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 Совершенствование методики проектирования узлов конструкции
выхлопной системы легкового автомобиля в САПР

Обучающийся	<u>А. С. Гусев</u> (И.О. Фамилия)	<u>_____</u> (личная подпись)
Научный руководитель	<u>к.т.н., доцент Е.Н. Почекуев</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	
Консультант	<u>к.т.н., доцент П.Н. Шенбергер</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	3
1 Обзор источников литературы по надежности и долговечности кронштейнов подвески системы выпуска	5
1.1 Надежность и долговечность в автомобильной промышленности	5
1.2 Обзор источников в области оценки надежности и долговечности	8
1.3 Анализ материалов конструкции выхлопной системы легкового автомобиля	9
1.4 Технология оценки надежности, продолжительность жизни изделия..	12
1.5 Испытание на долговечность монтажного кронштейна глушителя.....	13
2 Разработка в САПР электронных моделей конструкции крепления выхлопной системы легкового автомобиля	18
2.1 Описание конструкции узлов крепления выхлопной системы легкового автомобиля.....	18
2.2 Разработка электронной модели глушителя	20
3 Инженерный анализ прочности системы выпуска отработавших газов в САПР	32
3.1 Построение сетки и выбор материала для расчёта.....	32
3.2 Анализ расчета прочности кронштейна крепления выхлопной системы в МКЭ с учетом поля температур.....	44
4 Методика расчета усталостной прочности узлов системы выпуска отработавших газов.....	52
4.1 Анализ методов расчёта усталостной прочности	52
4.2 Описание расчёта усталостной прочности.....	65
Заключение	71
Список используемой литературы и используемых источников.....	72

Введение

Актуальность работы. Долговечность и надежность автомобиля одинаково важны как с точки зрения промышленности, так и с точки зрения потребителя. Автомобильная промышленность по-прежнему сталкивается со значительными гарантийными расходами, возникающими из-за преждевременного выхода из строя их продукции в руках потребителей. Ключом к снижению затрат на проектирование и разработку и гарантийных расходов является проведение испытаний продукта на надежность и долговечность для исследования режимов отказов. Конструкция компонентов транспортного средства должна быть максимально точно адаптирована к условиям эксплуатации. Надежность эксплуатации автомобиля можно определить, как меру непредвиденных перерывов или неожиданных сбоев во время использования клиентом. Для достижения высокой надежности автомобиля проводятся испытания долговечности с помощью комбинации физических тестов, на дороге, на испытательном полигоне и с использованием сервогидравлического симулятора дорожных испытаний в лаборатории. Во время проверки надежности одной из важных целей является максимальное использование возможностей для наблюдения за неожиданными сбоями, чтобы их можно было устранить. Таким образом, утверждение срока службы отдельных компонентов, отдельных узлов и комплектных транспортных средств является основным направлением деятельности автомобильной промышленности. Для снижения затрат, которые возникают в процессе различных испытаний и эксплуатации легкового автомобиля необходимо прогнозировать надежность его элементов и узлов автомобиля на стадии раннего проектирования.

Цель работы: разработка методики по оценке долговечности кронштейнов системы выпуска отработавших газов автомобиля в процессе много цикловых нагрузок в САПР.

Задачи:

- 1) Выполнить обзор источников по теме долговечности и испытаний системы выпуска отработавших газов.
- 2) Разработать электронную модель системы выпуска легкового автомобиля.
- 3) Создать, конечно-элементную модель кронштейна и методику моделирования прочности и долговечности изделия.

Научная новизна: методика позволяет оценить долговечность кронштейнов системы отработавших газов автомобиля на этапе проектирования за счёт моделирования процесса много циклового нагружения кронштейнов СВОГ (расшифровать аббревиатуру).

Практическая значимость: методика оценки долговечности кронштейнов СВОГ позволит повысить пробег автомобиля, снизить производственные затраты, обеспечить комфорт пассажиров.

Объект исследования: система выпуска отработавших газов легкового автомобиля.

Предмет исследования: методики оценки долговечности кронштейнов системы выпуска.

Методы исследования: метод конечных элементов, теоретические методы оценки долговечности кронштейнов СВОГ.

1 Обзор источников литературы по надежности и долговечности кронштейнов подвески системы выпуска

1.1 Надежность и долговечность в автомобильной промышленности

В автомобильной промышленности, безопасности транспортных средств и продукции качество является основным фактором, которому производители автомобилей уделяют значительное внимание. При изготовлении транспортных средств дефекты возникают во время изготовления, сборки и других процессов. Для постоянного улучшения качества и удовлетворенности клиентов функции обеспечения качества на заводе планируются, интегрируются и выполняются для выявления этих дефектов и составления планов действий, превентивных мер по их устранению. В настоящее время автомобильная промышленность уделяет большое внимание повышению качества, долговечности и надежности продукции уже в среде виртуального моделирования. Основная проблема, с которой приходится сталкиваться разработчикам и производителям в этой области, заключается в повышении срока службы транспортных средств [1,2].

Долговечность и надежность транспортного средства одинаково важны с точки зрения потребителя. Автомобильная промышленность по-прежнему сталкивается со значительными гарантийными расходами, возникающими из-за преждевременного выхода из строя их продукции в руках потребителей [3].

В инженерных приложениях более 80% отказов деталей являются результатом усталости материалов, и это приводит к значительным экономическим потерям. Таким образом, индексным параметрам, таким как усталостный ресурс и надежность деталей, уделяется все большее внимание. 10-13 Анализ усталости и долговечности материалов может быть использован для оценки срока службы деталей и материалов, прогнозирования времени усталостного разрушения и потенциального предотвращения выхода

из строя машин и оборудования из-за отказа отдельных деталей. Кроме того, анализ усталости может помочь избежать чрезмерно сложных инженерных конструкций, которые увеличивают затраты и материалоемкость. Например, Чен и [1,4] провели анализ усталости вала режущей головки комбайна для уборки сахарного тростника с целью уменьшения его веса и срока службы, чтобы избежать чрезмерных проектных допусков и снизить потребление энергии. Очень важно провести дополнительные исследования по методам прогнозирования усталостной долговечности и создать полную и точную теорию анализа усталости.

Производители транспортных средств обнаруживают проблемы с помощью испытаний транспортных средств, и сбора информации об их эксплуатации [2]. Потребность в снижении стоимости и веса, а также в увеличении полезной нагрузки является приоритетной в автомобильной промышленности. Таким образом, конструкция транспортного средства обычно представляет собой компромисс между производственными затратами и безопасностью, поскольку долговечность, особенно компонентов безопасности, имеет большое значение. Для инженера-конструктора это означает, что конструкция компонентов должна быть максимально точно адаптирована к условиям эксплуатации. Для достижения этих целей испытания на долговечность проводятся с помощью сочетания физических испытаний на дороге на испытательном полигоне и использования сервогидравлического симулятора дорожных испытаний в лаборатории. Эксплуатационные нагрузки, которым подвергалось это транспортное средство на испытательном полигоне, моделируются в лаборатории, где это возможно, по соображениям затрат и времени. Заданное количество циклов загрузки на сервогидравлической испытательной машине имитирует определенное количество пройденных километров. Выполняя испытания с несколькими транспортными средствами и наблюдая за любыми усталостными характеристиками, такими как деформации и / или трещины, долговечность автомобиля может быть определенная. Таким образом,

центральной темой для отдела развития автопроизводителей является утверждение срока службы отдельных компоненты, отдельные узлы и комплектное транспортное средство [4]. Современные транспортные средства обладают различными характеристиками производительности, безопасности и комфорта, которыми они принципиально отличаются от предыдущих моделей. В то время как дозировка топлива и процесс сгорания в предыдущих поколениях автомобилей контролировались дроссельной заслонкой во взаимодействии с карбюратором, в настоящее время электронные блоки управления (ECU) рассчитывают и обеспечивают оптимальное количество топлива и воздуха для эффективной нагрузки и частоты вращения двигателя.

Помимо инновационного управления двигателем, функции безопасности, такие как подушки безопасности, антиблокировочная тормозная система (ABS), противоскользкие системы, натяжители ремней или электронная программа стабилизации являются стандартными комплектующими современных моделей автомобилей, а в некоторых случаях даже предусмотрены законодательством. Эти системы безопасности привели к увеличению числа аварий за счет активного воздействия на динамику транспортного средства, с одной стороны, и к смягчению последствий аварий для водителя и пассажиров с помощью инновационных удерживающих систем, с другой стороны. Функции комфорта играют все более важную роль в современных автомобилях. Эта область включает в себя большое разнообразие функций, начиная от физических удобство, основанное на сложных системах кондиционирования воздуха, от электрических устройств регулировки сидений и зеркал заднего вида до инновационных систем помощи водителю, таких как дистанционный радар или навигационные системы. Долговечность и надежность компонентов транспортного средства являются главными факторами для успешного функционирования транспортных средств [5,6].

В автомобильной промышленности разработка компонентов сталкивается с противоречивыми требованиями, которые должны выполняться одновременно:

- Необходимость выполнения задач в суровых условиях с высокой надежностью в течение всего срока службы транспортного средства.
- Обеспечением требуемой точности и выполнением сложных функций управления.
- Повышение прочности и надежности при снижении веса автомобиля
- Увеличение массовости производства и снижением стоимости затрат на производство

1.2 Обзор источников в области оценки надежности и долговечности

Авторы Сентилнатан Суббия и др. [3] провели анализ отказов кронштейнов крепления глушителя трехколесных транспортных средств, наблюдаемых во время испытания на долговечность. Многие возможные причины сбоев были выявлены с помощью диаграммы «рыбья кость». Анализ конструкции показал, что кронштейн действовал как консольная балка с одноплоскостной сваркой, установленная на подставке двигателя. D. G. Янг и др. [6] исследовали влияние высокотемпературного старения на термомеханические свойства, микроструктуру формовочных смесей для упаковки в автомобильной электронике. При значительном увеличении количества электроники в автомобиле потенциальная вероятность сбоев, скорее всего, возрастет, если не будут приняты меры по обеспечению надежности. Кроме того, за последние несколько лет значительно возрос спрос на высокотемпературную прикладную электронику в автомобилестроении. Усадка, вызванная старением, была обнаружена для всех образцов

упаковочных полимеров. Считается, что окисление является основным механизмом изменения микроструктуры и ухудшения свойств материала. По этим причинам в некоторых образцах образовались трещины.

Дж. М. Галлардо и др. [7] исследовали сервисные сбои в автомобильных амортизаторах и провели анализ отказов. В этом случае произошло несколько сбоев в обслуживании головки амортизаторов, изготовленных той же компанией. Основными причинами разрушения были обнаружены нежелательная пористость, трещины, включения и микроструктуры низкой прочности, образовавшиеся во время сварки. Отказ, тем не менее, был в основном связан с плохим выравниванием соединительных деталей во время сварочной операции.

Ж. Ж. Фуэнтес и др. [8] изучали преждевременное разрушение автомобильного листа пружины. Были использованы общие методы диагностики отказов, включающие изучение истории производства и отказов, макроскопический контроль, химический анализ, металлографический анализ, измерения твердости, испытания на статическую нагрузку и испытания на усталость. Предлагаются различные потенциально эффективные меры по исправлению положения, такие как минимизация концентраторов напряжений, возникающих в результате конструктивных, металлургических или производственных факторов, использование болта с резьбой только на его концах.

1.3 Анализ материалов конструкции выхлопной системы легкового автомобиля

Материалы, используемые для выпускных трубопроводов, глушителей и других компонентов выхлопной системы, которые обсуждаются в этой статье, состоят в основном из сплавов железа. Алюминий иногда используется в качестве покрытия на сплавах черных металлов для придания дополнительной коррозионной стойкости. [12]. В некоторых случаях

используются цветные никелевые и титановые сплавы в компонентах выхлопной системы для повышения прочности коррозионной стойкости и экологических требований. [8]. Керамика также нашла ограниченное применение в выхлопных системах, чтобы использовать преимущества своих изоляционных свойств. [10]

Керамика и специализированные металлические сплавы, хотя и с иными составами и свойствами, чем те, которые используются в системах трубопроводов, также широко используются в качестве подложек для устройств последующей обработки - керамика и металлический подложки катализатора и твердые частицы фильтрующие подложки. Эти материалы более подробно рассматриваются в документах, посвященных последующей обработке.

Сплавы черных металлов основаны на железоуглеродистых сплавах и включают углеродистую сталь, легированные стали, нержавеющую сталь и чугун. Легирующие элементы:

- обеспечивают упрочнение феррита твердым раствором,
- вызывают осаждение карбидов сплавов, а не цементита Fe_3C ,
- улучшают коррозионную стойкость и другие специальные характеристики.

Выбор материалов выхлопной системы обусловлен рядом факторов, включая стоимость, гарантийные требования и требования законодательства и клиентов к длительному сроку службы. В результате материалы, используемые в выхлопных системах OEM, кардинально изменились и продолжают совершенствоваться.

Мягкая углеродистая сталь была основным материалом для выхлопных систем на протяжении многих десятилетий. Покрытие из оксида железа на выхлопной системе в разной степени защищало ее от атмосферной коррозии. Однако выхлопные системы из таких материалов выходили из строя от низкой коррозионной стойкости при воздействии дорожной соли и конденсата

выхлопных газов, что приводило к очень короткому сроку. Применение углеродистой стали в настоящее время ограничено отдельными внедорожными применениями, которые работают в относительно неагрессивных средах. Коррозионная стойкость углеродистой стали может быть значительно улучшена за счет использования горячего алюминиевого покрытия. Это часто называют алюминизированная сталь. [12].

Одним из особенно важных легирующих элементов из черных сплавов является хром. Путем добавления хрома формируется нержавеющая сталь. При нагревании нержавеющей стали хром образует защитное покрытие из оксида хрома, которое задерживает дальнейшее окисление. Для пассивации поверхности и классификации материала как нержавеющей стали обычно требуется минимум около 10,5% хрома. Пока этот оксидный слой стабилен и непрерывен, металлическая основа хорошо защищена от коррозии. Следует отметить, что никель, используемый во многих сортах нержавеющей стали, содержится не во всех сортах нержавеющей стали.

Примерно с середины 1990-х годов обычные углеродистые и низколегированные стали были заменены нержавеющей сталью в качестве основного материала для выхлопных систем после выпускного коллектора или турбонагнетателя. [13]. Этот переход произошел из-за требований рынка к расширенным гарантиям, а также из-за требований, установленных стандартами выбросов. Технологии, отвечающие все более строгим стандартам выбросов, могут повышать температуру выхлопных газов, что делает задачу соблюдения требований к прочности и долговечности особенно сложной. Стандарты по выбросам также требуют, чтобы выхлопные системы были спроектированы таким образом, чтобы облегчить сборку, установку и эксплуатацию без утечек в течение всего срока службы автомобиля.

С начала 21 века, включая многие легирующие элементы, используемые в нержавеющей стали, испытывали значительные и быстрые колебания цен. В некоторых случаях стоимость этих материалов увеличилась до ~ 1000%. В ответ производители нержавеющей стали добавили дополнительную плату за

сплав, которая может быть скорректирована по мере необходимости с учетом этих колебаний цен. Многие производители сосредоточили значительные исследовательские усилия на снижении чувствительности цены готовой продукции к этим доплатам за сплав. [14].

1.4 Технология оценки надежности, продолжительность жизни изделия

Качество определяется как характеристика, гарантирующая, что продукт соответствует требованиям и ожиданиям заказчика при отправке и вводе в эксплуатацию пользователем, а надежность - это сумма всех характеристик устройства, касающихся его способности достигать заданных требований при четко определенных условиях в течение определенного периода времени [5]. В этом смысле надежность является составной частью качества и описывает изменение качества с течением времени. Основным параметром для количественной оценки надежности устройства и для получения численного определения - это срок службы, определяемый как среднее время до отказа (MTTF). Определения качества и надежности включают конкретные ожидания потребителей, четко определенные условия использования и предполагаемый срок службы. Количественная оценка надежности означает прогнозирование срока службы и вероятности отказа. Наиболее широко используемыми вероятностными функциями являются [5]:

- 1) Функция надежности $R(t)$: Доля единиц, все еще работающих по истечении времени t .
- 2) Кумулятивная функция распределения $F(t)$: Доля единиц, вышедших из строя после времени t .
- 3) Функция плотности вероятности (PDF) $f(t)$: Доля исходной популяции, которая выходит из строя между временем t и $t+dt$.
- 4) Частота отказов $h(t)$: доля оставшейся совокупности в момент времени t , которая выходит из строя между временем t и $t+dt$.

Если распределение срока службы известно, то сам статистический средний срок службы может быть рассчитан на основе среднего времени до отказа МТТФ как,

$$MTTF = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt} \quad (1.1)$$

1.5 Испытание на долговечность монтажного кронштейна глушителя

Сентилнатан Суббия и др. [3] провели испытания на долговечность кронштейна крепления глушителя трехколесного транспортного средства и провели анализ отказов для него. Соответственно были внесены изменения в конструкцию монтажных кронштейнов. На рисунке 1 показаны кронштейны крепления глушителя на подставке двигателя.

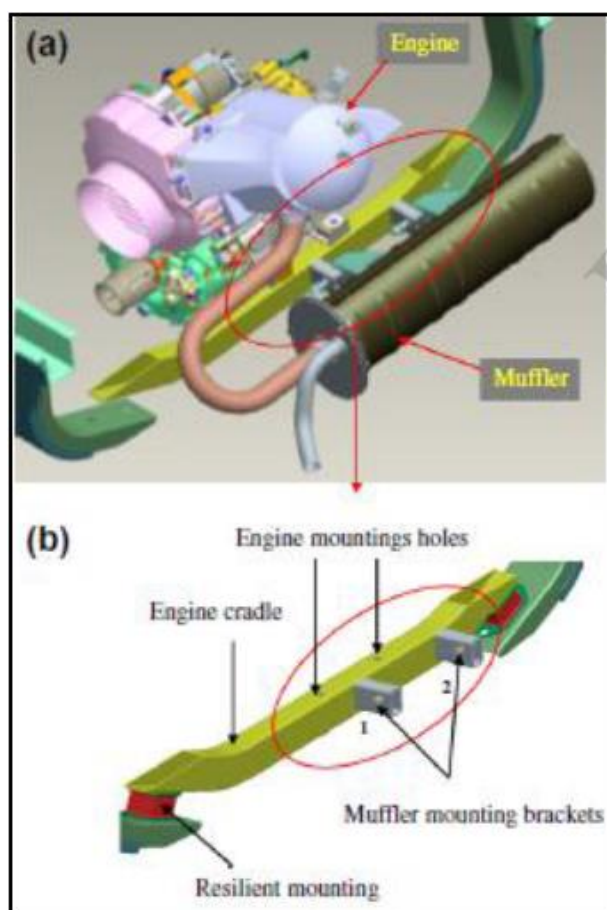


Рисунок 1 – Система крепления глушителя и двигателя

Как двигатель, так и глушители установлены на подставке двигателя. Глушитель установлен на двух кронштейнах (позиции 1 и 2 на рисунке 1). Глушитель примыкает к каждому кронштейну с одной стороны, и они скреплены вместе простыми втулками. Эти плоские втулки приварены к монтажным кронштейнам, а эти кронштейны, в свою очередь, приварены к подставке двигателя.

Испытания на прочность проводятся на городских, сельских, горных и шоссейных трассах. Каждая трасса имеет определенный диапазон профиля дороги. Долговечность сельских и шоссейных дорог - это ускоренные дорожные испытания, а долговечность городских и шоссейных дорог очень похожа на схему загрузки конечного пользователя. Модели вождения на долговечность были разработаны на основе моделей использования клиентами в полевых условиях. Каждый пробег транспортного средства состоит из различных схем загрузки для конкретных километров и в совокупности это принимается за один цикл. Эти циклы варьируются в зависимости от типа испытания на долговечность. Хотя этот тип тестирования действительно отнимает много времени и энергии, он имитирует очень практические условия. Этот тип ускоренного тестирования проводится для определения фактического срока службы транспортных средств. Сбой наблюдался на среднем расстоянии 10 000 км. Трещины сварного шва были выявлены, как показано на рисунке 2, с помощью неразрушающего метода, называемого контролем проникновения красителя (DPI).



Рисунок 2 – Вышедший из строя кронштейн на 14 402 км [3]

Четыре основные причины сбоев определены как человек, метод, материал и конструкция на диаграмме fishbone. Первые три причины, а именно человек, метод и материал, приведут к дефектам сварного шва, таким как неполное проникновение, неполное плавление, подрезание, плохая конструкция сварного шва, металлургические сбои и т.д. Анализ взаимосвязей показывает, что сварка в одной плоскости (проблема проектирования), кронштейн, действующий как консольная балка (проблема проектирования), концентричность между двумя втулками (проблема проектирования), высокие тепловые напряжения из-за радиационного воздействия (проблема проектирования) и меньшее проникновение CO_2 в сварной шов (проблема

квалификации персонала) оказывает сильное влияние на разрушение сварного шва. Были проведены подробные проверки качества сварочных материалов и сварочных процессов. Качество сварного шва соответствовало стандартам.

Приварка кронштейна к подставке в одной плоскости, в результате которой кронштейн будет действовать как консольная балка, приведет к высоким напряжениям в месте сварки. Кроме того, поскольку глушитель расположен в непосредственной близости от кронштейнов, из-за высокой температуры в сварном шве могут возникнуть термические напряжения. Однако, поскольку измеренная температура сварного шва и кронштейнов была меньше 800 °С, исследование повреждений из-за тепловых напряжений не рассматривалось.

Концентричность между двумя втулками также важна для предотвращения дополнительных напряжений, возникающих во время эксплуатации. Однако две оси втулки находились в одной плоскости. Анализ диаграммы Исикавы показывает, что причиной повреждения сварного шва может быть конструкция кронштейна [14].

Данные, собранные в результате поломок на местах, были проанализированы с использованием статистического распределения Вейбулла, что позволило определить причинно-следственные связи разрушений СВОГ. Также был проведен анализ с помощью CAE [15] для существующей конструкции, которые показали наличие высокого уровня напряжений в зоне сварного шва люльки двигателя и кронштейнов.

Выводы

На основе проведенного обзора выявлено:

1. Долговечность и надежность транспортного средства являются основными факторами в автомобильном секторе для успешной работы транспортного средства в течение длительного времени без отказов транспортного средства.

2. Испытания на долговечность и анализ отказов монтажного кронштейна глушителя показали, что одной из основных причин выхода из строя СВОГ являлись поломкой кронштейна глушителя в местах сварки из-за его консольного расположения.

3. Моделирование работы конструкции кронштейнов СВОГ производилось с помощью систем САЕ САПР.

4. Анализ тенденций развития проектирования СВОГ легковых автомобилей указал на необходимость решения следующих задач:

- определение материала для системы выпуска,
- определение параметрических данных,
- разработки электронной модели системы СВОГ легкового автомобиля,
- исследования конечно-элементной модель кронштейна СВОГ и анализа распределения полей напряжений, деформаций и температур в кронштейне,
- определение мест на системе выпуска подверженных разрушению,
- создания методики моделирования прочности и долговечности кронштейнов системы выпуска отработавших газов.

2 Разработка в САПР электронных моделей конструкции крепления выхлопной системы легкового автомобиля

2.1 Описание конструкции узлов крепления выхлопной системы легкового автомобиля

Выхлопная система собирает выхлопные газы из цилиндров, удаляет вредные вещества, снижает уровень шума и выпускает очищенные выхлопные газы в подходящую точку автомобиля вдали от его пассажиров. Выхлопная система может состоять из одного или двух каналов в зависимости от двигателя. Сопротивление потока должно быть выбрано таким образом, чтобы противодействие выхлопных газов как можно меньше влияло на работу двигателя. Чтобы выхлопная система функционировала идеально, ее необходимо рассматривать как единую, цельную сборочную единицу. Это означает, что ее компоненты должны быть согласованы инженерами-конструкторами в соответствии с конкретным автомобилем и двигателем.

Выхлопная система СВОГ состоит из нескольких компонентов, которые работают вместе, чтобы уменьшить шум выхлопных газов и обеспечить канал для выхода выхлопных газов. Этот канал используется для предотвращения попадания вредных газов в автомобиль и заболевания пассажиров. Выхлопная система должна уменьшить выбросы и защитить окружающую среду от дальнейшего ущерба. Некоторые компоненты СВОГ включают в себя серию труб, зажимов, кронштейнов и датчиков.

Выпускной коллектор – собирает выхлопные газы из каждого цилиндра из камеры сгорания двигателя и направляет их в выхлопную трубу. Обычно он изготавливается из чугуна или стали со специальными изгибами для повышения эффективности.

Каталитический нейтрализатор преобразует вредные выбросы из камеры сгорания двигателя в водяной пар и углекислый газ. Он использует

катализатор или вещество, такое как платина, палладий, родий или другие катализаторы для превращения вредных выбросов из камеры сгорания двигателя в водяной пар и углекислый газ. В результате окисления он преобразует окись углерода в углекислый газ и углеводороды, в диоксид углерода и воду. Хотя эти газы по-прежнему вредны для атмосферы, они менее вредны, чем газы, вырабатываемые двигателем. Эти катализаторы обычно служат около 150 000 км. Выход из строя катализатора может вызывать утечки выхлопных газов, осечки двигателя. Замена катализатора дорогостоящая процедура, т.к. связана с потерей драгоценных металлов, таких как церий, платина, родий или марганец.

Глушитель уменьшает или заглушает звук, производимый двигателем. Большая скорость потока выходных газов приводит к увеличению к.п.д ДВС. Однако даже крошечное отверстие в глушителе может повлиять на его способность заглушать звук или величину скорости выходных газов.

Резонатор – подобно глушителю, этот компонент изменяет звуковые колебания двигателя и может быть размещен как до, так и после глушителя в выхлопной системе. Основной задачей резонатора является организация и настройка вибрационных звуков, но также играет большую роль в повышении эффективности потока выхлопных газов. Так же, как хорошо продуманный, функционирующий глушитель, это может привести к повышению производительности и топливной экономичности.

Выхлопная труба – как последняя часть выхлопной системы. Выхлопная труба выходит из глушителя и проходит мимо заднего бампера большинства автомобилей, направляя выхлопные газы наружу. На многих современных автомобилях она также служит декоративным элементом и может быть хромирована.

Выхлопная система сама по себе является системой, подверженной вибрации, она сама производит шум через собственные частоты и вибрацию, которые передаются на кузов автомобиля. Поэтому необходимо тщательное проектирование всей СВОГ.

В дополнение ко всем сложным функциям, которые должна выполнять выхлопная система, она также подвержена экстремальным нагрузкам. Топливоздушная смесь в цилиндрах резко нагревается до температуры до 2400°С. Это приводит к тому, что он сильно расширяется, прежде чем попасть в выхлопную систему со сверхзвуковой скоростью. Этот уровень шума напоминает шум от взрыва, и он должен быть уменьшен примерно на 50 дБ при движении от выпускного клапана двигателя до конца СВОГ.

Помимо температурных напряжений и давления, выхлопная система подвержена вибрациям от двигателя и кузова, а также вибрациям и тряске от проезжей части. Выхлопная система дополнительно должна противостоять коррозии, атакующей изнутри, вызванной горячими газами и кислотой, и снаружи в виде влаги, брызг воды и соленой воды. Существует также риск отравления катализатора серой или свинцом, содержащимися в топливе.

2.2 Разработка электронной модели глушителя

Для разработки электронной модели СВОГ выберем часть системы, которая содержит глушитель и примыкающие к нему трубы, и кронштейны.

Построение модели начинается с определения плоскости, в которой она будет находиться, в данном случае для модели глушителя выбирается плоскость ZC-XC. Строится эскиз эллипса, а затем с помощью опции вытягивание задаётся объём рисунок 3.

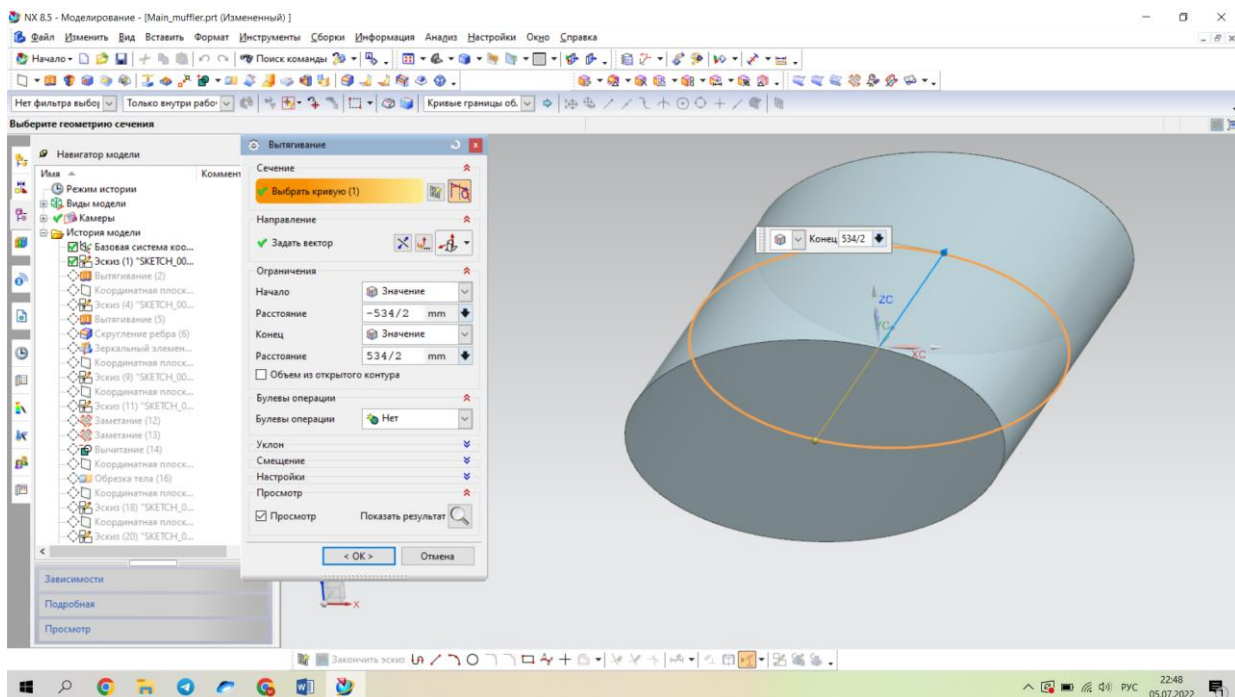


Рисунок 3 – Построение эскиза эллипса

На детали строится эскиз кромки и протягивается, на детали она получается в результате завальцовки металла рисунок 4.

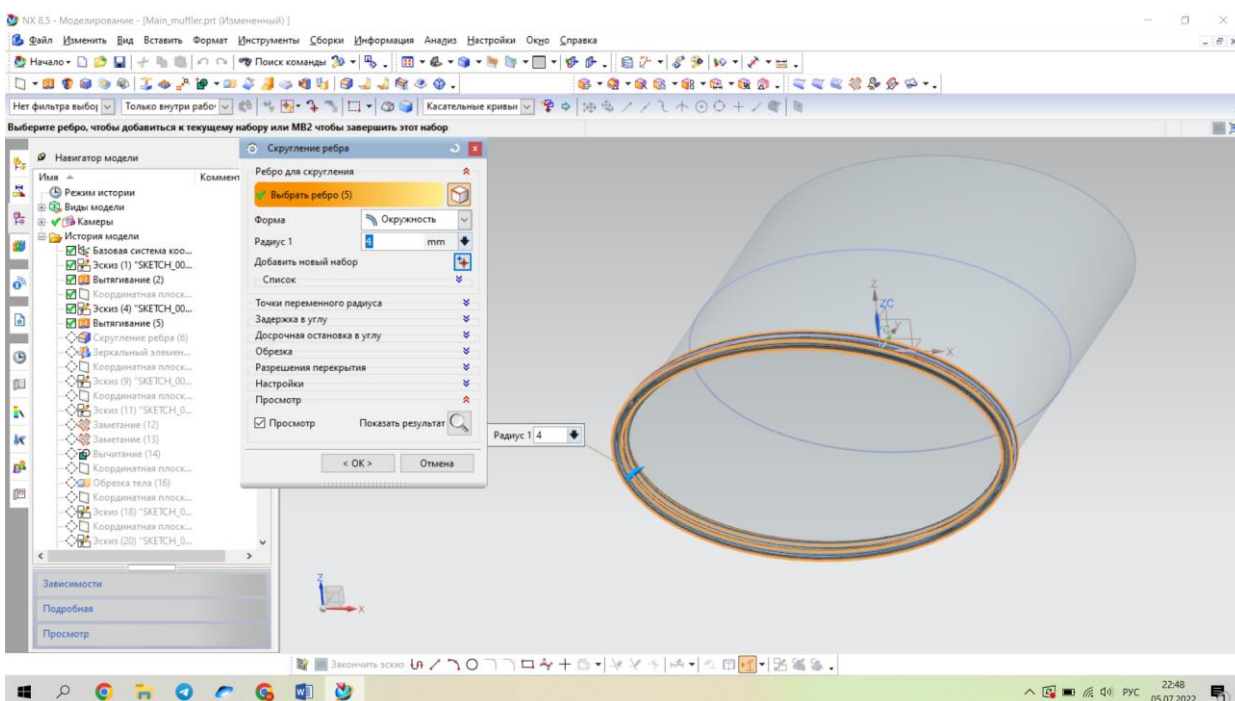


Рисунок 4 – Эскиз кромки и скругление ребра

Для кромки задаётся скругление ребра форма окружность, радиус 4.

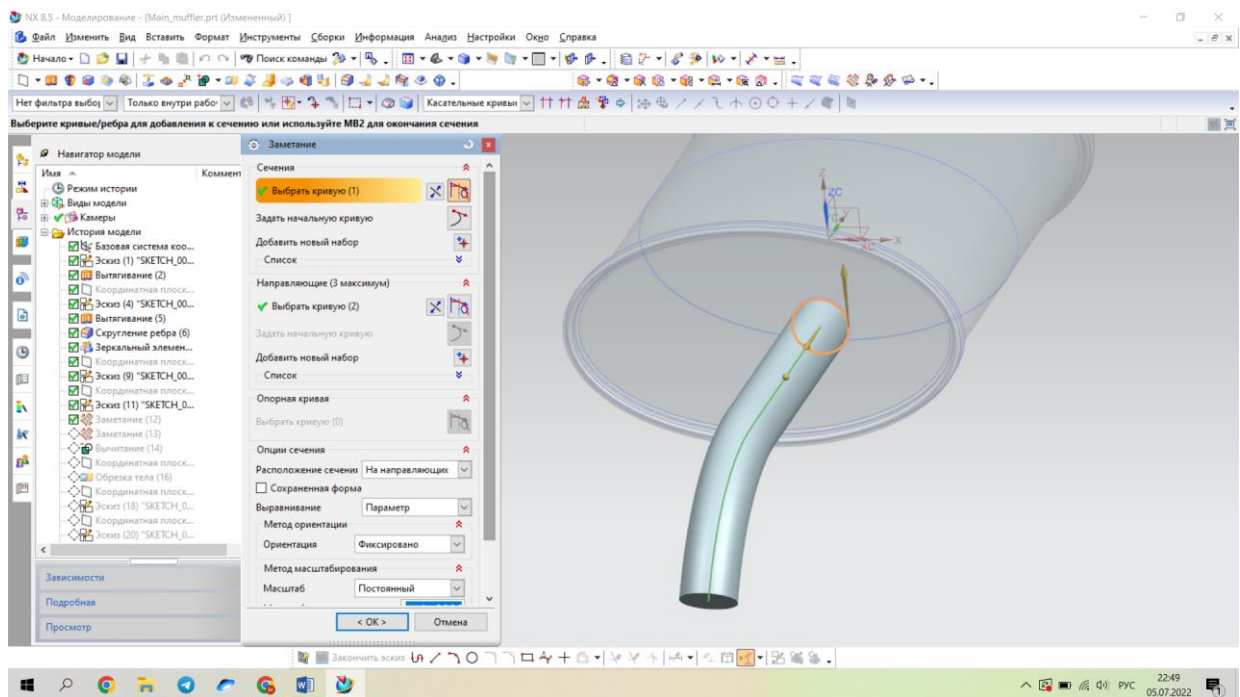


Рисунок 5 – Построение трубы

Труба глушителя строится с помощью опции заметания рисунок 6. Перед этим необходимо создать окружность, а также линия сплайна, вдоль которой будет выполняться опция заметания рисунок 5.

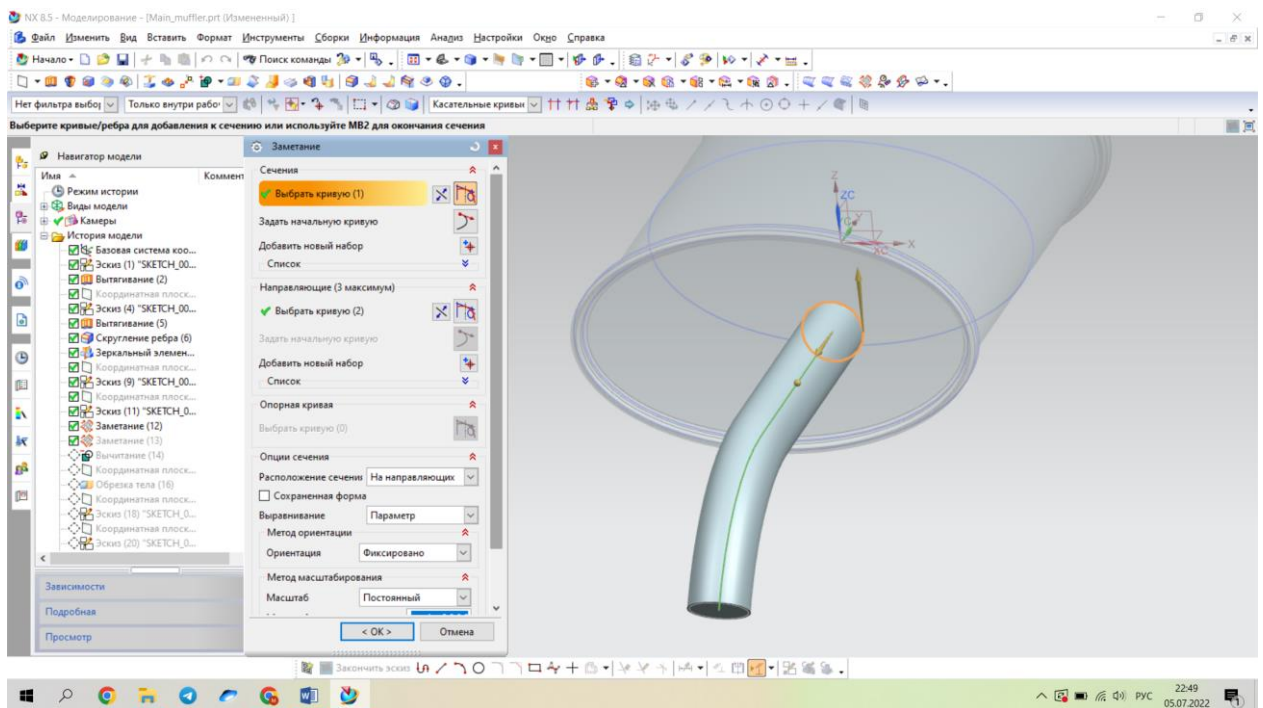


Рисунок 6 – Труба глушителя с помощью опции заметания

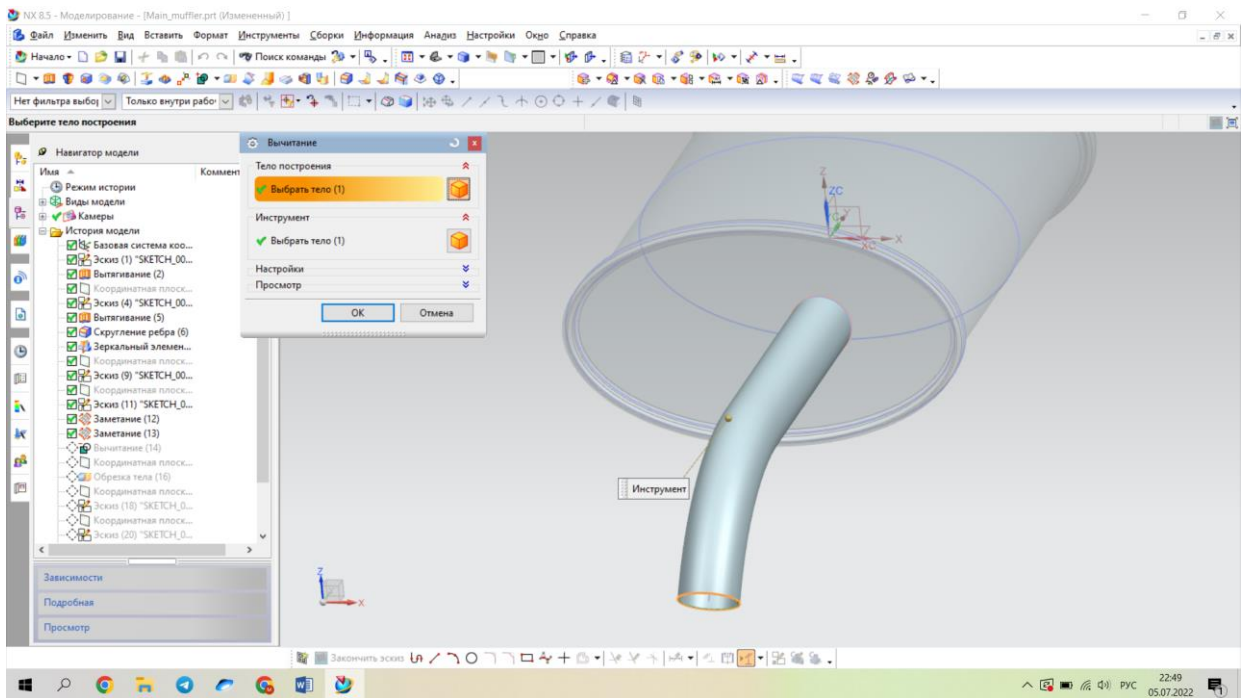


Рисунок 7 – Вычитание внутреннего объёма

Из сплошного стержня для получения трубы, необходимо задать окружность меньшего размера и протянуть их вдоль сплайна используя опцию вычитание рисунок 7.

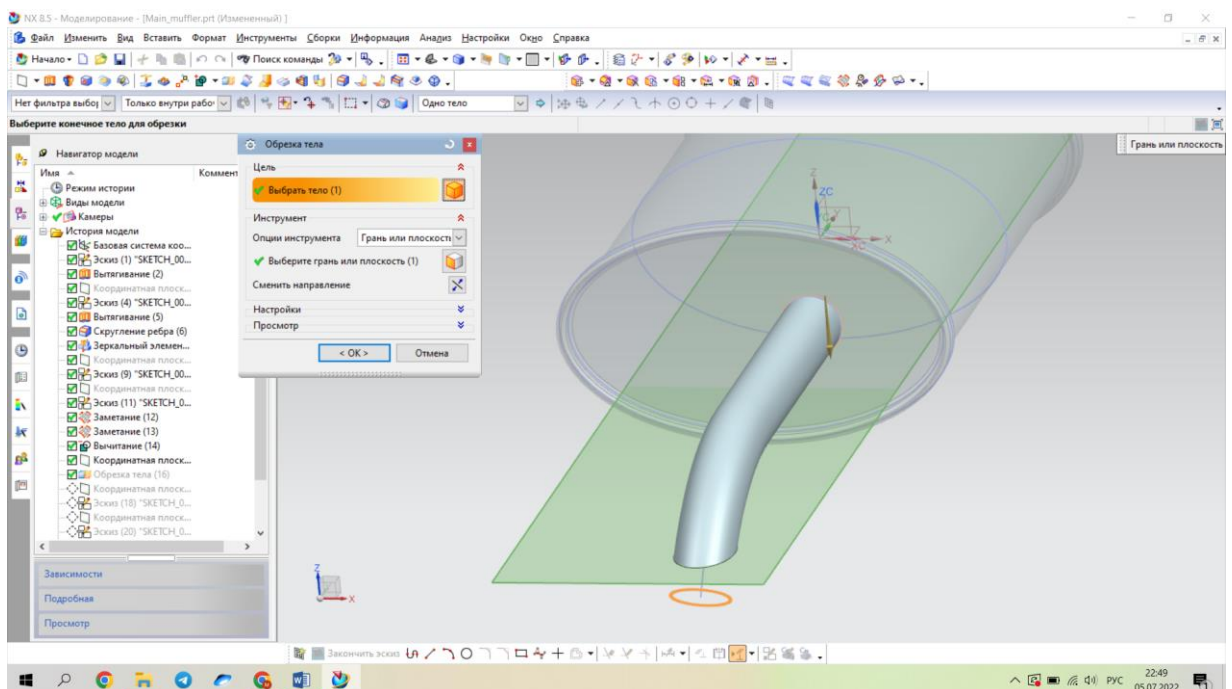


Рисунок 8 – Обрезка тела

Обрезка трубы с помощью опции обрезка тела гранью или плоскостью рисунок 8.

Построение трубы между средним и основным глушителем опцией заметания рисунок 9.

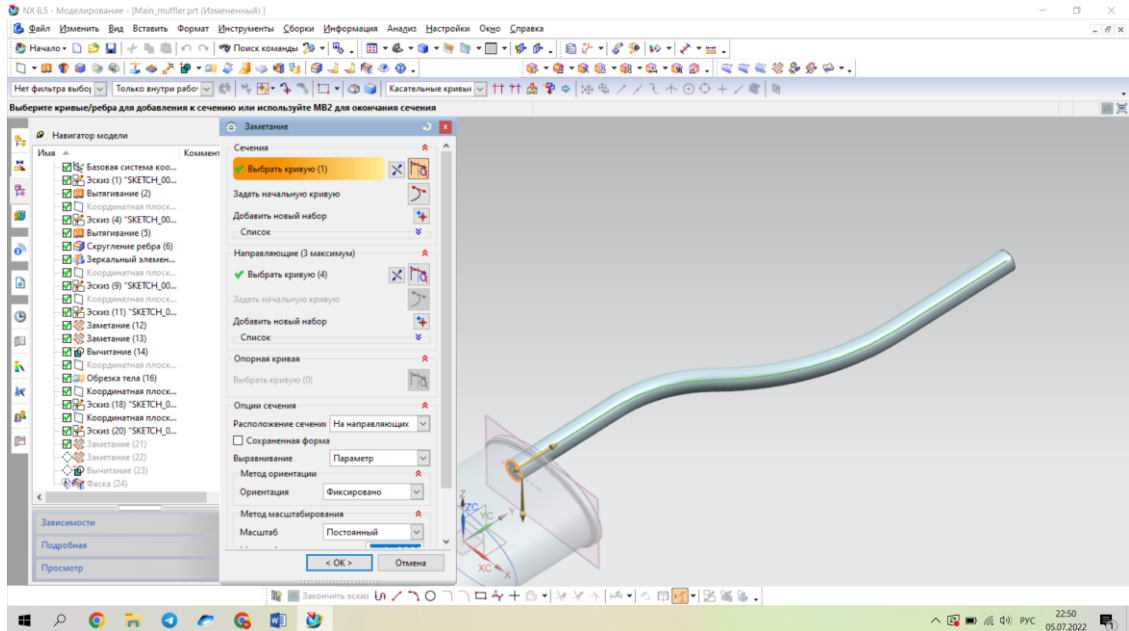


Рисунок 9 – Заметание вдоль прямой

Задание области сварки трубы и объёмом глушителя опцией скругления рисунок 10.

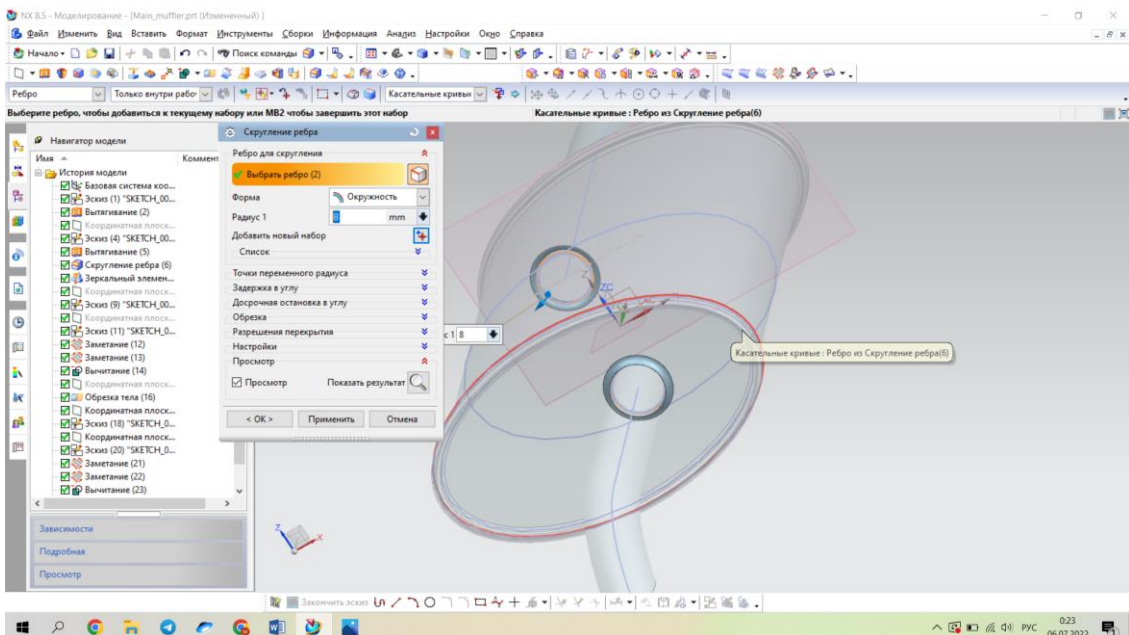


Рисунок 10 – Скругление ребра

Задание сварки между глушителем и трубой с помощью опции скругления ребер в местах сварки радиусом 8мм.

На рисунке 10 показано построение части кронштейна глушителя по средствам опции заметание вдоль кривой.

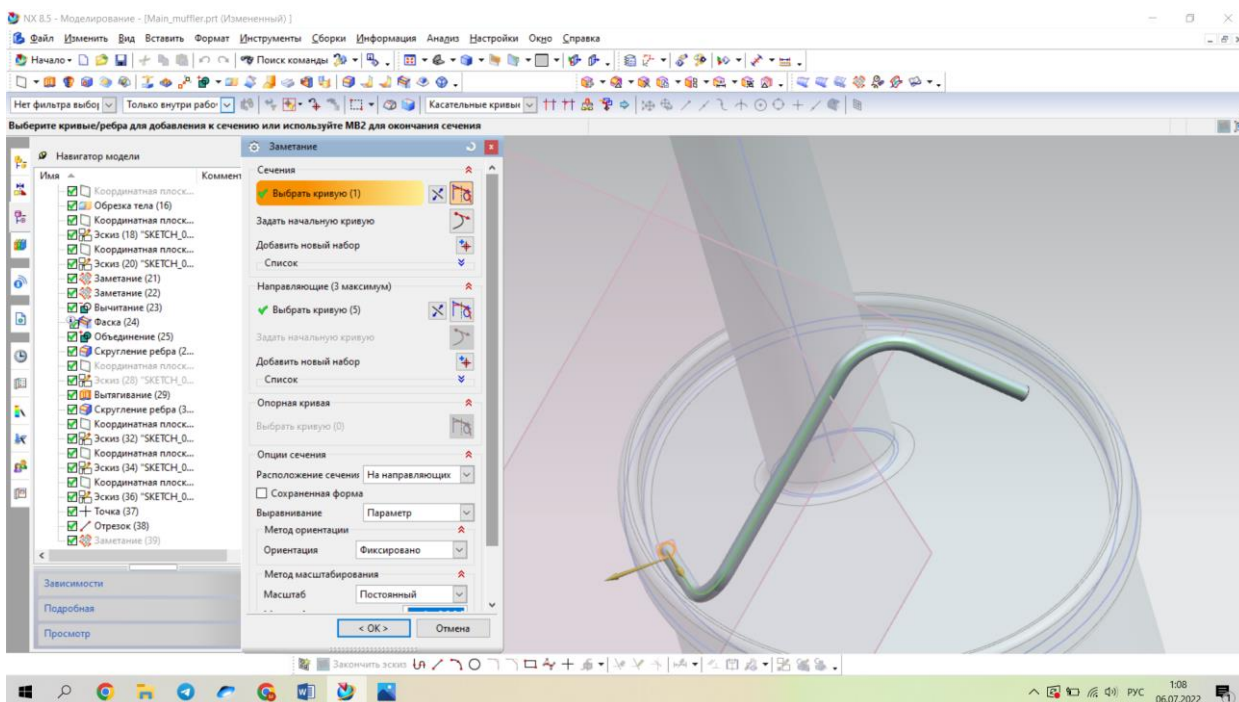


Рисунок 10 – Построение кронштейна

Построение кронштейна для глушителя. Определение плоскостей для дальнейшего построения кронштейна. Построение окружности и кинематическое заметание её вдоль кривой рисунок 11. Обрезка кронштейна плоскостью рисунок 12. Общий вид кронштейна глушителя рисунок 13.

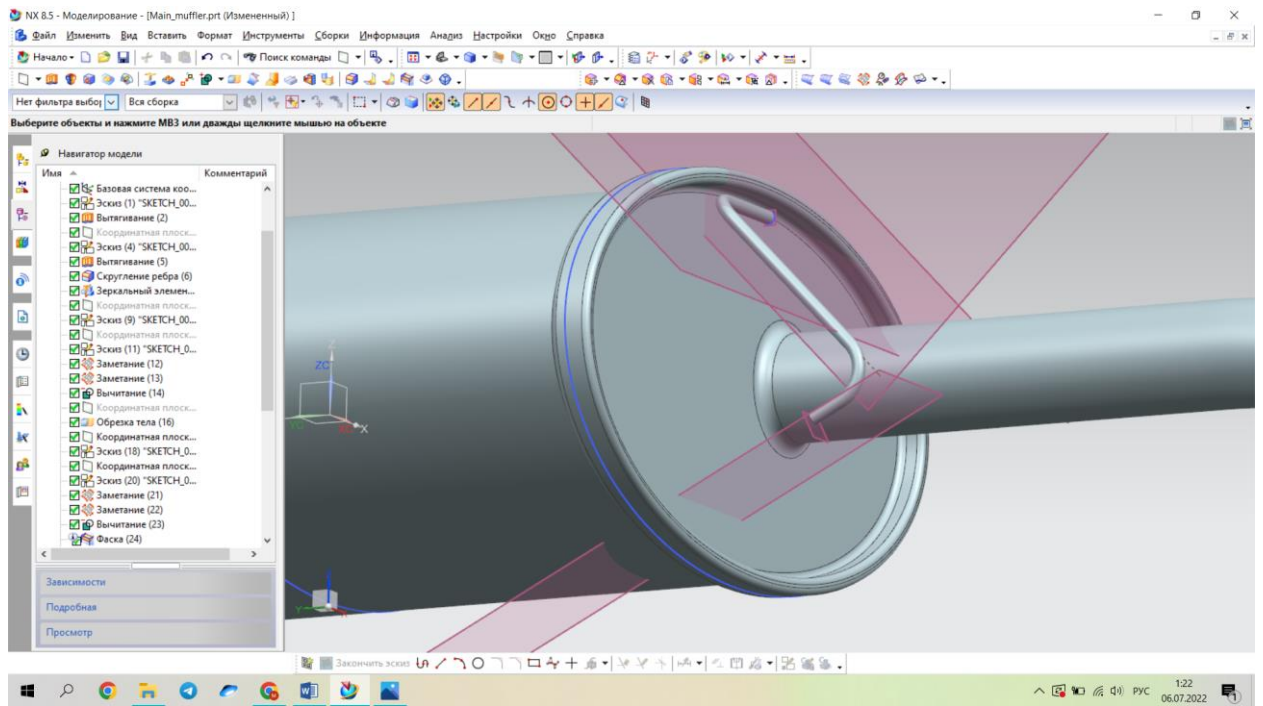


Рисунок 11 – Обрезка кронштейна плоскостью

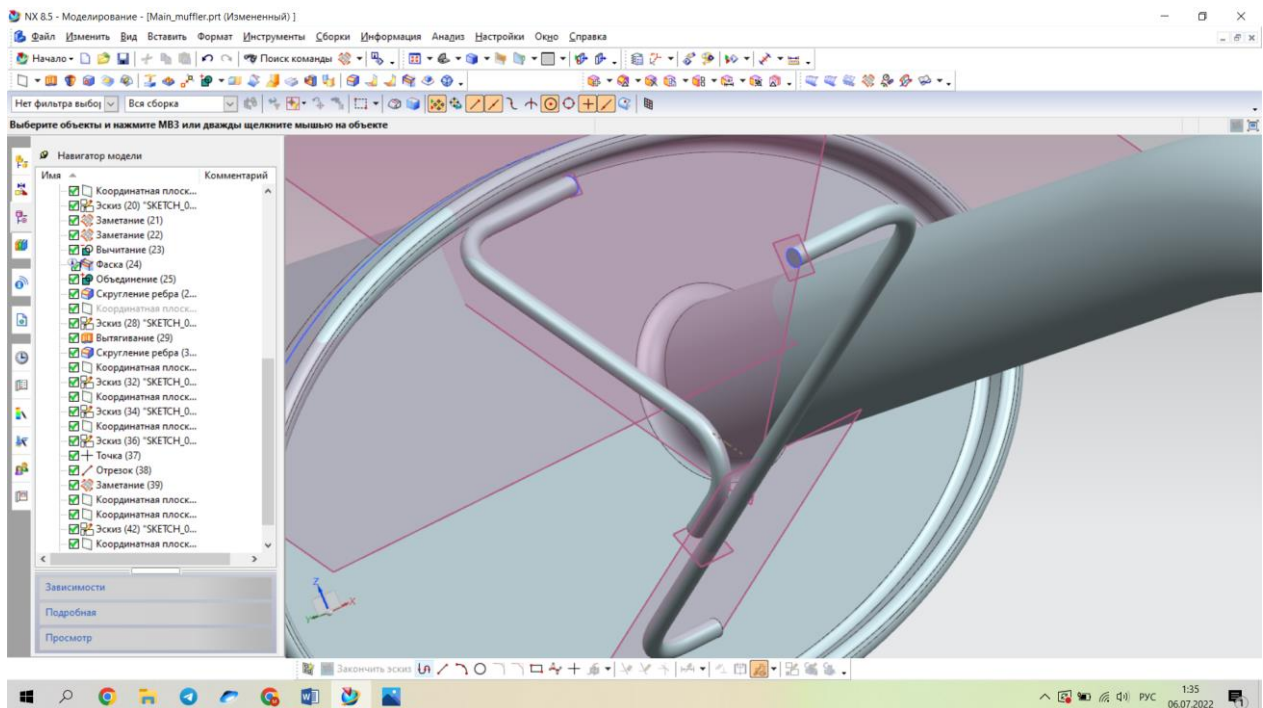


Рисунок 12 – Конечный вид кронштейна

Построение второй части кронштейна.

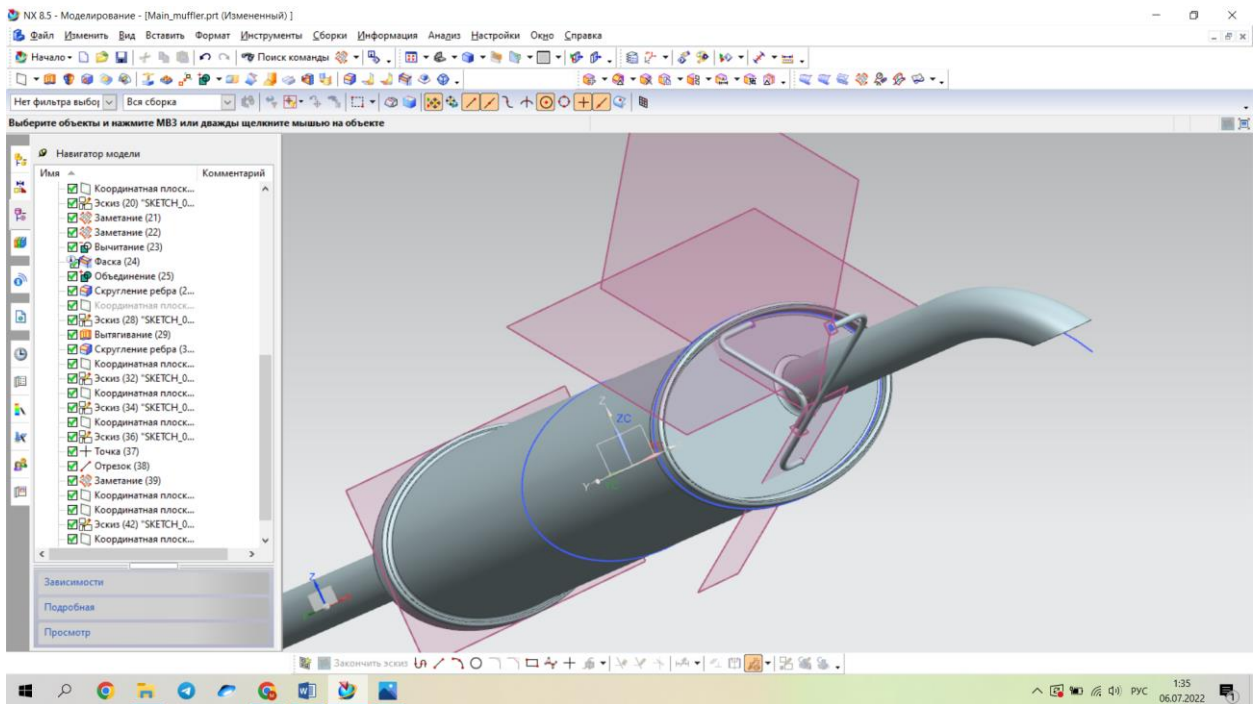


Рисунок 13 – Конечный вид кронштейна

С помощью опции зеркальный элемент отражаем кронштейн на противоположную часть глушителя рисунок 14.

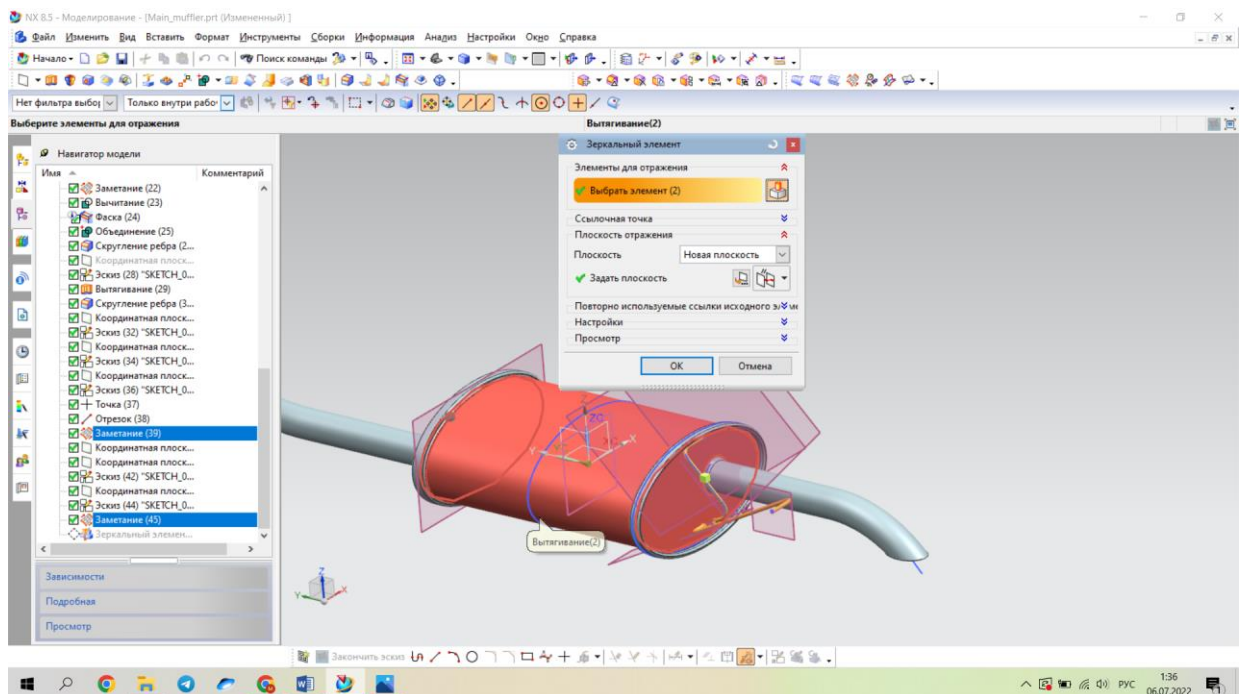


Рисунок 14 – Копирование кронштейна на противоположную часть глушителя

Окончательный вид задней банки системы выпуска отработавших газов
рисунок 15.

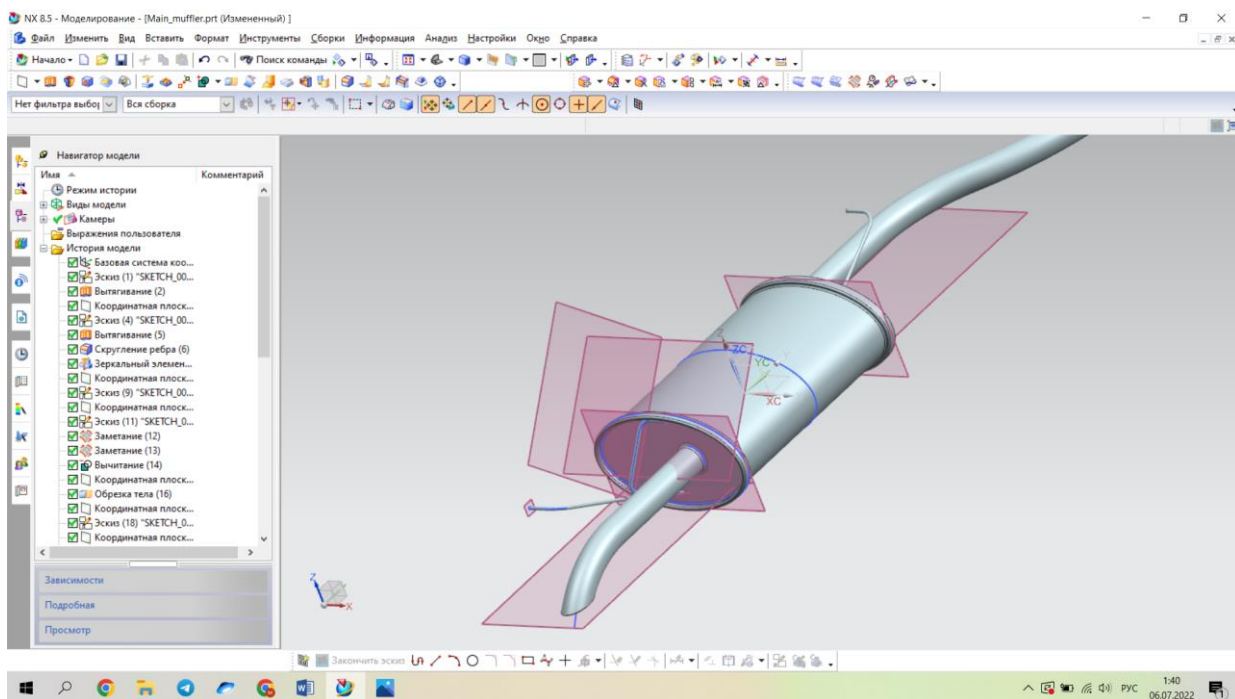


Рисунок 15 – Конечный вид глушителя

Построение резиновых демпферов системы выпуска. Построение эскиза резинового буфера рисунок 16.

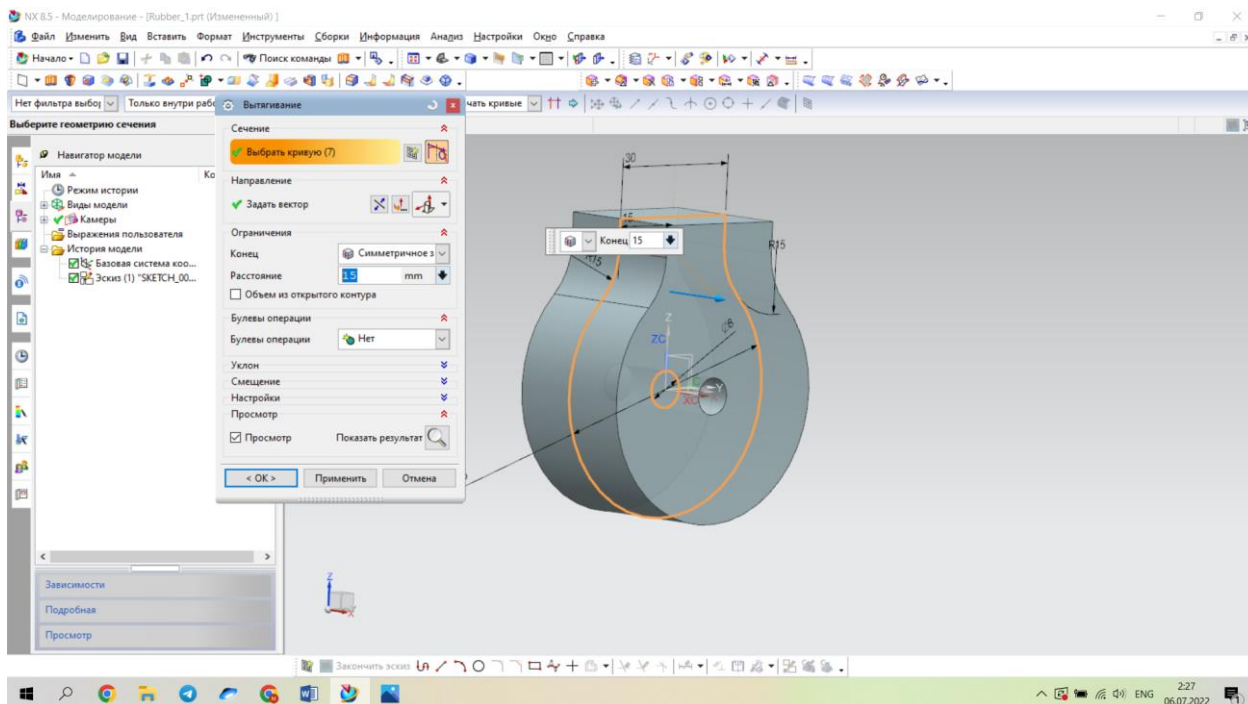


Рисунок 16 – Эскиз буфера

Построение резиновый буферов для системы выпуска, эскиз буфера, применение опцией вытягивания. Скругление кромок буфера радиусом рисунок17.

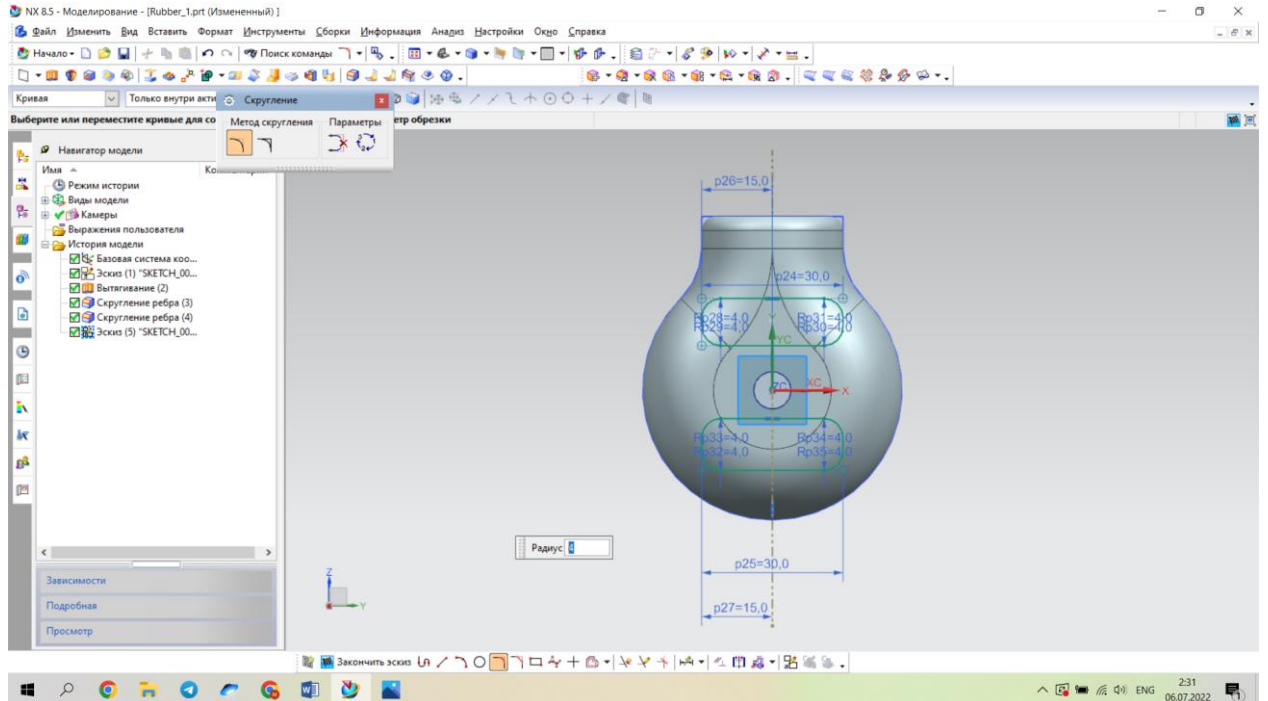


Рисунок 17 – Эскиз отверстий в буфере

Эскиз и протягивание отверстий с опцией вычитания рисунок 18.

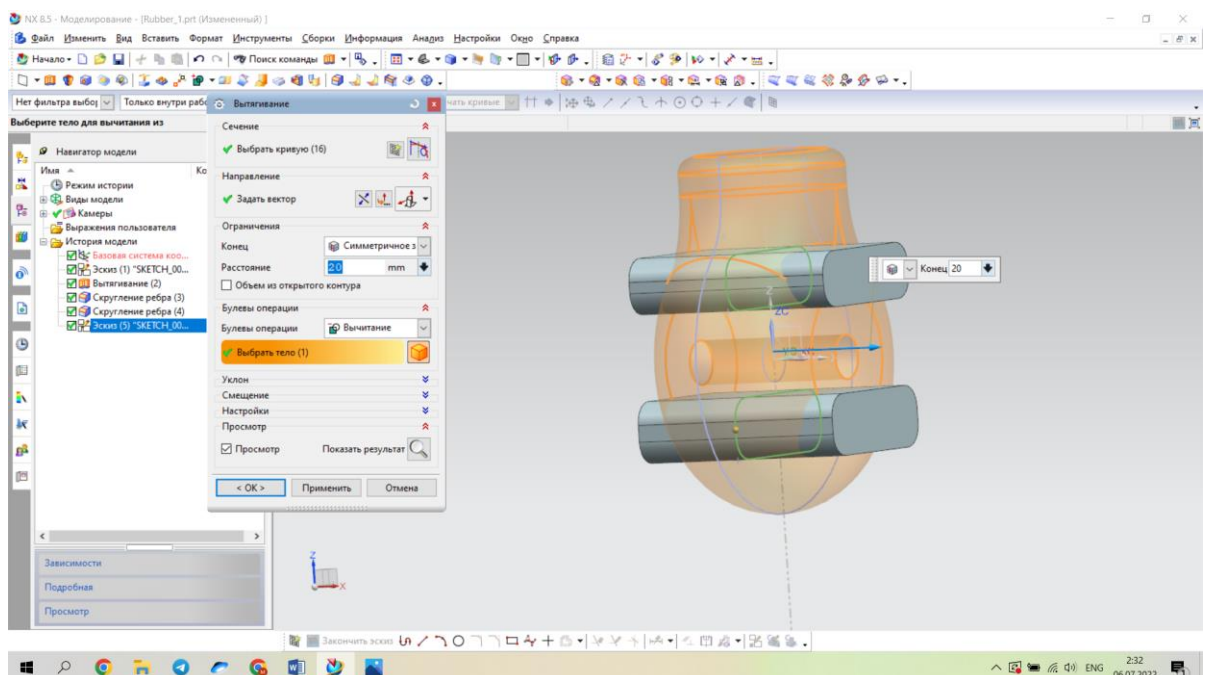


Рисунок 18 – Вычитание отверстий из тела буфера

Построение фасок в резиновом элементе радиусом 1 рисунок 19.

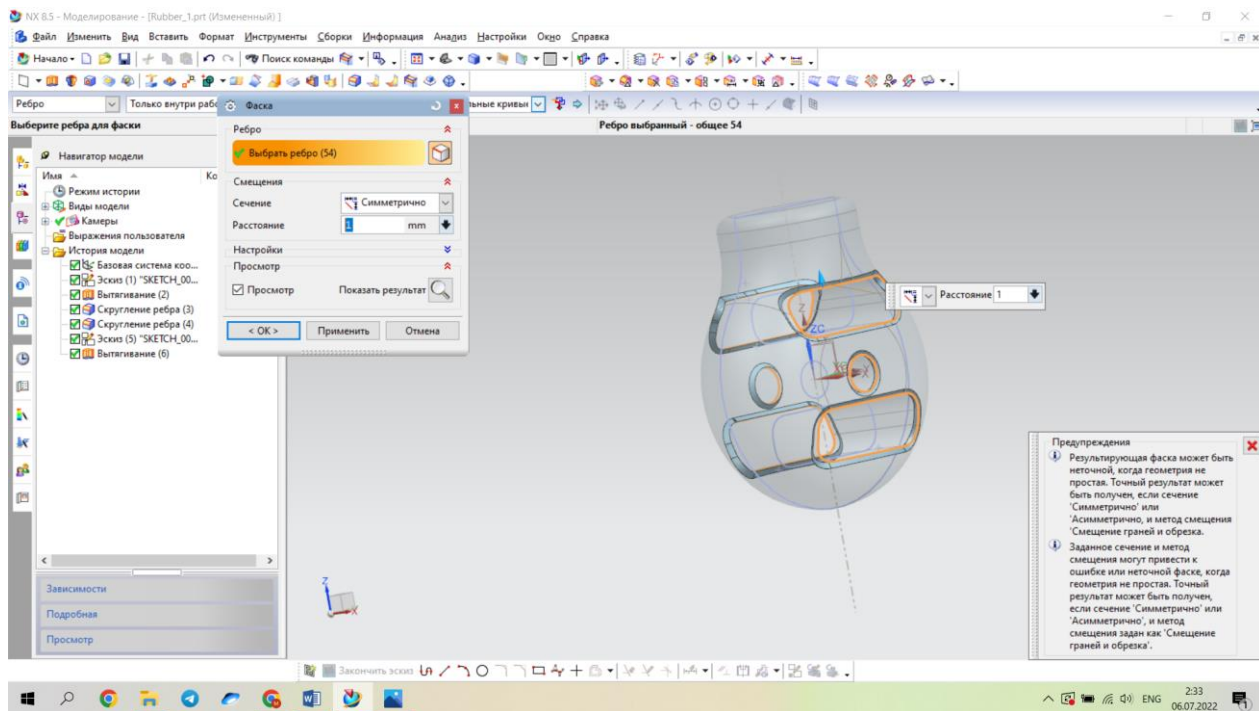


Рисунок 19 – Построение фасок

Финальный вид резинового буфера системы выпуска отработавших газов рисунок 20.

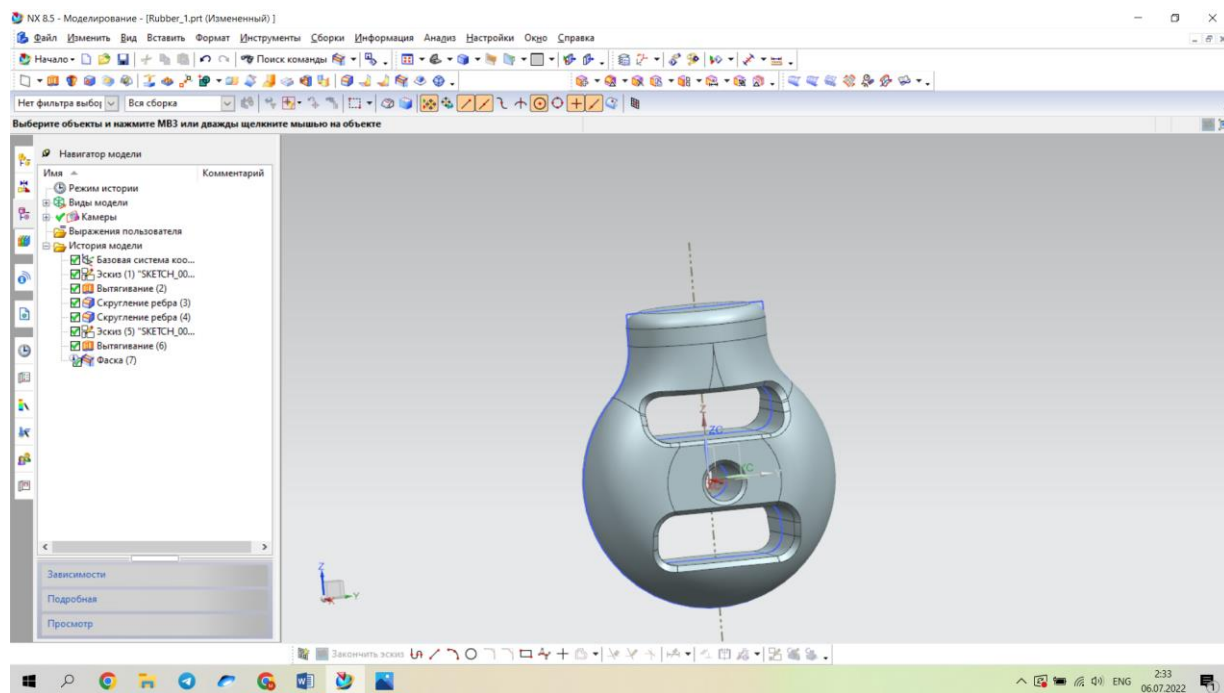


Рисунок 20 – Резиновый буфер

Резиновые буфера в системе выпуска отработавших газов играют важную роль в поддержании определенного уровня вибраций и шума, ограничении негативного влияния на жесткие детали, компенсации температурного расширения и уменьшении риска повреждения всего системы выхлопа.

Эти буферы устанавливаются в качестве гибких соединений между различными компонентами выпускной системы, такими как глушители, катализаторы и трубы. Они способны поглощать часть вибраций, производимых двигателем и трансмиссией, и предотвращать передачу этих вибраций на другие детали. Таким образом, они могут сократить количество шума, задающегося внутри кузова автомобиля и окружающего его.

Помимо этого, благодаря своей эластичности, резиновые буфера могут компенсировать температурное расширение и уменьшить возможность повреждения всего сборочного узла, когда температура в системе при работе достигает высоких значений.

Выводы.

1. Определена часть СВОГ для построения электронной модели.
2. Выбраны методы параметрического моделирования в системе CAD на основе координатных плоскостей, эскизов и операций кинематического замещения, булевых операций, операций скругления, обрезки и создания фасок
3. Разработаны электронные модели корпуса глушителя, двух кронштейнов и резиновых буферов

3 Инженерный анализ прочности системы выпуска отработавших газов в САПР

3.1 Построение сетки и выбор материала для расчёта

Для расчёта необходимо отделить от модели глушителя кронштейн рисунок 21.

Создадим файл электронной модели кронштейна рисунок 22.

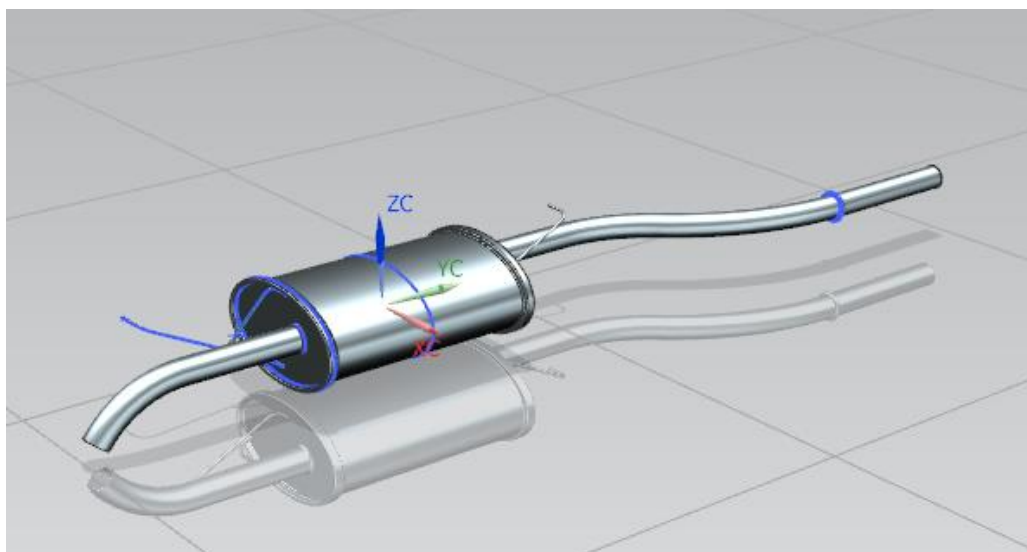


Рисунок 21 – Модель основного глушителя системы выпуска

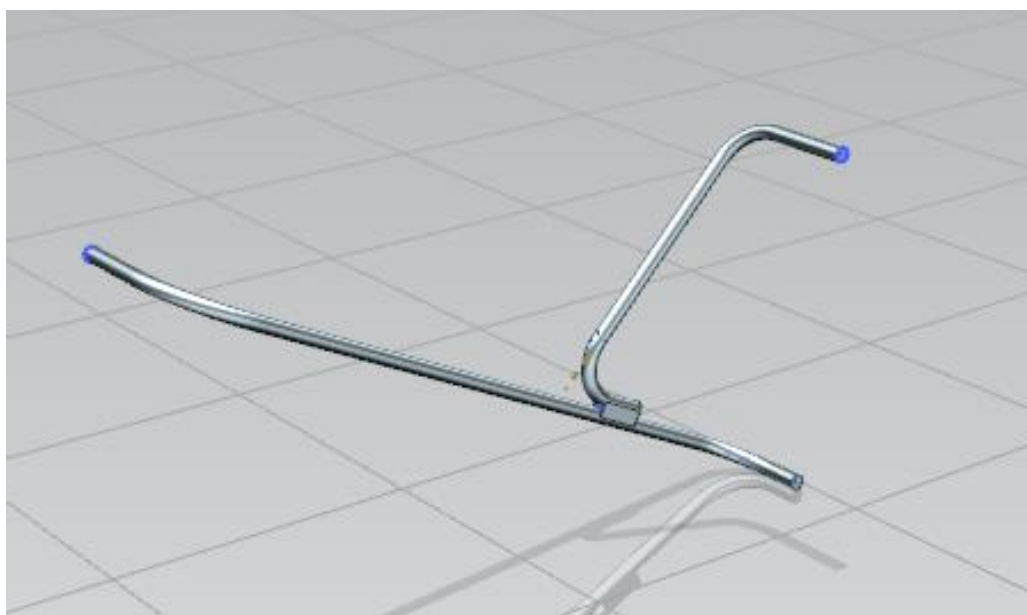


Рисунок 22 – Модель кронштейна для расчёта

Сборка резинового элемента и кронштейна рисунок 23.



Рисунок 23 – Кронштейн вместе с резиновым буфером

Добавим в сборку резиновый буфер, а также укажем места сварки к глушителю рисунок 24. С помощью опции разделить тело, отделить места сварки для задания других свойств материала. Разделим область соприкасающуюся с резиновым элементом для правильного соединения КЭ сетки резинового элемента и кронштейна.

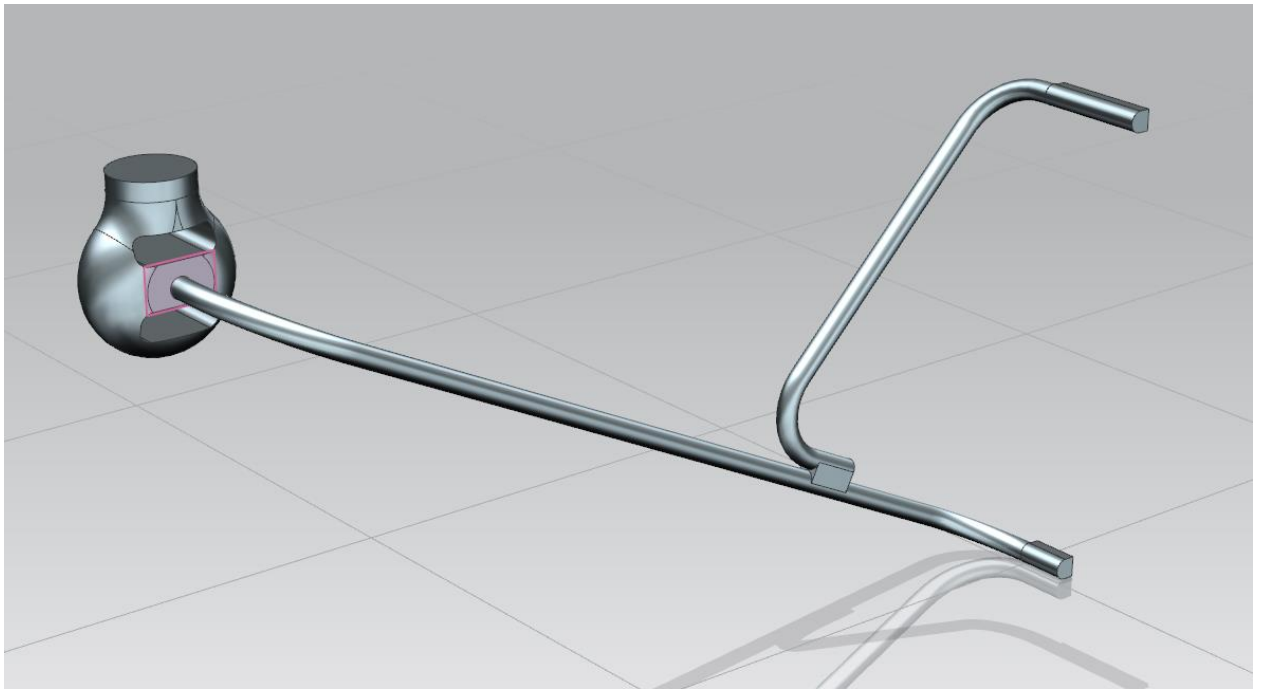


Рисунок 24 – Модель кронштейна с местами сварки и резиновым буфером

Для запуска новой симуляции в NX 12.0 необходимо выполнить следующие опции:

1. Выбрать тип симуляции: статическая, динамическая, термическая, модальная, метод конечных элементов (FEM) или метод конечных объемов (FVM).
2. Выбрать материалы и свойства, которые будут использоваться в симуляции.
3. Создать геометрию детали или импортировать геометрию из других файлов.
4. Установить граничные условия, например, задать значения температуры, давления или прочности.
5. Выбрать типы нагрузок, например, механические или термические нагрузки.
6. Установить параметры симуляции, например, время шага, максимальное число итераций и точность решения.
7. Запустить симуляцию на расчет.

Первым шагом при настройке новой симуляции в NX 12.0 является выбор типа симуляции. Это позволяет определить, какие компоненты программы и параметры будут использоваться для решения определенной задачи. Например, если вы хотите решить задачу прочности, нужно выбрать тип статической симуляции. Для анализа динамических процессов выбирают динамические симуляции, а для анализа теплообмена - термодинамические симуляции.

В программе NX доступны следующие типы симуляций:

1. Статическая симуляция (Static Analysis)

Статическая симуляция используется для определения напряжений, деформаций и прогибов в состоянии равновесия. Она предназначена для анализа статических сил и нагрузок, действующих на деталь.

2. Динамическая симуляция (Dynamic Analysis)

С помощью динамической симуляции можно анализировать поведение системы под воздействием изменяющихся во времени нагрузок. Это может быть, например, рассмотрение изменения динамических нагрузок при вибрации или при ударных нагрузках.

3. Термодинамическая симуляция (Thermal Analysis)

Термодинамическая симуляция позволяет оценить температурное поведение деталей и конструкций при воздействии различных факторов, таких как тепловые источники, теплообмен со средой, тепловые потери.

4. Модальная симуляция (Modal Analysis)

Модальная симуляция позволяет исследовать низкочастотные моды колебаний системы. Она используется для определения собственных частот колебания детали, а также для оценки ее жесткости и демпфирования.

5. Сопротивление материалов (Engineering Stress Analysis)

Сопротивление материалов - это классический анализ напряжений в материале, используемый для оценки его прочности и изучения допустимости его использования в различных условиях эксплуатации.

6. Метод конечных элементов (FEM) (Finite Element Analysis)

Метод конечных элементов - это универсальный метод анализа, который используется для решения широкого спектра задач по механике, геометрии, электродинамике. Данный метод позволяет получить более точные решения, чем классические методы.

7. Метод конечных объемов (FVM) (Finite Volume Method)

Метод конечных объемов - это численный метод, используемый для решения систем уравнений, описывающих физические процессы. Он применяется для анализа термодинамики, гидродинамики, газовой динамики, аэродинамики и других областей.

Создание сетки КЭ. Переходим в режим расширенной симуляции рисунок 25.

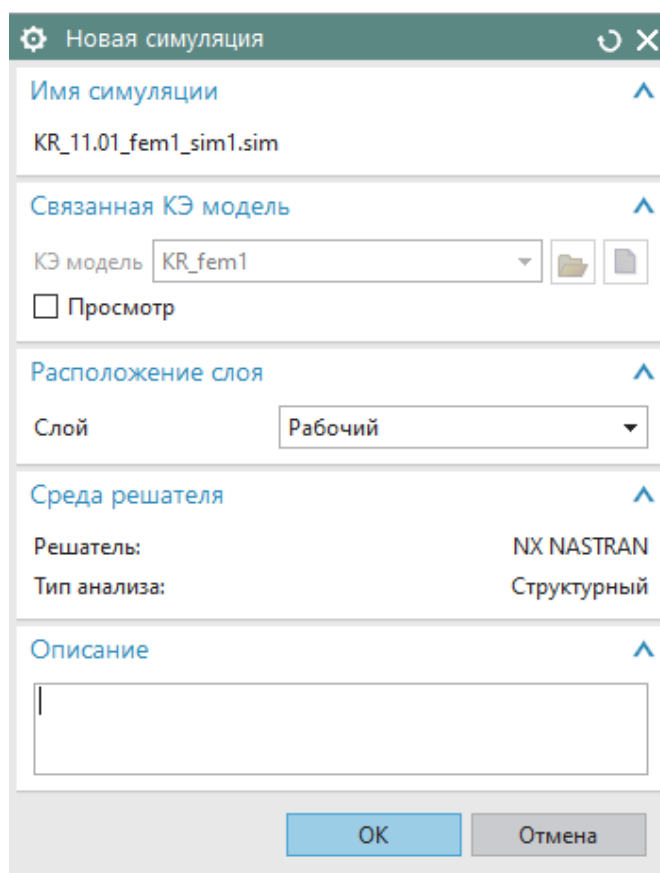


Рисунок 25 – Окно настройки симуляции

Построение сетки конечных элементов.

В NX 12.0 существует несколько видов конечно-элементных сеток, которые могут быть использованы в различных симуляционных задачах. Рассмотрим некоторые из них:

Тетраэдральные сетки (Tetrahedral Meshes)

Тетраэдральные сетки - это наиболее простой и наиболее универсальный тип сеток, который может быть использован для моделирования трехмерных объектов. Они создаются путем разбиения объема объекта на небольшие тетраэдры.

Гексаэдральные сетки (Hexahedral Meshes)

Гексаэдральные сетки - это более сложные сетки, которые состоят из шестиугольников и кубов. Они используются для анализа прочности конструкций, где точность является ключевым фактором.

Призматические сетки (Prismatic Meshes)

Призматические сетки - это сетки, которые состоят из прямоугольных призм (призм с прямоугольным основанием). Они используются в анализе течения жидкости и газа, или где нужно высокое разрешение вдоль определенных направлений.

Пирамидальные сетки (Pyramidal Meshes)

Пирамидальные сетки - это комбинация тетраэдров и призматических элементов. Они могут быть использованы для моделирования сложных геометрических форм.

Каждый из этих типов конечно-элементных сеток имеет свои преимущества и недостатки, а также может быть применен для решения конкретных задач моделирования.

Тетраэдральные сетки наиболее универсальный вид сетки. Лучше всего подходит для моделирования сложных трехмерных объектов. Они используются для сложной геометрии и для моделирования процессов с большими деформациями и повреждениями.

Недостатки сеток конечных элементов из тетраэдров:

- маленькие тетраэдры могут привести к неточности,

- сетки могут иметь большое число элементов.

Гексаэдральные сетки

Преимущества сеток конечных элементов из гексаэдров:

- наиболее точная форма элемента,
- большая точность в расчетах конечного элемента,
- особенно полезен для расчета напряжений при работе с жесткими

материалами.

Минусы:

- не подходят для моделирования сложных форм,
- затрудняют строительство сложной геометрии.

Призматические сетки

Плюсы:

- более точны, чем тетраэдральные сетки,
- имеют относительно небольшое количество элементов,
- подходят для анализа гидродинамики и теплообмена.

Минусы:

- не подходят для сложной геометрии,
- сетки могут быть затруднены при формировании.

Пирамидальные сетки

Плюсы:

- подходят для моделирования сложных форм.
- имеют относительно небольшое количество элементов.
- используется для моделирования для технологических процессов.

Минусы:

- не так точны, как гексаэдральные сетки,
- могут иметь проблемы с формированием в определенных

геометриях,

– конечный выбор типа сетки зависит от конкретной задачи, которая требует решения.

У каждого из видов сеток есть свои плюсы и минусы, и могут быть использованы в зависимости от того, какая точность и скорость требуются в расчетах.

Используем 3D тетраэдральную сетку для кронштейна, размер конечного элемента 3 мм рисунок 26.

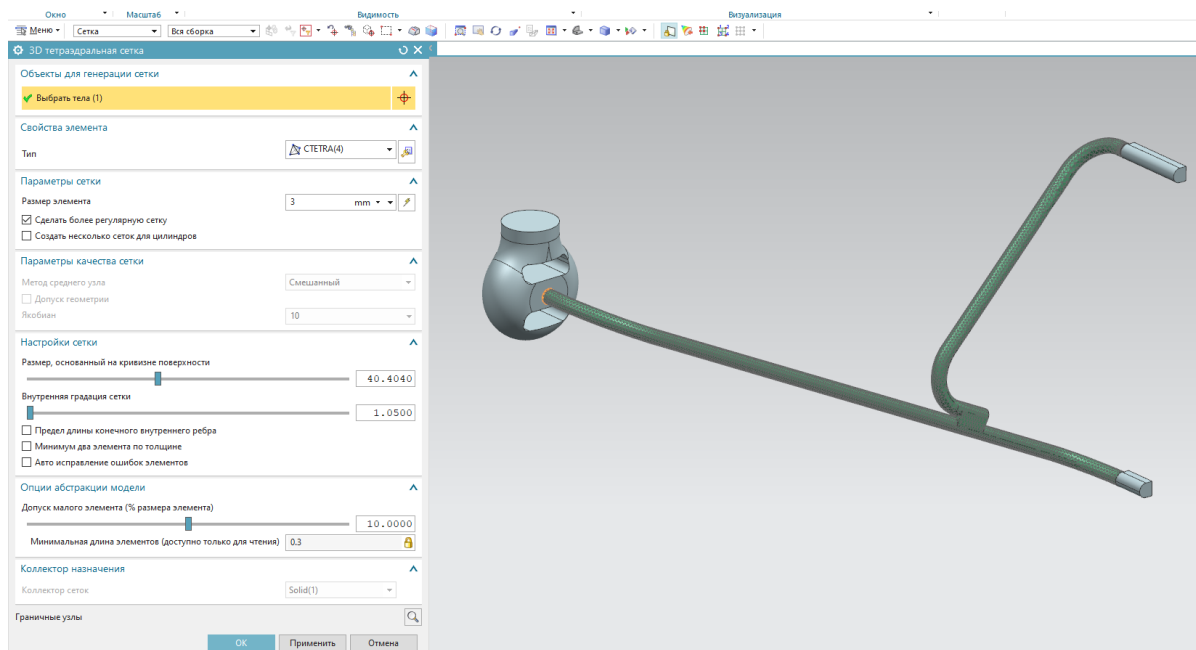


Рисунок 26 – Построение сетки для кронштейна

Построение конечно элементной сетки на резиновый элемент рисунок 27 и для мест контакта со сваркой рисунок 28.

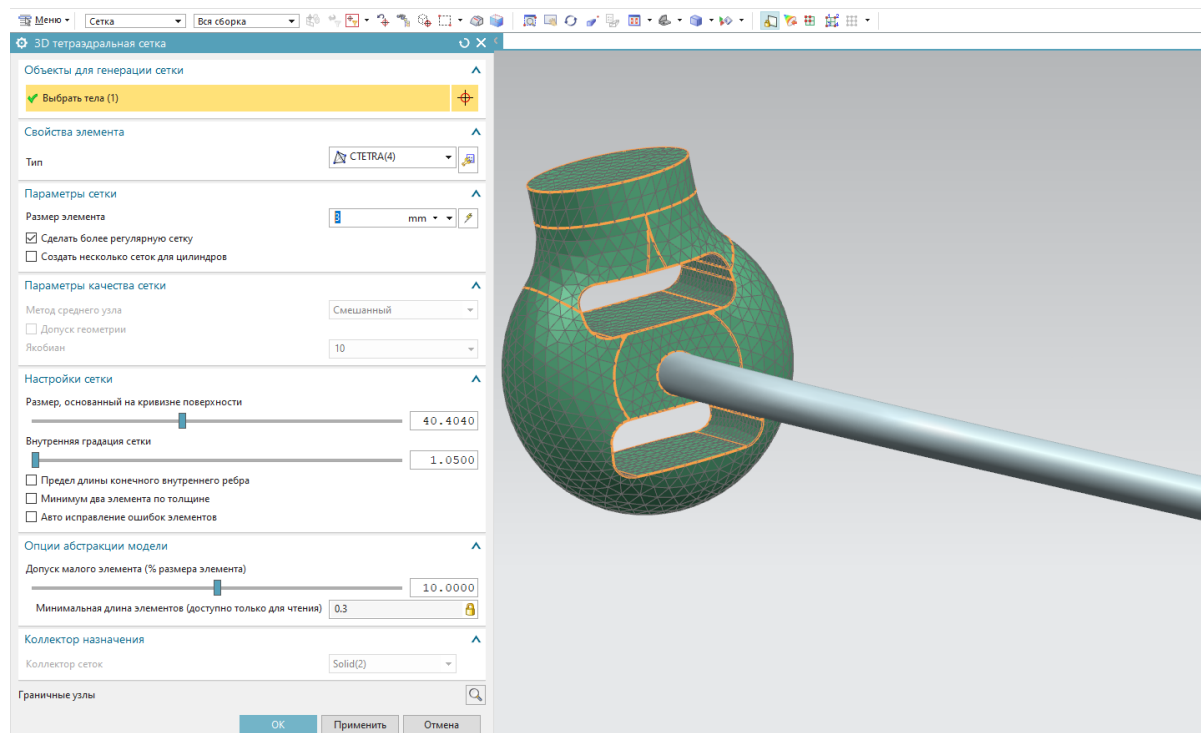


Рисунок 27 – Построение сетки для резинового элемента

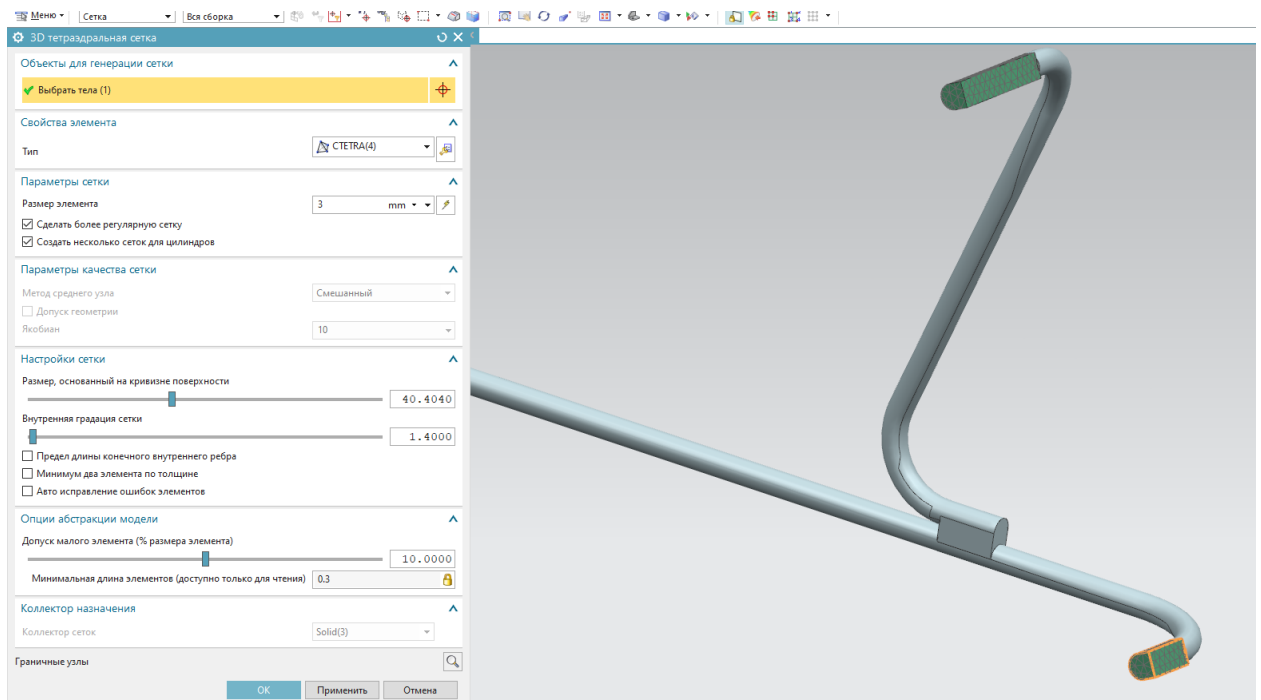


Рисунок 28 – Построение сетки для места сварки

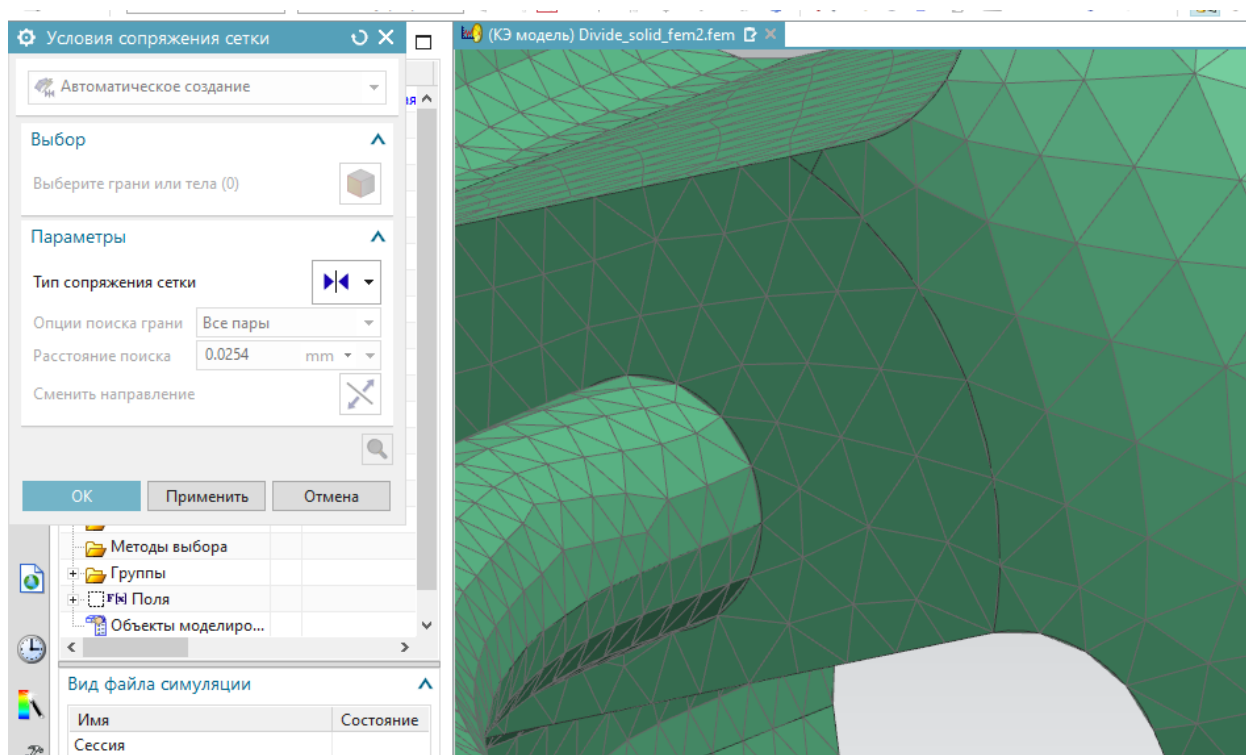


Рисунок 29 – Сопряжение сеток

Проверка соединения сеток с помощью опции сопряжение сетки рисунок 29.

Опция сопряжение сетки (Mesh Convergence) в NX 12.0 - это процесс, который позволяет определить оптимальный размер элементов сетки для достижения наилучших результатов симуляции. Для этого производится расчет с разными размерами элементов сетки и выбирается тот, который дает наиболее точные результаты. Данный процесс называется "сопряжением" поскольку он связывает изменения сетки с изменениями результатов симуляции.

Сопряжения сетки может быть выполнена с помощью следующих шагов:

1. Сформировать первоначальную сетку на модели.
2. Выбрать опцию "Mesh Convergence" из меню "Simulate" в Nx pre/post менеджере.
3. Задать параметры для сопряжения сетки, такие как максимальное количество итераций, допустимая разница между результатами и т.д.

4. Запустить процесс сопряжения сетки.

5. После завершения процесса, полученная сетка будет оптимизирована и использована для расчета наилучших результатов симуляции.

Опция сопряжения сетки позволяет улучшить точность и скорость расчетов, тем самым, сокращая время, которое необходимо для проведения симуляций.

Контроль проверки качества сетки (Mesh Convergence) предлагает три типа проверок:

1. Radius Ratio (отношение радиуса)- этот наиболее распространенный метод контроля сетки. Он основан на пространственном отношении между радиусом вписанной и описанной сфер вокруг каждого элемента сетки. Этот метод может быть полезен, если симуляция включает в себя поверхностные явления, такие как движение жидкости или газа.

2. Maximum Angle (максимальный угол) - этот метод контроля качества определяет наименьший допустимый угол между двумя элементами сетки. Этот метод может быть полезен, если ваша модель содержит острые углы.

3. Mean Ratio (среднее отношение) - этот метод контроля основан не на геометрических параметрах, а на математическом анализе решения. Он определяет, как элементы сетки взаимодействуют друг с другом. Этот метод может быть полезен, если требуется сосредоточиться на расчетах стрессов и напряжений в материалах.

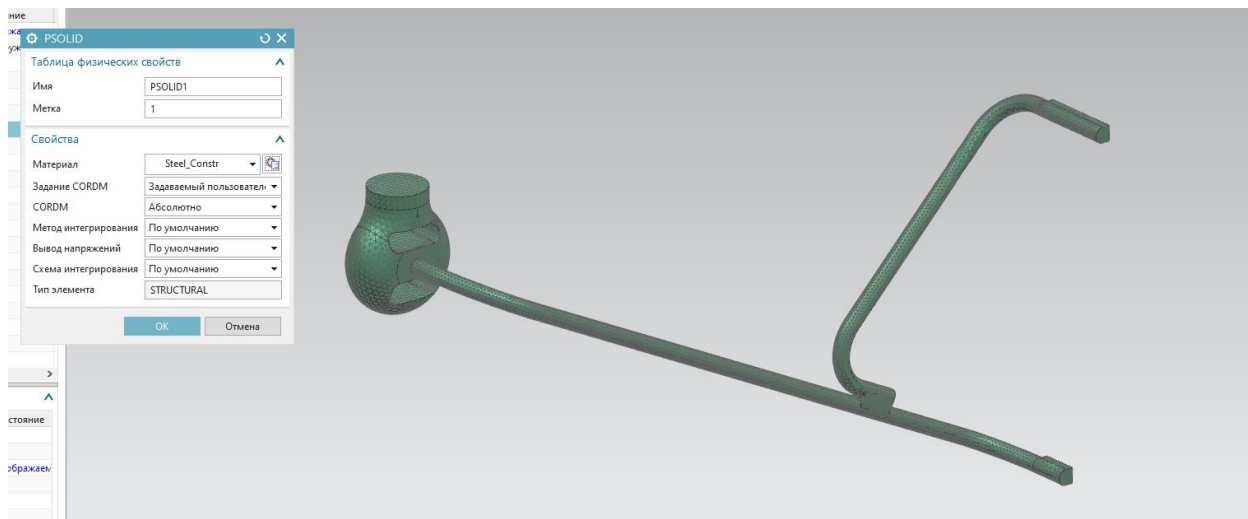


Рисунок 30 – Выбор материала для буфера

Выбор материала для кронштейна материала для металлического кронштейна и резинового буфера рисунок 30.

Для кронштейна я буду использовать конструкционную сталь см. Таблицу 1.

Таблица 1- Параметры материала для кронштейна

Плотность	7.85e-006 кг мм ⁻³
Коэффициент теплового расширения	1.2e-005 C ⁻¹
Удельная теплоёмкость	4,34e+005 мДж кг ⁻¹ C ⁻¹
Теплопроводность	6.05e-002 Вт мм ⁻¹ C ⁻¹
Удельное сопротивление	1.7e-004 Ом мм
Предел текучести при сжатии МПа	250
Предел текучести при сжатии, Мпа	250
Предел прочности при растяжении МПа	460

Для части кронштейна, контактирующей со сваркой механические свойства материала задаться на 20% ниже.

Для резинового элемента задам новый материал этилен пропиленовая смесь 7-57-7018

Основные свойства этилен пропиленовая смесь 7-57-7018:

- 1) плотность, кг/м³ 1200,
- 2) модуль упругости, МПа 10,
- 3) коэффициент Пуассона 0,49,

- 4) Тв. по Шор А 60,
- 5) условная прочность 11.8 Мпа
- 6) диапазон работы - 50 до +125 °С

3.2 Анализ расчета прочности кронштейна крепления выхлопной системы в МКЭ с учетом поля температур

3.2.1 Статический анализ кронштейна СВОГ

В режиме симуляции необходимо выбрать SOL 101 линейный решатель для определения статической прочности сборки. SOL 101 является линейным решателем, который используется для определения статической прочности сборки. Он является одним из модулей программного обеспечения MSC Nastran, который широко используется для численного анализа напряжений, дискретных элементов и других инженерных расчетов.

Решатель работает на основе метода конечных элементов (МКЭ) и позволяет производить расчеты и контролировать достаточность прочности и жесткости конструкции при механических нагрузках. Линейная модель используется для приближения реального поведения конструкции с помощью линейных законов деформирования и упругости.

SOL 101 позволяет моделировать различные виды нагрузок и граничных условий, такие как силы, моменты, ограничения на перемещение и другие факторы. Он также может проводить расчеты на прочность, например, на основе критерия фон Мизеса.

Использование SOL 101 позволяет инженерам проверить прочность сборки на ранней стадии проектирования, определить рациональные размеры, увеличить надежность и продлить срок службы конструкции.

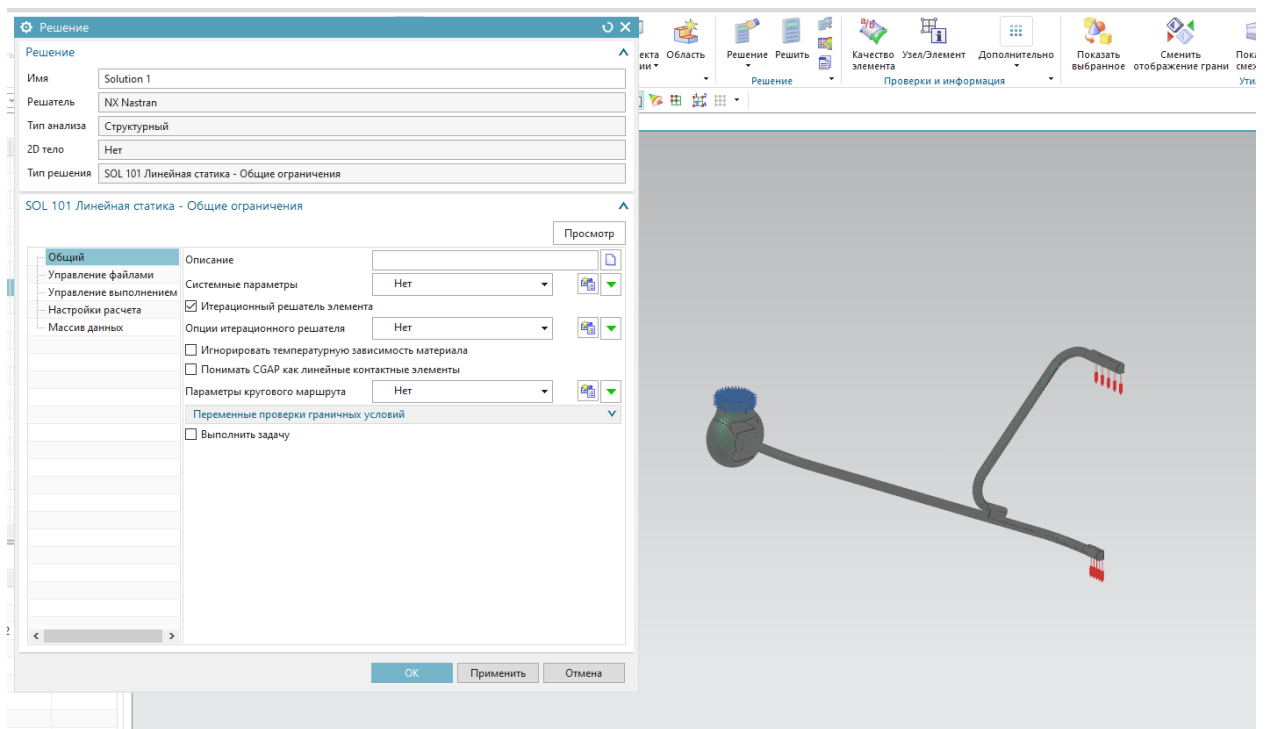


Рисунок 31 – Задание нагрузок и ограничений для статического анализа

Нагрузка прилагается к части, привариваемой к резонатору рисунок 31. Нагрузка 75Н к каждой части кронштейна, направление нагрузки ось -ZC. Запускаем решение.

В качестве ограничения задается заделка по верхней части резинового элемента,

При статических расчетах методом конечных элементов с использованием решателя SOL 101 в NX (ранее известном как Nastran) могут быть получены следующие результаты:

1. Распределение напряжений: SOL 101 позволяет рассчитать распределение напряжений внутри изучаемой детали или сборки деталей при действии внешних нагрузок. Напряжения могут быть рассчитаны как линейные или нелинейные в зависимости от вида нагрузок.

2. Устойчивость детали: NX SOL 101 позволяет оценить устойчивость детали при действии нагрузок на нее. То есть определить, насколько деталь способна сохранять свою форму, не деформируясь или не рушась.

3. Деформации: NX SOL 101 позволяют рассчитать деформации детали при действии нагрузок на нее. Учитываются и линейные, и нелинейные деформации.

4. Напряжения и деформации, полученные при использовании SOL 101, могут быть использованы для определения коэффициентов запаса, что позволяет инженерам оценить, насколько деталь безопасна и выдержит ли она реальные условия эксплуатации.

5. Рекомендации по оптимизации конструкции: NX SOL 101 может использоваться для оптимизации деталей конструкции, чтобы повысить ее прочность и устойчивость, уменьшить напряжение, снизить деформации и т.д.

6. Оценка работоспособности: SOL 101 дает возможность инженерам оценить работоспособность сборок деталей при действии внешних нагрузок. Это позволяет определить, насколько долговечны будут конструкции в эксплуатации, а также понять, где могут произойти наибольшие проблемы в работе деталей.

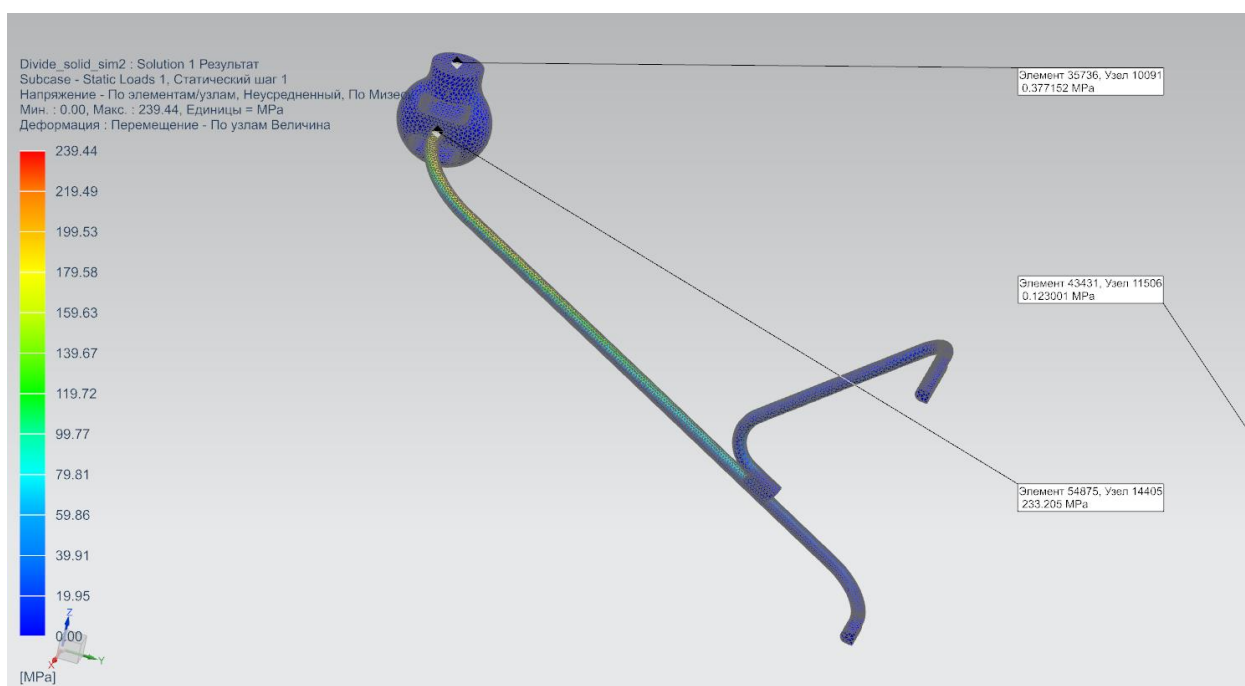


Рисунок 32 – Результаты статического расчёта интенсивности напряжений

По результатам расчёта рисунок 32 видно какие напряжения испытывает кронштейн при заданных условия. Для конструкционной стали предел текучести равен 250 МПа. Условный предел прочности для резинового буфера 11.5 МПа. По результатам расчёта видно, что металлический кронштейн испытывает максимальное напряжение в 239 МПа, что является ниже предела текучести конструкционной стали. Резиновый элемент испытывает не более 1МПа, а это ниже 11.5 условного предела прочности.

Вывод: Деталь имеет достаточную статическую прочность при данных условиях нагружения.

3.2.1 Анализ теплопередачи кронштейна системы выпуска

Для решения задачи теплопередачи используем решатель SOL 153 Нелинейная теплопередача в стационарном режиме.

Решатель теплопередачи в NX (Thermal Solver in NX) является решателем метода конечных элементов, используемым для моделирования и анализа теплопередачи в различных материалах и конструкциях с учетом изменений температуры.

Он использует уравнения теплопроводности и уравнения тепломассообмена для определения равновесной температуры в статических условиях и распределения температуры в динамических условиях.

Решатель теплопередачи в NX имеет широкий спектр возможностей и функций, которые могут быть использованы для моделирования различных сценариев теплопередачи, таких как:

- охлаждение электронных устройств, приборов и компонентов,
- проведение тепла через материалы с различными тепловыми характеристиками,
- расчет потерь жидкости или газа, движущихся через трубопроводы или каналы,
- расчет переноса тепла через элементы конструкций, таких как стенки, крышки и т.д.

В результате, данный решатель может дать ответы на ряд вопросов в технике и проектировании, связанных с тепловым расчетом и теплопередачей, например, определение максимальной температуры элементов конструкции при работе в условиях повышенной температуры, определение эффективности системы охлаждения и тепловых изоляционных материалов, оптимизация конструктивных параметров на основе теплопередачи и т.д.

Через ограничение задаем температуру для привариваемой части 250° С, а также для верхней части резинового элемента 20 ° С. Запускаем решение.

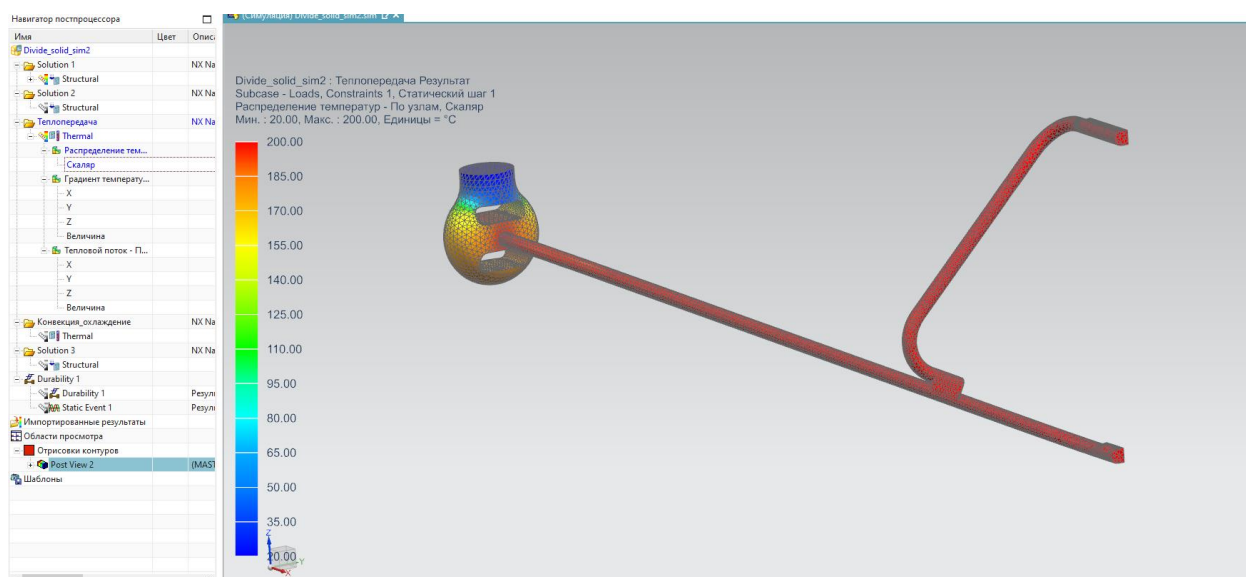


Рисунок 33 – Результаты анализа теплопередачи

Из расчёта следует, что в стационарном режиме за счет теплопередачи металлическая часть кронштейна нагревается до 250 градусов рисунок 33. А температура буфера из эластичного материала может изменяться от 250° С до 20° С. Такая температура резинового буфера недопустима. Однако в реальных условиях следует учитывать охлаждение, которое происходит по внешней поверхности за счет конвекции и теплоизлучения.

3.2.2 Анализ теплопередачи кронштейна системы выпуска с учётом конвекции охлаждения

Конвекция охлаждения - это процесс передачи тепла, при котором тепло от материала передается на более холодное окружающее вещество,

происходит движение жидкости или газа навстречу материалу, забирающее тепло от него и отводящее его в окружающую среду.

В промышленности, конвекция охлаждения используется для снижения температуры оборудования, процессов или материалов, которые нагреваются при работе. Примеры конвекционного охлаждения включают использование вентиляторов или систем охлаждения, таких как системы жидкостного охлаждения, для ускорения передачи тепла от жарких или горячих поверхностей к окружающей среде.

Конвективное охлаждение может быть усилено использованием специализированных материалов с повышенной теплоотдачей, таких как теплоотводящие пасты, теплоотводящие материалы или радиаторы.

В основе конвективного охлаждения лежит принцип натуральной конвекции и принцип принудительной конвекции. Натуральная конвекция возникает, когда горячий материал нагревает окружающий воздух, который затем поднимается вверх и уходит, забирая с собой тепло. Принудительная конвекция возникает благодаря движению жидкости или газа, создаваемому внешними силами, такими как вентиляторы или насосы, которые "принуждают" воздух двигаться и переносить тепло.

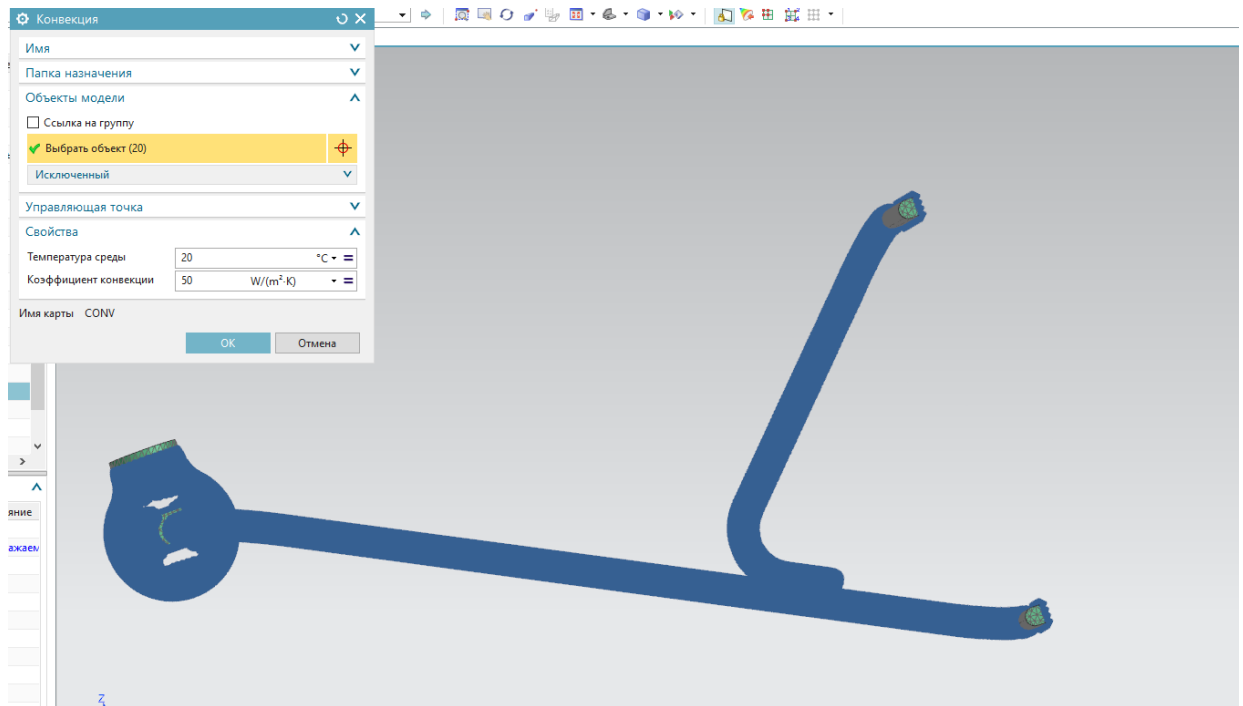


Рисунок 34 – Задание ограничений для задачи теплопроводности с учётом конвекции охлаждения

Для решения задачи конвекции охлаждения используем решатель SOL 153 Нелинейная теплопередача в стационарном режиме рисунок 34. Задаем ограничение для привариваемой части $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. С помощью опции задаем конвекцию кронштейна и резинового элемента, Температура среды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент конвекции $6\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Запускаем решение.

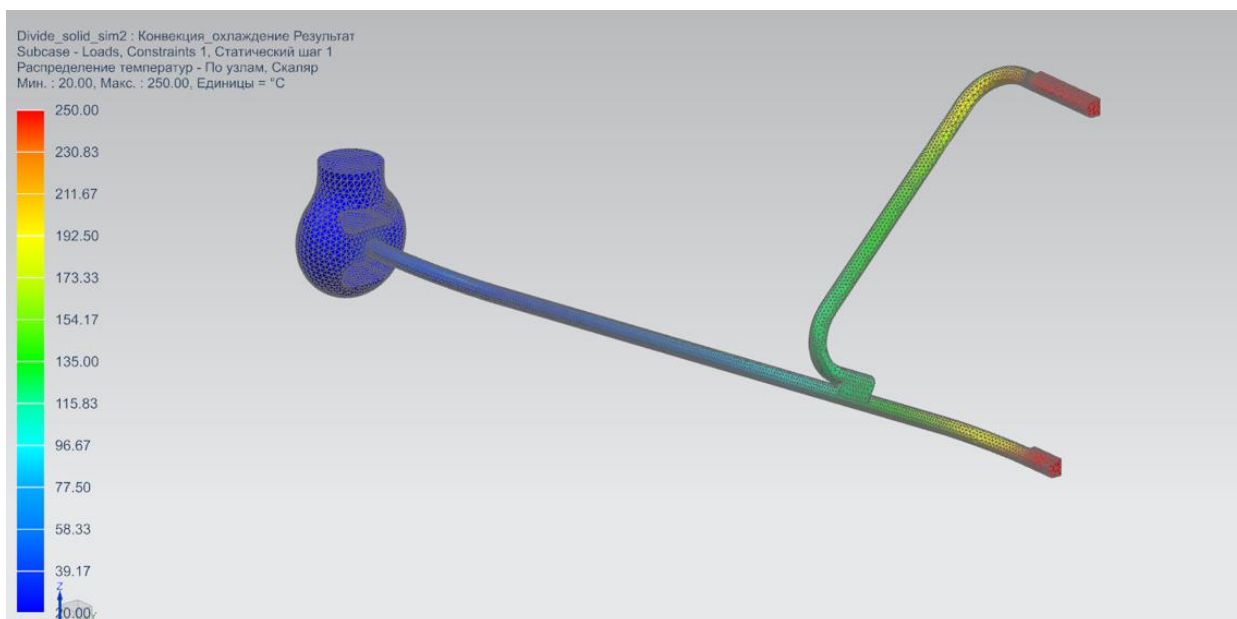


Рисунок 34 – Задание ограничений для задачи теплопроводности с учётом конвекции охлаждения

По результатам расчёта на рисунке 34 видно, что резина, при заданных

с Выводы

л 1. Установлено, что максимальное значение интенсивности напряжений при статической нагрузке $P=150$ Н расположено в области, примыкающей к эластичному буферу, и достигает значения 239 Мпа, которое меньше 11,5 МПа величины предела упругости для материала кронштейна.

я 2. Выявлено, что только за счет теплопередачи без учета охлаждения кронштейна температура эластичного буфера может изменяться от 250°C до 20°C

н 3. Показано, что при конвективном охлаждении в состоянии покоя (коэффициент конвекции $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), температура резинового буфера не превышает 50°C , что допустимо при его эксплуатации

р

е

в

а

е

т

с

4 Методика расчета усталостной прочности узлов системы выпуска отработавших газов

4.1 Анализ методов расчёта усталостной прочности

4.1.1 Прогнозирование долговечности

В течение срока службы элементы конструкции будут подвергаться сложным нагрузкам и изменениям напряжений. Прогрессирование изменений нагрузки или напряжений со временем называется спектром нагрузки или спектром напряжений, и это может использоваться для отражения нагрузки, которую испытывает компонент во время его функционирования. Прежде чем проводить анализ усталости, сначала необходимо определить спектр усталостной нагрузки, и точность этого спектра нагрузки повлияет на точность анализа усталости.

Составление спектра нагрузки разделено на три этапа: сбор сигналов нагрузки и их обработка, отбрасывание неподходящих сигналов нагрузки с большими ошибками и окончательное составление спектра нагрузки. Существует два распространенных способа получения сигнала нагрузки. Одним из них является получение сигналов полной нагрузки деталей с помощью измерений, а затем составление спектра усталостной нагрузки после обработки. Этот метод точен, но требует длительного времени. Другой подход заключается в получении истории нагрузок с помощью программного обеспечения для моделирования методом конечных элементов, таких как Simcenter NX, или другого программного обеспечения. Точность спектров нагрузки, полученных этим методом, относительно низкая, но процесс недорогой и требует относительно небольшого количества времени и усилий. Чен и др.[16] использовали датчик нагрузки на стабилизаторе поперечной устойчивости легкового автомобиля для получения сигналов нагрузки и импортировали их в nCode для обработки данных для получения спектра

нагрузки. Хуан [16] составил спектр усталостной нагрузки плоской решетчатой конструкции подвешенного крана, получил историю нагрузки в точке напряжения с помощью Ansys, а затем обработал сигнал нагрузки с использованием метода подсчета дождевых потоков, чтобы получить спектр усталостной нагрузки решетчатой конструкции. Это устранило утомительный процесс получения результатов измерений из экспериментов. Ву использовал ADAMS для получения истории временных напряжений распределительного вала двигателя, а затем импортировал это в nCode для обработки сигнала нагрузки. Затем он использовал анализ усталостных напряжений в nCode для определения усталостной долговечности распределительного вала.

Кривая Веллера S-N.

Кривая S-N материала представляет собой соотношение между напряжением и усталостной долговечностью, которое может быть измерено с помощью испытания на усталость. Полная кривая Sn может быть разделена на зону малоциклового усталости, зону высокоциклового усталости и зону субциклового усталости. Кривую можно получить с использованием стандартных образцов на испытательной машине на усталость, на которой используются различные соотношения напряжений для выполнения циклического нагружения до разрушения образца. В зависимости от количества циклов и максимального напряжения это может быть использовано для построения кривой S-N. Кривые S-N также могут быть получены с помощью расчета по формулам или с использованием стандартов материалов.

На рисунке 35 показана типичная кривая S-N, на которой область слева от N_1 является областью малоциклового усталости. Малоциклового усталость - это обычно усталость, возникающая в течение 10^2 - 10^5 циклов; она приводит к пластическим деформациям, поэтому ее обычно описывают деформацией. Между N_1 и N_2 находится зона усталости с высоким циклом. Как правило, нагрузка более 10^5 циклов называется усталостью с высоким циклом и обычно описывается напряжением. За N_2 находится зона предела усталости, где

материал не будет поврежден, независимо от количества циклов. Принцип проектирования с бесконечным сроком службы заключается в том, чтобы гарантировать, что напряжение всегда будет меньше предела усталости S_f , и теоретически детали не будут повреждены; таким образом, их срок службы можно назвать бесконечным.

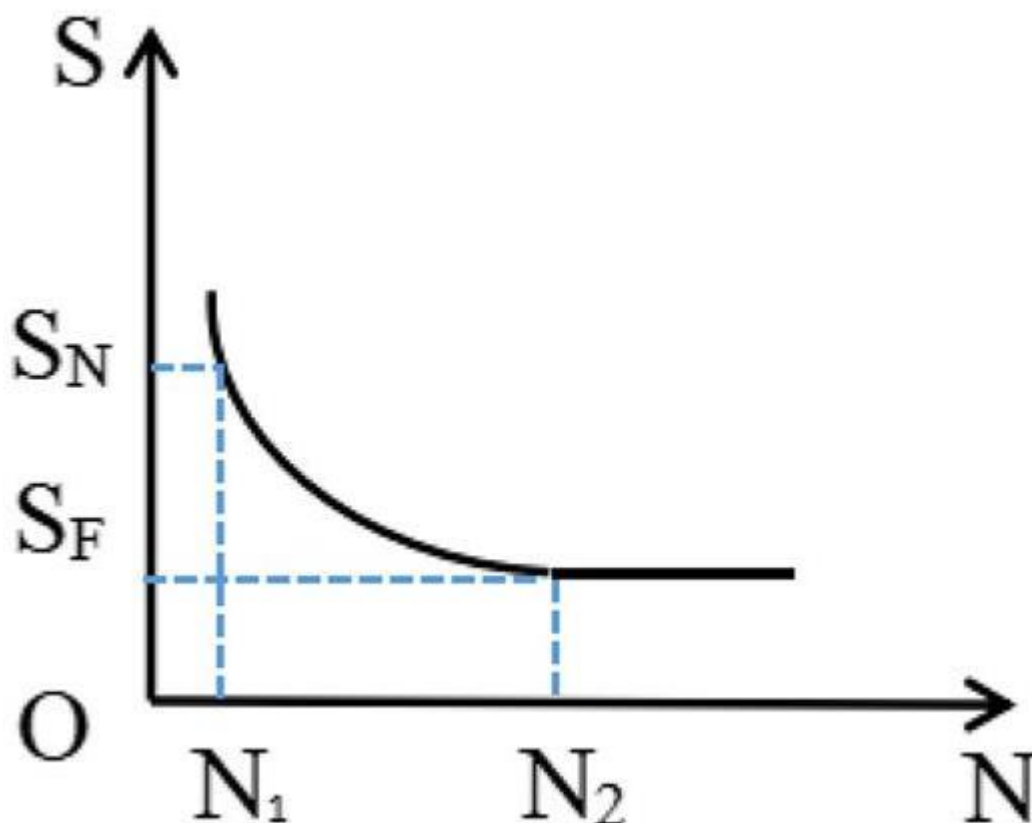


Рисунок 35 – Пример S-N кривой материала. Точки S_n и S_f характеризуют разрушающее напряжение для количества циклов N_1 и N_2

Нелинейная математическая модель S-N кривой использовалась для расчета S-N кривых компонентов; параметры этой нелинейной модели были определены с использованием данных усталостных испытаний, чтобы можно было построить соответствующую S-N кривую. При анализе усталости профилированного ролика Чен и др. провели испытания на усталость, добавили циклические нагрузки в различных диапазонах напряжений, получили количество циклов до разрушения и создали кривую S-N материала.

Кривая S-N может быть выражена в виде степенной функции вида

$$SmN = C, \quad (4.1)$$

где m и C - параметры, относящиеся к материалу, образцу и коэффициенту напряжений. Вычисление логарифма с обеих сторон дает:

$$\lg S = A + BN, \lg S = A + BlgN, \quad (4.2)$$

который показывает, что зависимость между нагрузкой и сроком службы представлена в логарифмических координатах. В экспоненциальной форме можно записать как:

$$e^{msN} = C, \quad (4.3)$$

После логарифмирования:

$$S = A + BlgN, \quad (4.4)$$

Где A и B - параметры материала.

Трехпараметрическая формула выражается в виде:

$$(S - Sf)mN = C, \quad (4.5)$$

Где m и C - параметры материала.

4.1.2 Теория накопления линейных усталостных повреждений

Теория линейного кумулятивного повреждения шахтера обычно применяется для оценки усталостных повреждений. Майнер предположил, что циклические нагрузки одинаковой амплитуды и циклические нагрузки переменной амплитуды будут вызывать различные повреждения материалов. В случае постоянной амплитуды каждый цикл будет вызывать одинаковые повреждения; в случае переменной амплитуды каждый цикл будет вызывать относительно независимые повреждения [24].

Конкретные теоретические формулы для этой теории следующие. Повреждение, причиняемое N равными циклами, составляет:

$$D = nN, \quad (6)$$

где N - усталостный ресурс при определенной нагрузке.

Повреждение, причиняемое n типами циклов с изменяющейся амплитудой, составляет:

$$D = \sum ni = 11Ni, \quad (7)$$

где N_i - усталостный ресурс под нагрузкой i .

Теорема Майнера проста по форме и легка для понимания, но у нее есть некоторые недостатки. Например, в нем не учитывается последовательность нагружения, и при разных уровнях нагружения будут небольшие различия в величине накопления повреждений. Поэтому некоторые исследователи предложили нелинейные подходы к накоплению усталостных повреждений. Например: теория Марко-Старки[25] получает нелинейный кумулятивный ущерб на основе кривой повреждения; Коммерс и Генри[25] использовали изменение предела усталости в качестве показателя повреждения; а Шабощ[25] применил концепцию повреждения к изучению усталости.

4.1.3 Механизм образования усталостных трещин и факторы, влияющие на усталость металла

Процесс образования усталостных трещин в металлах обычно делится на три стадии: зарождение трещины, ее распространение и окончательное разрушение. Распространение трещин можно разделить на распространение микротрещин и распространение макротрещин. Механизм формирования протекает следующим образом:

1. Возникновение трещин: трещины образуются под действием переменных напряжений, макроскопических дефектов или концентрации напряжений.

2. Распространение микротрещин: после возникновения трещины она будет продолжать расширяться. Сначала это произойдет вдоль плоскости напряжения сдвига под углом 45° к основному напряжению. На данном этапе большинство трещин вскоре перестанут расширяться, в то время как несколько трещин могут расширяться до длины десятков микрометров.

3. Распространение макротрещин: направление распространения макротрещин постепенно станет перпендикулярным главной оси напряжений, и на поверхности усталостной трещины появится микроскопический признак, а именно усталостная кайма. Микроскопическое и макроскопическое

распространение трещин также называют фазами I и II распространения трещин.

4. Окончательное разрушение: когда трещина расширяется до критического размера, при котором деталь больше не может выдерживать требуемую нагрузку, происходит мгновенное разрушение и окончательный отказ.

Многие исследователи провели глубокие и детальные исследования по разработке теории распространения усталости металла. В 1960-х годах Пэрис и Эрдоган предложили важную формулу, а именно формулу Пэрис, которая описывает взаимосвязь между скоростью роста усталостной трещины и коэффициентом интенсивности напряжений. Основная форма этого:

$$da/dN = C(\Delta K)^m, \quad (4.8)$$

где- da/dN - скорость роста трещины;

C и m - параметры материала;

ΔK - амплитуда коэффициента интенсивности напряжений.

Формула Периса может быть выражена в стабильной области кривой роста трещины. Это показано на рисунке 36, на котором скорость роста продольной трещины нанесена на вертикальную ось, а абсцисса представляет собой амплитуду коэффициента интенсивности напряжений. В области 1 имеется пороговое значение усталости; когда коэффициент интенсивности напряжений превышает это пороговое значение, трещина будет продолжать расширяться. В методе расчета усталостной долговечности пороговое значение усталости обычно является условием для проектирования с бесконечным сроком службы. В области 2 трещина распространяется устойчиво, и в этой части применяется формула Пэриса. В начале области 3 трещина вот-вот расширится до критического значения, и деталь вот-вот разрушится.

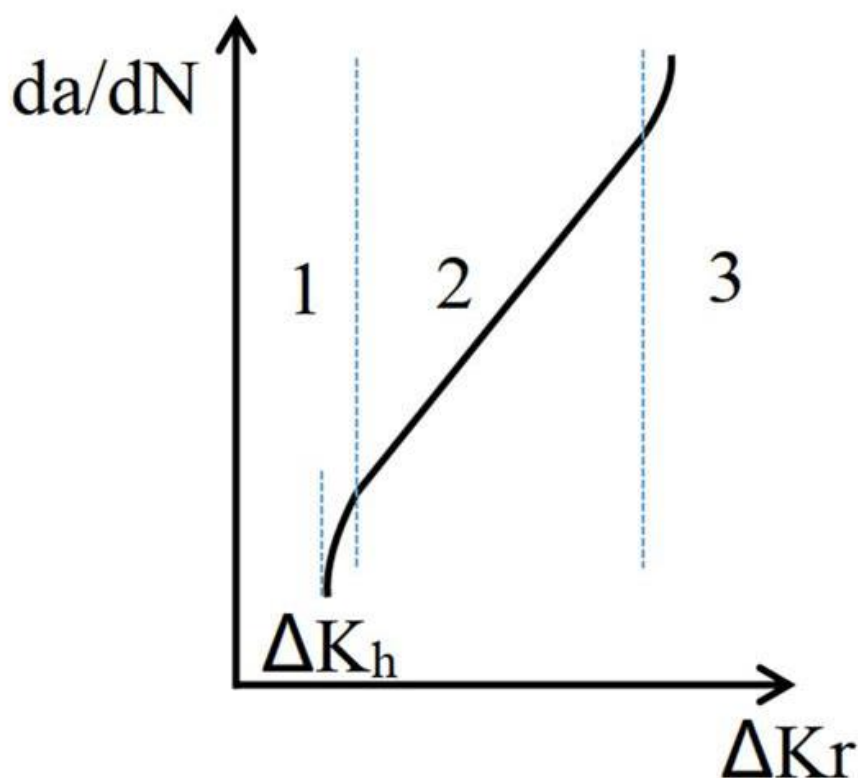


Рисунок 36 – Факторы, влияющие на усталость металла.

Существует множество факторов, влияющих на усталость металлических материалов. Усталость металлических деталей вызвана не каким-то одним фактором, а, как правило, результатом комплексного действия многих факторов. Общими факторами являются следующие.

1. Величина нагрузки

Металлические компоненты подвержены усталости и разрушению, когда напряжение превышает предел усталости из-за перегрузки нециклическими нагрузками или приложения изменяющихся нагрузок в течение длительного периода.

2. Форма и размер элементов изделия

Детали со ступенями, канавками и закругленными углами подвержены явлению концентрации напряжений. При явлении концентрации напряжений локальное напряжение намного превышает номинальное напряжение, и области, в которых сосредоточено напряжение, наиболее подвержены

растрескиванию. Исследования также показали, что чем больше размер детали при одинаковой форме материала, тем ниже ее усталостная прочность; размер деталей также влияет на их усталостную долговечность.

3. Состояние поверхности изделия

Состояние поверхности деталей часто влияет на их усталостную долговечность. Если шероховатость поверхности высока, на поверхности будут периодически появляться небольшие трещины; эти трещины приведут к концентрации напряжений, и они, таким образом, повлияют на усталостную долговечность.

4. Факторы окружающей среды

Суровые условия окружающей среды, такие как высокие или низкие температуры или агрессивные среды, будут влиять на усталостную долговечность. Колебания температуры вызывают расширение и сжатие деталей, что приводит к изменениям их внутренней структуры и влияет на их усталостную прочность.

5. Структура материала

Для того, чтобы деталь обладала хорошими усталостными характеристиками, она должна иметь однородный внутренний состав с точки зрения структуры материала, и в ней не должно быть внутренних дефектов. Если в структуре материала имеются включения неметаллических материалов или дефекты сплошности, это приведет к снижению усталостной прочности детали.

Прогнозирование усталостной долговечности при деформировании в основном используется в случаях малоциклового усталости и больших пластических деформаций. Оценка усталостной долговечности при деформировании основана на кривой деформации материала; анализ напряжений и деформаций в потенциально проблемных местах на детали выполняется с помощью некоторых инженерных методов, а затем усталостные повреждения получают путем циклического подсчета, чтобы получить усталостную долговечность.

Метод анализа усталостной долговечности при деформировании также называют методом анализа локального напряжения-деформации-ресурса, и он был предложен после 1960-х годов. При таком подходе сначала определяется потенциально проблемная область детали, а затем с помощью кривой деформации материала получают спектр напряжений или нагрузок в этой области. Наконец, усталостный ресурс области рассчитывается в соответствии с кривой долговечности при деформации и теорией кумулятивного повреждения. Основное допущение метода локального напряжения-деформации заключается в том, что усталостный ресурс компонентов из одного и того же материала при одинаковой циклической нагрузке будет таким же, как и локальная деформация. Метод локальной деформации позволяет рассчитать усталостную долговечность деталей с надрезами, компенсируя недостатки метода номинальных напряжений. В нем рассматривается влияние пластической деформации на усталостную долговечность, а также взаимные влияния между историей нагрузки, геометрической формой и свойствами материала, и это повышает точность анализа усталостной долговечности. Сюн и др. [26] использовали метод локальных напряжений-деформаций для изучения усталостной долговечности стального троса; они проверили точность подхода для прогнозирования усталостной долговечности путем сравнения с использованием результатов, полученных с помощью метода конечных элементов. Чжан и др. [25] использовали метод локальных напряжений-деформаций для оценки срока службы трещины под краном. Сначала модифицированный метод Нойбера [25] и кривая деформации были использованы для преобразования спектра номинальных напряжений компонента в спектр локальных напряжений и деформаций опасного положения. Метод Нойбера является приближенным методом оценки взаимосвязи между номинальным напряжением и локальными напряжениями и деформациями. Усталостная долговечность была получена на основе кривой долговечности при деформации и теории кумулятивных повреждений.

Методы анализа деформационной усталости включают упругий (с многоцикловой) и упругопластический (малоцикловой) подходы. Существует множество теоретических методов, относящихся к этой области, включая метод расширенного среднего значения, метод быстрого интегрирования с полной вероятностью и метод локальной деформации. Анализ деформационно-усталостных характеристик имеет широкий спектр применений. Нилет и Чен [25] провели анализ деформационно-усталостных характеристик автомобильных стабилизаторов поперечной устойчивости и использовали совместное моделирование HyperMesh, NASTRAN и nCode DesignLife [25] для определения усталостной долговечности деталей. Цяо и др.[26] выполнили много осевой деформационно-усталостный анализ цилиндра компрессора и изучили влияние конструкции цилиндра и силы затяжки болта на его усталостную долговечность. Lietal [24] построил кривую деформации сплава GH3030, используя модель Мэнсона–Коффина и формулу зависимости усталости от деформации, и подтвердил, что усталостная долговечность сплава при 800 °С является самой низкой по сравнению с таковой при 700 °С и 600 °С.

4.1.4 Разработка экспериментов по анализу усталости

Одна из трудностей испытаний на усталость заключается в том, что некоторые параметры усталости трудно получить, и существует мало соответствующих национальных или промышленных стандартов. Это означает, что часто, невозможно провести испытания на усталость, или их результаты могут быть неточными. Поэтому важно сформулировать контрмеры для решения проблем усталостных параметров как можно скорее. Следует проводить больше испытаний методов анализа усталости, и их результаты следует использовать для проверки теоретических и имитационных расчетов для повышения точности анализа усталости. Только при сочетании теоретических расчетов, моделирования и экспериментальной проверки этим методам можно придать больше достоверности, и это будет способствовать развитию технологии. Сао [25] использовал SolidWorks для

построения трехмерной модели, Ansys Workbench для проведения анализа методом конечных элементов и nCode для прогнозирования усталостной долговечности, наконец, выполнив оптимизацию топологии в соответствии с результатами анализа. Было установлено, что результаты соответствуют целям оптимизации. Однако эта работа не включала тесты для проверки того, были ли результаты анализа усталости и оптимизации точными и соответствовали ли они практическому инженерному применению. Аналогичным образом, Liu et al. провели анализ усталости и оптимизацию кронштейна для крепления волынки, но они не проводили испытания на усталость для проверки результатов имитационного анализа.

4.1.5 Усталостная прочность и усталостные свойства

С быстрым развитием современной промышленности многие механические изделия имеют легкие компоненты в качестве производственной цели. Вероятность усталостного разрушения значительно возрастает из-за сложных конструкционных нагрузок. Поэтому повышение усталостной прочности и эксплуатационных характеристик при усталости является актуальной проблемой, и этим областям уделяется все большее внимание. Ван и др.[24] исследовали влияние конструкции основного вала ветряной турбины на сегмент с резьбой; они показали, что расстояние между сегментом с резьбой и основным валом будет влиять на усталостную прочность сегмента с резьбой. Чен и др., использовали Ansys для изучения усталостной прочности коленчатого вала дизельного двигателя под действием сил цилиндра, поддерживающих сил и других факторов. Тан [25] исследовал усталостную прочность ветряной турбины, проанализировал ее усталостное состояние и получил максимальную точку опасности. Sheng [25] обсудил усталостные характеристики автомобильных радиаторов и получил параметры усталостных характеристик, которые имеют большое значение для управления усталостью и оптимальной конструкции радиаторов.

4.1.6 Оптимизация конструкции и усталости

Одним из направлений развития анализа усталости является объединение технологии усталостного анализа с технологией оптимизации. Для завершения оптимизации конструкции в соответствии с результатами анализа усталости может быть предложена схема оптимизации; это позволяет достичь целей оптимизации, таких как увеличение срока службы или уменьшение веса компонентов. Ван и др. изучили усталость поршня судового дизельного двигателя от фреттинга; они рассчитали распределение напряжений с использованием параметра Смита–Уотсона–Топпера, проанализировали некоторые влияющие факторы и оптимизировали эти параметры, чтобы продлить срок службы поршня и уменьшить усталость от фреттинга. Чжи и др. предложили подход к анализу усталостной надежности, основанный на нечеткой оптимизации конструкции; они построили оптимальную математическую модель для сварочного робота с точки зрения качества и усталостной долговечности, а также генетический алгоритм оптимизации роя частиц и прокси-модель нейронной сети с радиальной базисной функцией. Для решения этой модели они использовали улучшенный генетический алгоритм сортировки без доминирования. Наконец, надежность при усталости была проанализирована с использованием оптимизированной структуры в сочетании с методом численного моделирования. В исследовании усталостной долговечности кабины грузового автомобиля Цю и др.[26] предложили гибридный многоцелевой метод оптимизации надежной конструкции. Для уточнения интервалов расчетных переменных использовался метод Taguchi-метод управляемого параметрического проектирования (robust parameter design). Были смоделированы среднее значение и стандартное отклонение, и для надежного проектирования был использован многоцелевой алгоритм оптимизации роя частиц. Было обнаружено, что оптимизированная конструкция увеличивает усталостную долговечность и значительно снижает массу кабины грузовика.

4.1.7 Анализ усталости в сочетании с анализом методом конечных элементов

В связи с продолжающимся развитием науки и техники, а также появлением и широким применением компьютеров компьютеры начали широко использоваться для анализа усталости. Использование возможностей быстрого анализа компьютеров для прогнозирования и анализа усталостного ресурса может сэкономить деньги и время. Многие пакеты программного обеспечения для анализа методом конечных элементов оснащены модулями анализа усталости, включая программное обеспечение для моделирования, такое как Ansys Workbench, Ansys nCode DesignLife и Abaqus [28]. Ansys nCode DesignLife - это пакет анализа усталостной долговечности, разработанный HBM nCode; данные интегрированы в платформу Ansys Workbench и могут использоваться для моделирования практически всех типов проблем усталости, включая высокую и низкую -циклическая усталость, вибрационная усталость и усталость от паяных соединений. Он может генерировать такие данные, как спектры нагрузки и кривые S-N, и он может легко получать входные условия, такие как конечно-элементные модели и материалы, используемые при анализе усталости, чтобы пользователи могли легко получать требуемые результаты [28].

В настоящее время, в связи с продолжающимся углубленным изучением анализа усталости, прогнозирование усталостной долговечности все чаще применяется в различных областях техники. Для удовлетворения потребностей пользователей основные производители программного обеспечения для конечных элементов будут продолжать более тесно сочетать анализ усталости и программное обеспечение для конечных элементов, и их функции будут становиться все более мощными. Усталостная долговечность и усталостные повреждения, полученные в результате моделирования методом конечных элементов, будут становиться все более удобными и быстрыми, а ошибки будут меньше и точность выше.

4.2 Описание расчёта усталостной прочности

Функции модуля долговечности в NX 12.0 включают в себя ряд инструментов, которые позволяют производить анализ прочности и долговечности различных конструкций в различных условиях эксплуатации.

Основные функции модуля долговечности в NX 12.0:

- Расчет напряжений и деформаций. Модуль позволяет проводить расчет напряжений и деформаций в конструкции при различных условиях эксплуатации, включая циклические нагрузки и плавающую амплитуду. Эти данные используются для определения участков конструкции, которые подвержены наибольшему напряжению и деформациям и могут быть усилены или изменены для улучшения прочности и долговечности.

- Расчет усталостной прочности. Модуль позволяет проводить расчет усталостной прочности компонентов и элементов конструкции при циклических нагрузках. Эти данные используются для определения ожидаемой срок службы конструкции и для выбора наиболее надежных материалов и конструктивных элементов.

- Расчет температурной долговечности. Модуль позволяет моделировать и анализировать поведение конструкции при различных температурах и термоциклах. Это позволяет определить оптимальные материалы и конструктивные элементы для работы в различных условиях температуры.

- Расчет параметров упрочнения. Модуль долговечности позволяет вычислять параметры упрочнения и использовать их для оптимизации конструкции и увеличения прочности и долговечности.

- Сохранение данных. Результаты анализа могут быть сохранены в различных форматах, включая изображения и графики, таблицы с данными и файлы с расчетами. Это позволяет использовать полученную информацию в

дальнейшей работе и улучшать конструкцию для оптимальных условий эксплуатации.

Моделирование долговечности осуществляется методом дождя.

Метод дождя (или метод интенсивных дождей) является одним из методов схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций. Он используется при расчетах на прочность для определения вероятности возникновения различных уровней нагрузки на элементы конструкции.

Суть метода состоит в том, что нагрузка на конструкцию моделируется в виде серии коротких ударов различной интенсивности (величины) и длительности, которые напоминают проходящий дождь. Таким образом, в течение определенного времени на конструкцию "падает" ряд ударов различной интенсивности.

Для моделирования нагрузки методом дождя используются случайные числа, распределенные по определенному закону (например, нормальному). При этом учитывается также зависимость между уровнем нагрузки и временем ее действия.

После моделирования нагрузки методом дождя производится анализ прочности конструкции с учетом полученных данных. В результате получается статистическое распределение вероятностей для различных уровней нагрузки и вероятность возникновения различных деформаций или разрушений конструкции при заданных условиях эксплуатации.

Метод дождя является одним из наиболее точных методов моделирования случайных процессов нагружения. Он широко применяется в расчетах прочности конструкций в различных отраслях промышленности, включая автомобильную, авиационную, судостроительную и другие.

Для запуска Мастера долговечности NX необходимо выполнить следующие шаги:

1. Запустите приложение Teamcenter от Siemens и войдите в систему.

2. На странице «Добро пожаловать» выберите «Начать работу» и затем выберите «Улучшение дизайна».

3. На следующей странице выберите «Мастер долговечности» и нажмите «Далее».

4. Укажите узел NX, с которым вы хотите работать.

5. Убедитесь, что установлен модуль NX Advanced Simulation и укажите его версию.

6. Выберите тип анализа, который вы хотите выполнить.

7. Выберите список испытаний или создайте новый список.

8. Укажите необходимые материалы, типы элементов конструкции и другие параметры.

9. Установите граничные условия и нагрузки для модели.

10. Запустите расчет.

Просмотрите результаты и выполните необходимые действия для оптимизации конструкции.

Процесс запуска Мастера долговечности NX может незначительно отличаться в зависимости от версии программного обеспечения и задач, которые необходимо решить.

Для симуляции долговечность используем Мастер симуляции рисунок 37.

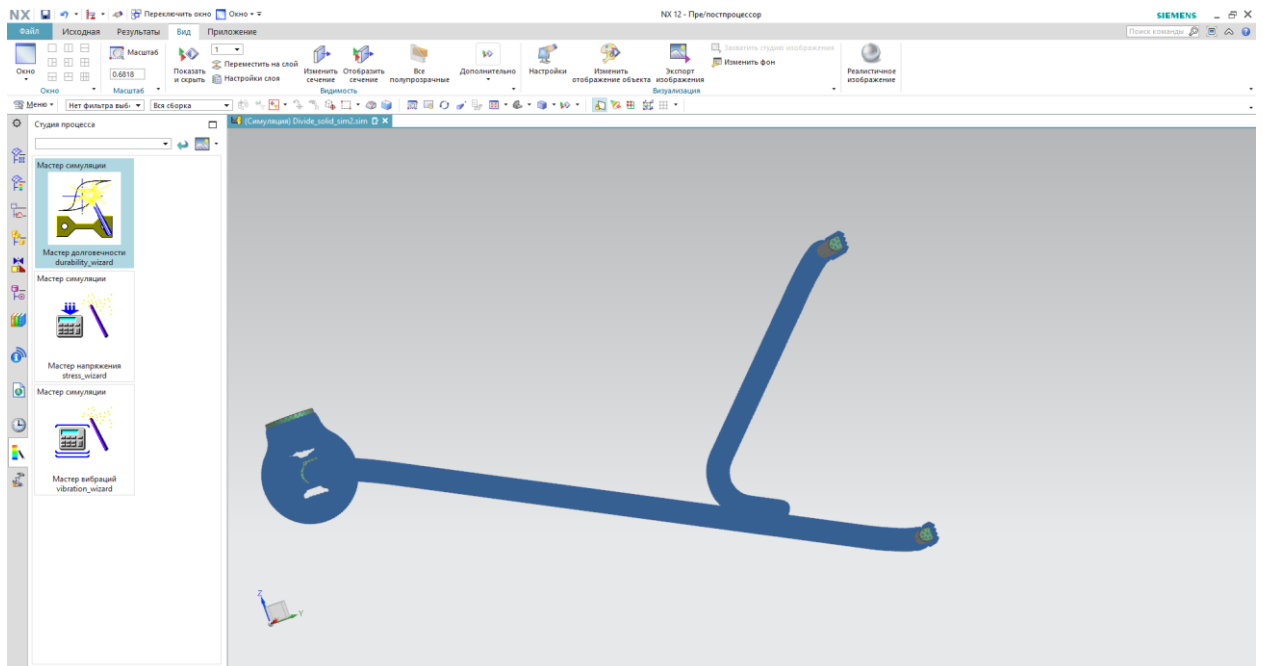


Рисунок 37 – Мастер долговечности NX

Мастер долговечности потребует выбрать структурное решение с условиями нагружения. Выбираем 1 решение задачи по статической прочности. Определим число циклов нагружения как 1 000 000 повторений, шаблон нагрузки синусоида рисунок 38. Нажимаем далее. И запускаем расчёт.

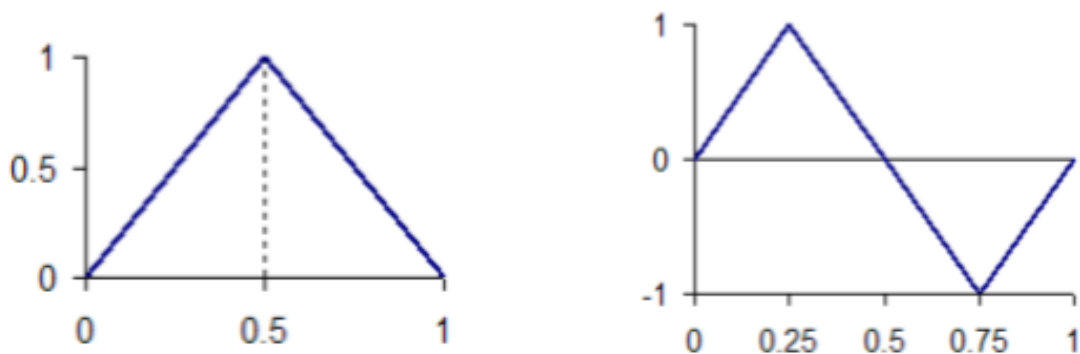


Рисунок 38 – Нагрузка половины цикла и нагрузка полного цикла

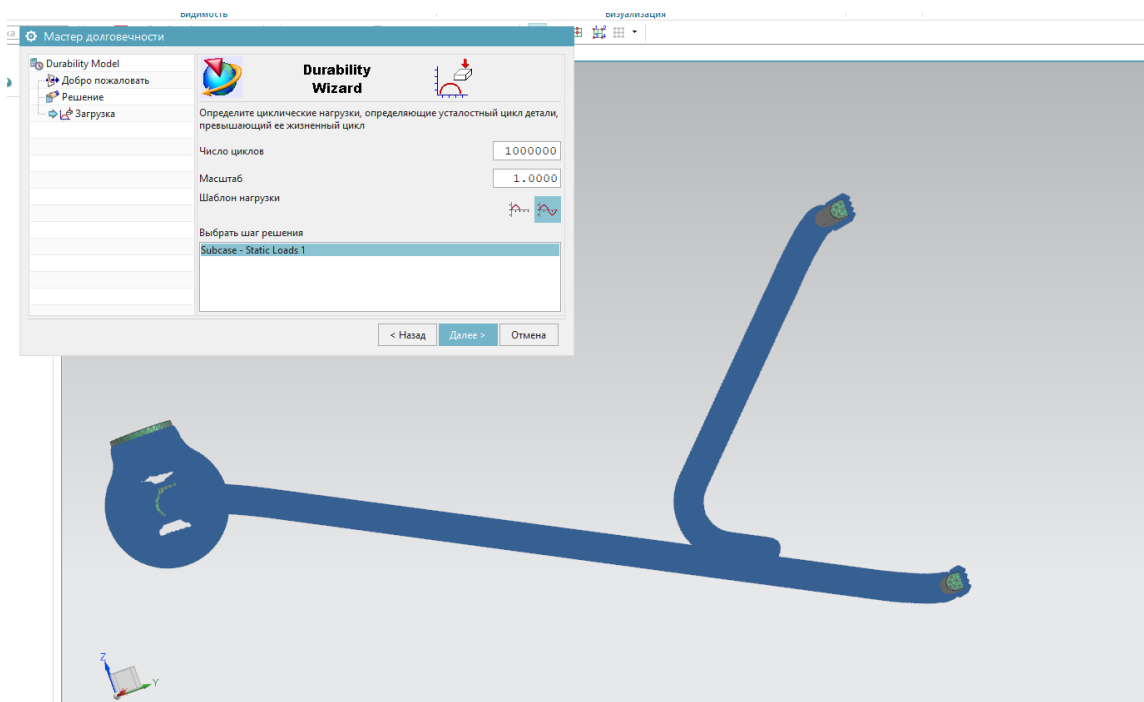


Рисунок 39 – Определение количества циклов и форму нагружений.

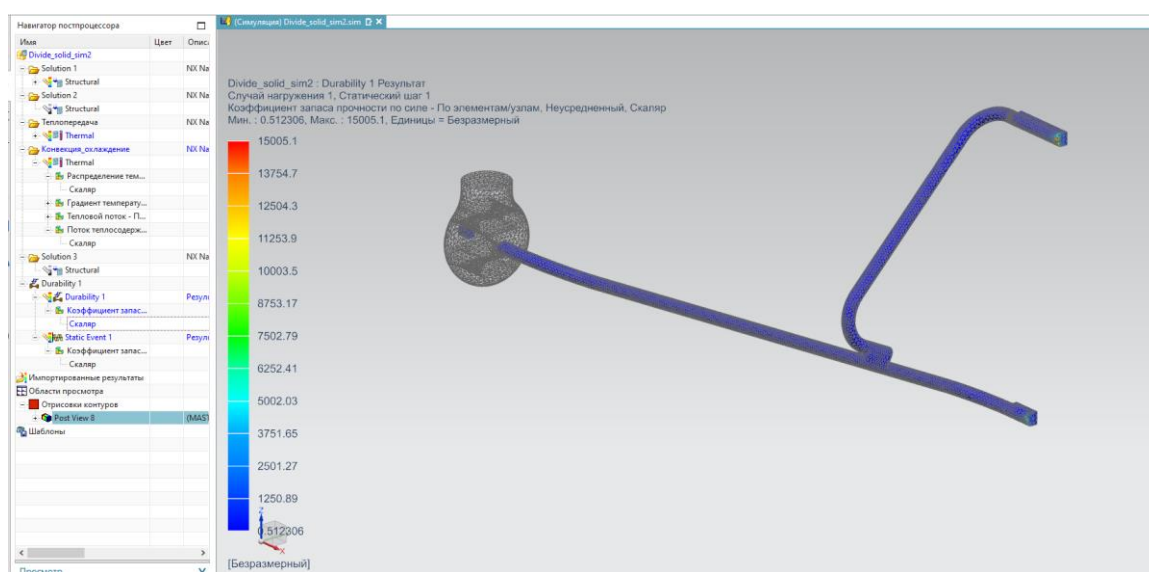


Рисунок 40 – Результаты анализа усталостной прочности.

Согласно анализу на усталостную прочность рисунок 40, мы видим, что запас прочности у детали составляет 1.92. Для машиностроения коэффициент запаса прочности обычно составляет 1,5 – 2,0.

Выводы

Существует много видов методов прогнозирования усталостной долговечности. В этом разделе были представлены метод номинальных напряжений, метод локальных напряжений–деформаций и метод зависимости напряженности поля напряжений. Эти три метода являются наиболее часто используемыми методами прогнозирования усталостной долговечности. В дополнение к этим, другие подходы включают метод критической плоскости / расстояния и методы, основанные на механике разрушения. Каждый метод имеет свои собственные подходящие сценарии применения, и наиболее точные результаты анализа могут быть получены путем выбора подходящего метода в соответствии с различными структурами и сценариями. Например, Вэй и др. предложили метод анализа усталостной долговечности, объединяющий кривую S-N и теорию механики ситуации разрушения, для изучения эволюции усталостных трещин в сварных конструкциях, и они проверили точность своего метода с помощью экспериментов. Критерий Майнера не учитывает влияние последовательности нагружения на усталостную долговечность; по этой причине Чжан и Цуй предложили метод, сочетающий механику повреждений и метод конечных элементов, который может быть использован для прогнозирования усталостной долговечности компонентов при нагрузке переменной амплитуды. Таким образом, при выборе методов анализа усталости необходимо выбирать или комбинировать различные методы прогнозирования усталостной долговечности для анализа усталости в соответствии с материалом целевой структуры, методом нагружения и степенью развития трещин.

Исследования многоциклового усталости в Мастере долговечности NX показали, что кронштейн имеет достаточную усталостную прочность с коэффициентом запаса 1,5-2.

Заключение

1. Долговечность и надежность транспортного средства являются основными факторами в автомобильном секторе для успешной работы транспортного средства в течение длительного времени.
2. Испытания на долговечность и анализ отказов монтажного кронштейна глушителя показали, что одной из основных причин выхода из строя СВОГ являлись поломки кронштейна глушителя.
3. Моделирование работы конструкции кронштейнов СВОГ производилось с помощью систем CAE САПР.
4. Выбраны методы параметрического моделирования в системе CAD на основе координатных плоскостей, эскизов и операций кинематического замещения, булевых операций, операций скругления, обрезки и создания фасок
5. Разработаны электронные модели корпуса глушителя, двух кронштейнов и резиновых буферов
6. Установлено, что максимальное значение интенсивности напряжений при статической нагрузке $P=150$ Н расположено в области, примыкающей к эластичному буферу, и достигает значения 239 МПа, которое меньше 11,5 МПа величины предела упругости для материала кронштейна.
7. Выявлено, что только за счет теплопередачи без учета охлаждения кронштейна температура эластичного буфера может изменяться от 250° С до 20° С
8. Показано, что при конвективном охлаждении в состоянии покоя (коэффициент конвекции 6 Вт/(м²*К), температура резинового буфера не превышает 50° С, что допустимо при его эксплуатации
9. Исследования многоциклового усталости в Мастере долговечности NX показало, что кронштейн имеет достаточную усталостную прочность с коэффициентом запаса 1,5-2.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Артамонов И., Данилов Ю. Д17 Практическое использование NX. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.
2. Ахметов А.С., Потапенко В.П., Шамин А.А. Анализ и повышение надежности и долговечности машинных элементов и систем: учеб. пособие. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2009. - 400 с
3. Биргер И.73 А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М., 1993.
4. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов: учебник для вузов. М.,1989.
5. Карлова Л.П., Кармалов А.В., Черкашин А.В. Надежность технических систем: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2012. - 320 с.
6. Макушко А.В., Котельников В.А. Надежность и долговечность элементов конструкций: монография. - М.: Машиностроение, 2004. - 320 с.
7. Михеев Р. А. Прочность вертолетов: учебник для вузов. М., 1984.
8. Надежность и долговечность машин: учебник для вузов / под ред. М.В. Остапчука, Б.Н. Попова. - СПб.: Лань, 2004. - 480 с.
9. Новиков В.А., Новикова О.П., Карфашкин М.И. Факторы повышения долговечности и надежности технических систем: учеб. пособие. - М.: Издательство "Экзамен", 2015. - 288 с.
10. Орлов П. И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 1. М., 1988.
11. Пачурин Г.В., Гущин А.Н., Галкин В.В., Пачурин В.Г. Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий: учеб. пособие / Г.В. Пачурин, А.Н. Гущин, В.В. Галкин, В.Г. Пачурин; НГТУ. – Н. Новгород, 2006. – 176 с.
12. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний материалов. Методы испытаний на усталость: ГОСТ 25.502 – 79.

13. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости: ГОСТ 25.504 – 82.
14. Седов С. А. Теория механизмов и машин: Учебно-методическое пособие / Авт.-сост. С. А. Седов. – Елабуга: Изд-во ЕИ(Ф) К(П)ФУ, 2017. – 40 с.
15. Современные проблемы долговечности и надежности машин / под ред. В.Г. Звезенко. - Киев: Наукова думка, 2018. - 408 с.
16. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Часть 1 / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. - Киев, 1987.
17. Трощенко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Часть 1. - Киев, 1987.
18. Усталость материалов: учебник для вузов / под ред. М.В. Остапчука, Б.Н. Попова. - СПб.: Лань, 2002. - 528 с.
19. Шамин А.А., Пичугин А.И., Рубаненко А.А. Долговечность и надежность машин: методы оценки и повышения: учеб. пособие. - М.: Айрис-Пресс, 2015. - 240 с.
20. Факторы повышения долговечности и надежности технических систем: учеб. пособие / В.А. Новиков, О.П. Новикова, М.И. Карфашкин и др.; под ред. В.А. Новикова. - М.: Издательство "Экзамен", 2015. - 288 с.
21. Долговечность и надежность машин: методы оценки и повышения: учеб. пособие / А.А. Шамин, А.И. Пичугин, А.А. Рубаненко. - М.: Айрис-Пресс, 2015. - 240 с.
22. Надежность и долговечность машин и оборудования: теория и практика / под ред. А.А. Иванова, А.Л. Куприянова, Н.А. Мельникова. - М.: Наука, 2009. - 336 с.
23. Adkine A.S., Kathavate V.S. DESIGN AND ANALYSIS OF ENGINE MOUNTING BRACKET USING ANSYS TOOL// International Journal of Innovation in Engineering, Research and Technology [IJERT]. 2015. PP 1-6.
24. Belikov, S., Volchok, I., & Mityayev, O. (2006). The nanomodifier of aluminium alloys. Aims for future of engineering science, pp. 191–193.

25. Birari V.S., Saha M. Design and Analysis of Engine Mounting Bracket // International Journal of Engineering Technology Science and Research. 2018. Volume 5. Issue 3. PP 1781-1785.
26. Das, S. (2000). The cost of automotive polymer composites: a review and assessment of doe's lightweight materials composites research – ORNL, TM-2000, pp. 283.
27. Gribkov, A. A. (2013). Novyye materialy, primenyayemye v avtomobil'noy promyshlennosti [New materials used in the automotive industry]. Materials of the international scientific and practical conference “Innovations in the automotive industry”, pp. 18–22 [in Russian].
28. Kumar D., Savanur A.R. Design & Analysis of Truck Engine Mount Brackets of a Truck to Improve its Performance of Life Using FEA // Asian Journal of Convergence in Technology. 2018. Volume 4. Issue 1. PP 1-5
29. Lin L., Jizhong W., Shuai C. Strength Performance Analysis and Improvement of Engine Mounting Bracket for a Commercial Vehicle // American Journal of Mechanics and Applications. 2019. Volume 7. Issue 2. PP 21-29.
30. Mityaev, A. A., Volchok, I. P., et al. (2014). Kompleksnoe modifytirovaniye vtorychnykh sylumynov [Complex modification of secondary silumines]. Nauka ta prohresttransportu. Bulletin of 74 Dnipropetrovsk national university of railway transport, Vol. 54, No. 6, 87–96.
31. Nitin A.J., Pravin P.P., Giten S., Marachakkanavar M. Design and Analysis of Engine Mount Bracket for Go-Kart // International Conference on Sustainable Computing in Science, Technology & Management. 2019. PP 530-536.
32. Pandit K.S., Shrivastava A. A Review on the Performance Analysis of Engine Bracket // IJO SCIENCE.2019. Volume 5. Issue 9. PP 8-11