

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
(КНИТУ-КАИ)

Институт авиации, наземного транспорта и энергетики

Кафедра автомобильных двигателей и сервиса

Направление подготовки: 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы»
Профиль: Проектирование автомобилей и их систем

К защите допустить

Зав. каф. АДиС

_____ **А.Л. Абдуллин**

«___» _____ **2020г.**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
магистерская диссертация

на тему «Разработка конструкций опор силового агрегата методом
топологической оптимизации с целью повышения жесткости и снижения
массы»

ОБУЧАЮЩИЙСЯ

Ляпченков Андрей Валерьевич
(фамилия, имя, отчество)



(подпись)

РУКОВОДИТЕЛЬ

д.т.н., профессор, Крюков Виктор Георгиевич
(ученая степень, звание, фамилия, имя, отчество)

(подпись)

Казань 2020 г.

**THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN
FEDERATION**
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI»
(KNRTU-KAI)

Institute of Aviation, Land Transportation and Power Engineering

Department of Automotive Engines and Service

23.04.02 «Land Transport Technology Complexes»
Section: “Automotive Engineering”

Admit to the defense

Head of the Department of AES

_____ Abdullin A.L.

« ___ » _____ 2020г.

MASTER THESIS

«Development of powertrain support structures by topological optimization to
increase rigidity and reduce weight»

STUDENT Liapchenkov Andrei Valerevich



(signature)

SUPERVISOR Kriukov Viktor Georgievich

(signature)

Kazan 2020

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
(КНИТУ-КАИ)

Институт авиации, наземного транспорта и энергетики
Кафедра «Автомобильных двигателей и сервиса»
Направление 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы»
Профиль «Проектирование автомобилей и их систем»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АДиС

Абдуллин А.Л.

« » 2020г.

ЗАДАНИЕ

выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации)

Ляпченков Андрей Валерьевич

(фамилия, имя, отчество)

1 Тема выпускной квалификационной работы Разработка конструкций опор силового агрегата методом топологической оптимизации с целью повышения жесткости и снижения массы

утверждена приказом по университету от " 10 " февраля 2020 г. № 612-с

2 Срок сдачи обучающимся законченной выпускной квалификационной работы _____

3 Исходные данные к выпускной квалификационной работе

Провести литературный обзор методов топологической оптимизации в автомобильной отрасли. На основе выбранных прототипов конструктивных опор разработать новые формы кронштейна навески силового агрегата методом топологической оптимизации с увеличением жесткости и уменьшением массы. Провести анализ условий нагружения кронштейнов.

4 Содержание расчётно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов и исходные данные к ним):

4.1 Топологическая оптимизация.

4.2 Теоретические положения топологической оптимизации.

4.3 Методы решения задач топологической оптимизации.

4.4 Механизмы топологической оптимизации реализованные в NX Advanced Simulation

4.5 Методика разработки модели в Siemens NX

4.6 Анализ условий нагружения кронштейна навески двигателя

4.7 Определение геометрии кронштейна

4.8 Анализ на распределение напряжения

4.9 Анализ на деформацию – перемещение

5 Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Презентация выпускной квалификационной работы в формате PDF

6 Консультанты по ВКР (с указанием относящихся к ним разделов):

Раздел	Консультант (фамилия и инициалы)	Подпись, дата	
		Задание выдал	Задание принял

7 Дата выдачи задания _____

Руководитель ВКР магистра _____
(подпись)

(фамилия и инициалы)

Задание к исполнению принял _____
(подпись)

Календарный план

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы магистра	Срок выполнения этапов выпускной квалификационной работы магистра	Примечание
1	Литературный обзор методов топологической оптимизации в автомобильной отрасли	10.02.2020 – 6.03.2020	
2	Обзор методов решения топологической оптимизации в программном комплексе Siemens NX	6.03.2020 – 24.03.2020	
3	Анализ условий нагружения кронштейна навески двигателя	25.03.2020 – 12.04.2020	
4	Определение геометрии кронштейна	13.04.2020 – 29.04.2020	
5	Разработка моделей опор двигателя	01.05.2020 – 17.05.2020	
6	Анализ на деформацию и нагрузку	18.05.2020 – 25.05.2020	
7	Оформление документации	25.05.2020 – 01.06.2020	

Обучающийся _____ 

Руководитель _____

Аннотация

В дипломном проекте рассмотрено 3 главы. Графическая часть состоит из 1 лист формата А1, расчетно-пояснительная записка объемом 108 листов, 7 файлов моделей для Siemens NX.

В главе 1 представлены исходные данные;

В главе 2 представлен информационный обзор по методу топологической оптимизации;

В главе 3 представлена расчетно-технологическая часть, где производится разработка вариантов конструкционных опор силового агрегата.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

Annotation

3 chapters are considered in the thesis project. The graphic part consists of 1 sheet of A1 format, a calculation and explanatory note of 108 sheets, 7 model files for Siemens NX.

Chapter 1 presents the background data;

Chapter 2 provides an overview of the topological optimization method;

Chapter 3 presents the computational and technological part, where the development of options for the structural supports of the power unit is carried out.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>7</i>

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	10
Глава I. Исходные данные.....	12
Глава II. Информационный обзор	15
2.1 Теоретические положения топологической оптимизации.....	15
2.2 Топологическая оптимизация.....	17
2.3 Методы решения задач топологической оптимизации.....	17
2.3.1 Метод гибридных ячеек.....	17
2.3.2 Метод статистических эквивалентных нагрузок.....	19
2.4 Оптимизация.....	20
2.5 Механизмы топологической оптимизации реализованные в NX Advanced Simulation.....	23
2.6 Методика разработки модели в Siemens NX.....	25
Глава III. Расчетно-технологическая часть.....	32
3.1 Анализ условий нагружения кронштейна навески двигателя.....	32
3.2 Определение реакций опор.....	36
3.3 Расчет нагружения опор при движении с ускорением по наклонной поверхности.....	37
3.4 Расчет дополнительных нагрузок на опоры за счет реактивного крутящего момента.....	38
3.5 Расчет дополнительных нагрузок на опоры при движении по радиусной поверхности.....	38
3.6 Расчет дополнительных нагрузок на опору за счет предварительной затяжки болтовых соединений.....	39
3.7 Определение геометрии кронштейна.....	40
3.8 Разработка геометрии передней опоры двигателя.....	56
3.9 Разработка геометрии задней опоры двигателя.....	73
3.10 Сравнительный анализ полученных результатов.....	87
3.10.1 Анализ на распределение напряжения.....	87
3.10.2 Анализ на перемещение.....	87
3.10.3 Сравнение изменения жесткости и массы.....	88

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

3.10.4 Сравнение геометрии конструкций опор.....	89
Заключение.....	90
Список использованных источников.....	92
Приложение.....	93

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

ВВЕДЕНИЕ

В любом транспортном средстве двигатель опирается на кронштейны, которые соединяются с шасси посредством резиновых демпфирующих элементов. Следовательно, во время его эксплуатации, нежелательные вибрации, создаваемые двигателем, а также и качеством дорожного полотна могут непосредственно передаваться в раму через кронштейны. Это может привести к дискомфорту для водителя и пассажиров в автомобиле. Когда рабочая частота или возмущение приближается к собственной частоте тела, амплитуда вибраций увеличивается. Это явление называется резонансом. Это увеличение наиболее сильно в низкочастотных диапазонах до 50 Гц. Следовательно, демпфирование этих вибраций двигателя становится важной функцией для кронштейнов.

Одной из наметившихся тенденций при разработке деталей и узлов, является широкое применение методов топологической оптимизации. Самым распространенным подходом в оптимальном проектировании является использование параметризованной модели, позволяющей проводить варьирование некоторых размеров в заданных пределах при соблюдении наложенных условий, которыми, в частности, могут являться заданный уровень напряжений или запасов прочности.

Топологическая оптимизация – это метод, который позволяет изменить форму рассматриваемого элемента или объекта путем изменения его геометрии. Данный метод является математической задачей, основная цель которой состоит в поиске распределения материала по площади или объему.

Оптимизация топологии уравнивает использование материала против жесткости детали. За последние два года она приобрела популярность благодаря своей доступности в программном обеспечении с автоматизированным дизайном (САПР), которое является простым в использовании и доступным. Кроме того, оптимизация великолепна при

Подп. и дата					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ			
Взам. инв. №								
Инв. № дубл.								
Подп. и дата								
Инв. № подл.								
	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата			
Инв. № подл.	Разраб.	Ляпченков А.В.			Разработка конструкций опор силового агрегата методом топологической оптимизации с целью повышения жесткости и снижения массы	Лит	Лист	Листов
	Пров.	Крюков В.Г.				10	85	
	Т. контр.					КНИТУ-КАИ		
	Н. контр.							
	Утв.	Абдуллин А.Л.						

создании прочных, легких деталей с меньшим количеством материала.

В последние годы топологическая оптимизация заняла место полноправного метода для проектирования новых изделий и улучшения существующих конструкций. Накопленный практический опыт применения топологической оптимизации позволяет сформулировать такие преимущества метода, как:

- снижение массы несущих конструкций без потери жёсткости и прочности - до 70% с применением аддитивных технологий, до 40% - без АТ;
- в 3-7 раз повышение жесткости и прочности без увеличения массы (с АТ), в 2-5 раз - без аддитивных технологий;
- изменение собственных частот конструкций в разы (эффективная отстройка от резонанса).

Цель работы: разработать конструкции опор силового агрегата методом топологической оптимизации с целью повышения жесткости и снижения массы.

Задачи:

- обзорный материал по методам топологической оптимизации в автомобильной отрасли;
- исследовать механизмы топологической оптимизации реализованные в пакете NX Advanced Simulation применительно к типовой модели (кронштейн);
- определить режимы нагружения кронштейна;
- провести топологическую оптимизацию для получения формы с точки зрения минимальной массы и равнопрочности;
- сделать образцы по результатам расчета и провести сравнительный эксперимент.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

Глава I. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для разработки конструкций опор силового агрегата методом топологической оптимизации с целью повышения жесткости и снижения массы необходимы следующие исходные данные: тип подвижного состава, динамические характеристики автомобиля, режим работы и режим ТО автомобилей, тип и модель силового агрегата, вес двигателя, конструкционные размеры и ограничения, технические характеристики силового агрегата.

- тип подвижного состава (модель, марка автомобиля):

Бортовой автомобиль «КАМАЗ-43253-69 (G5)»

Стандарт: Евро 5. Колёсная формула: 4x2

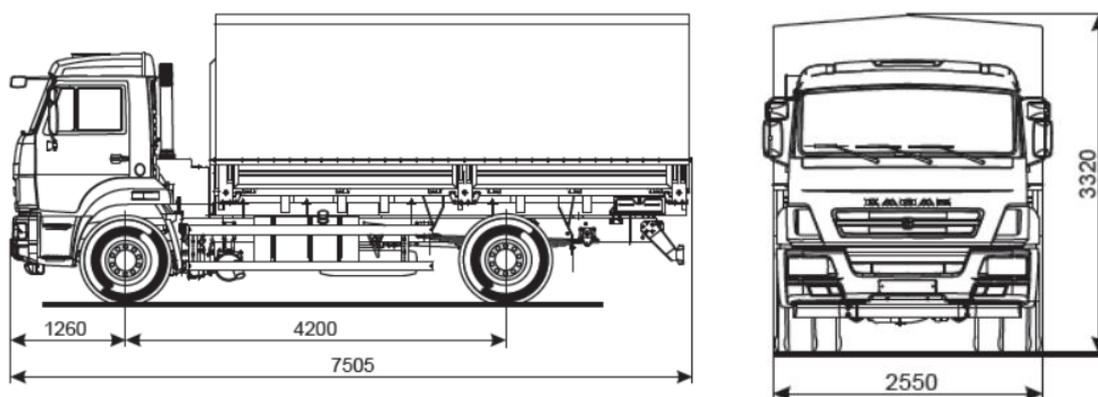


Рис. 1.1. Принципиальная схема автомобиля

Таблица 1.1

Технические характеристики

Весовые параметры и нагрузки	
Грузоподъемность автомобиля, кг	7500
Полная масса а/м, кг	14590
нагрузка на задний мост, кг	9445
нагрузка на переднюю ось, кг	5145
Снаряженная масса, кг	7015
нагрузка на задний мост, кг	3000
нагрузка на переднюю ось, кг	4015

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

12

Коробка передач	
Модель КП	ZF 6S700
Передаточные числа на передачах	1-6,02; 2-3,32; 3-2,07; 4-1,4; 5-1,00; 6-0,79; 3X-5,58
Тип	механическая, 6-тиступенчатая
Управление	механическое, дистанционное
Число передач КП	6
Бортовая платформа	
Внутренние размеры, мм	5162 x 2470
Высота бортов, мм	730
Платформа	бортовая, с металлическими откидными бортами, в зависимости от комплектации оборудуется каркасом и тентом
Кабина	
Исполнение	без спального места
Тип кабины	расположенная над двигателем, с высокой крышей
Колеса	
Размер обода	8,25-22,5
Тип колес	дисковые
Тип шин	пневматические, камерные или бескамерные
Шины	11.00 R22,5
Тормоза	
Привод	пневматический
Размеры диаметр барабана, мм	400
Ширина тормозных накладок, мм	140
Характеристики а/м полной массы	
Внешний габаритный радиус поворота, м	10
Максимальная скорость, не менее, км/ч	90
Угол преодолеваемого подъема, не менее, % (град)	25 (14°)

- силовой агрегат (модель двигателя):

Cummins ISB6,7 E5 250 (Евро-5);

Таблица 1.2

Двигатель	
Модель двигателя	Cummins ISB6,7 E5 250 (Евро-5)
Макс. полезный крутящий момент, Нм (кгсм)	937 (96)
при частоте вращения коленчатого вала, об/мин	1300
Максимальная полезная мощность, кВт (л.с.)	178 (242)
при частоте вращения коленчатого вала, об/мин	2500
Рабочий объем, л	6,7
Расположение и число цилиндров	рядное, 6
Степень сжатия	17,3
Тип двигателя	дизельный с турбонаддувом, с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха,
Вес двигателя, кг	512

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

13

Системы выпуска и нейтрализации	
Вместимость бака с нейтрализующей жидкостью, л	35
Тип	глушитель, совмещенный с нейтрализатором
Система питания	
Вместимость топливного бака, л	350

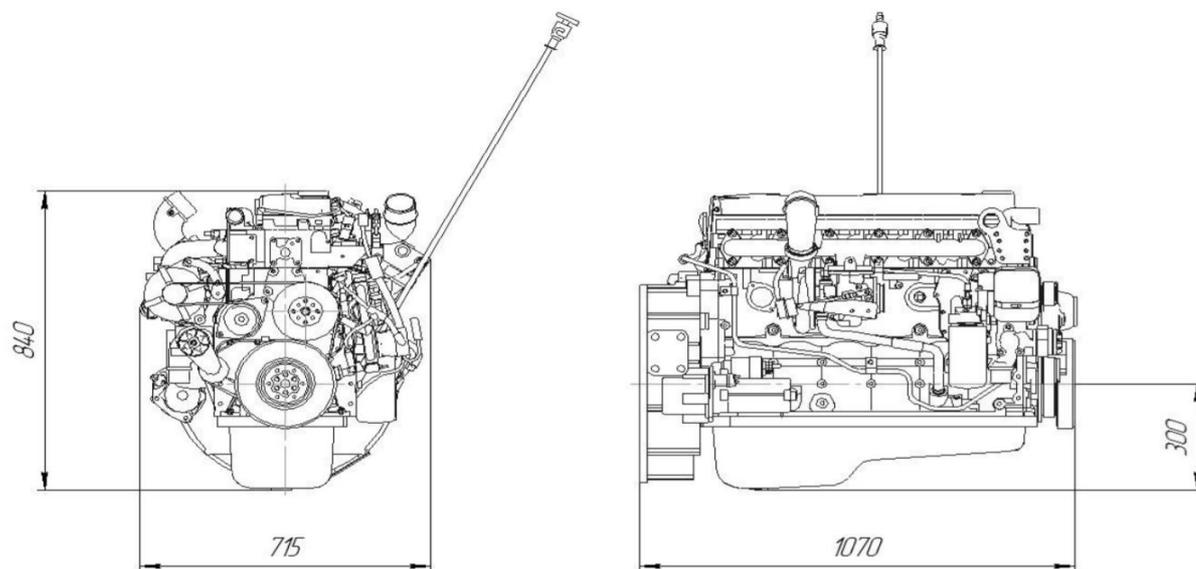


Рис. 1.2. Принципиальная схема двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

14

В учёте проектной переменной в топологической оптимизации применяется относительная плотность конечных элементов модели, варьированием которой определяется оптимальное распределение материала по всей детали. В результате расчетного анализа создается модель, состоящая из элементов, относительная плотность которых равна единице, и элементов относительной плотностью равной нулю. Исходя из напряженно-деформированного состояния конечного элемента, регистрируются области, в которых нет необходимости в учтенном материале. Таким образом, при оптимизации происходит исключение из концепта наименее нагруженных конечных элементов, и в результате формируется новая генерация модели в пределах пространства исходной геометрии.

От ограничений технологией производства зависит результат распределения материала по объему рассматриваемой конструкции:

- «фиксирование» элементов: указание области конечно-элементной модели, которую невозможно изменять по конструктивным понятиям;
- опции симметрии: указания параметров для циклической и зеркальной, симметрии;
- Размеры: контроль толщины при оптимизации новых конструктивных элементов модели;
- параметры литья: необходимо для избежания получения пустот и впадин.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

2.2 Топологическая оптимизация

Топологическую оптимизацию следует рассматривать как методику проектирования первоначальной концепции дизайна модели. Процесс оптимизации автоматически перераспределяет материал внутри области разработки, для того чтобы целевая функция могла быть минимальная или максимальна, заданная заранее.

Минимизация целевой функции – это цель оптимизации топологии. На доступную массу или объем обычно устанавливается ограничение. Общая формулировка может быть выражена как:

$$\begin{aligned} \min_{\rho_i} f(p); \\ \sum^N \rho_i \vartheta_i \leq V; \\ \rho_{min} \leq \rho_i \leq \rho_{max}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

здесь ρ являются элементарными плотностями, а N – количеством конечных элементов в области проектирования. Каждый элемент связан с его собственной переменной дизайна.

Максимальное поглощение энергии – это основанная цель при создании конструкций, отвечающих требованиям пассивной безопасности.

2.3 Методы решения задач топологической оптимизации

Для решения задач топологической оптимизации наиболее часто встречающимися методами являются:

- метод гибридных ячеек;
- метод эквивалентных статических нагрузок.

2.3.1 Метод гибридных ячеек (НСА)

Метод гибридных ячеек поясняется следующим образом:

- обозначение границ проектирования, свойств материала, режимов нагружения и начальную конструкцию x^0 ;
- определение внутренней плотности материала $U_i^{(k)}$ в каждом i -ом элементе, используя результаты решения задачи методом конечных элементов;

– апгрейд распределения материала для получения новых значений $x_i^{(k+1)}$, согласно уравнению ниже:

$$S_i^{(k)} = \frac{1}{\sum_{k=0}^n w_i^k} \sum_{j=0}^n w_j^i U_i^{(k-j)}, \quad (2.2)$$

$$w_i = (x_i - x_{min})^2, \quad (2.3)$$

$$\Delta x_i^{(k)} = \max \{-0.1, \min \{K_p (S_i^{-(k)})\}, 0.1\}, \quad (2.4)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)}, \quad (2.5)$$

здесь $S_i^{(k)}$ – переменная, отображающая состояние k-ого элемента на i-ом шаге, x_i - относительная плотность i-ого элемента.

Проверка сходимости: если критерии сходимости выполнены, получается финальная топология; в противном случае итерационный процесс продолжается с шага 2.

Относительная плотность x_i ($0 < x_i < 1$) является величиной, которая необходима для параметризации главных свойств материала таких, как плотность, модуль упругости, предел текучести.

$$p_i(x_i) = x_i p_0; \quad (2.6)$$

$$E_i(x_i) = x_i E_0; \quad (2.7)$$

$$\sigma_i(x_i) = x_i \sigma_0; \quad (2.8)$$

$$E_{hi}(x_i) = x_i p E_{h0}; \quad (2.9)$$

Для решения задач параметризации материала существует множество вариантов решения, но наиболее распространенным является метод переменной плотности тела (SIMP). Концепция метода заключается в назначении варьируемого параметра x_i от 0 до 1 базовым свойствам материала.

Основываясь только на индивидуальной информации о плотности энергии в элементе, используемые критерии сходимости являются глобальными, несмотря на то, что метод НСА основан на распределении материала. Это необходимо для того, чтобы миновать получения результатов на ранних стадиях расчета, когда общая сходимость задачи еще не достигнута. Поэтому критерий сходимости массы учитывает изменения

массы как на предыдущем, так и на текущем шаге интегрирования. Критерий сходимости по массе можно записать в следующей форме:

$$\frac{\Delta M^{(k)} + \Delta M^{(k-1)}}{2} < E_1, \quad (2.10)$$

где $E_1 = 0,001 \times NX \times NY \times NZ$ и NX, NY и NZ - числа элементов вдоль главных осей x, y и z, E_1 – допуск сходимости.

критерий максимальной контактной силы - второй критерий сходимости, эта сила вычисляется в месте взаимодействия рассматриваемых объектов и может быть записана в следующей форме:

$$\frac{|\max\{F_r^{(k)}\} - \max\{F_r^{(k-1)}\}|}{\max\{F_r^{(k-1)}\}} < E_2, \quad (2.11)$$

где F_r – контактная сила, E_2 – допуск сходимости.

2.3.2 Метод статистических эквивалентных нагрузок

В варианте использования метода эквивалентных нагрузок, линейная оптимизация системы со множеством нагрузок построена на генетическом алгоритме, который приводит к оптимальному распределению плотности эквивалентных сил. Процесс расчета нелинейной динамической задачи с новой плотностью распределения разработана на сходимости оптимизационных критериев, с учетом закреплений и ограничений. В случае сходимости критериев итерационный процесс останавливается и получается итоговый результат, если сходимость не найдена, то новые эквивалентные нагрузки извлекаются из поля деформаций и начинается следующий шаг. Рис. 2.1 описывает алгоритм реализации ESL метода.

большее значение, чем когда-либо, из-за зрелости математических и вычислительных инструментов, доступных для проектирования.

В литературе по математической и инженерной оптимизации обычно описана вышеупомянутая фраза в обычной форме как:

$$\min f(x);$$

$$g_j(x) \leq 0; j = 1, 2, \dots, m; \quad (2.12)$$

$$h_k(x) = 0; k = 1, 2, \dots, l, \quad (2.13)$$

где f , g и h - функции независимых переменных $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Функция f , называемая функцией целевой, которое определяет количество, которое должно быть минимизировано или максимизировано. Функции g и h являются функциями ограничения, описывающие конструктивные ограничения. Переменные, совместно описываемые вектором x , часто используются как проектные переменные или конструктивные параметры.

Ограничения задачи определяют два набора функций g_j и h_k . Ограничения равенства не фигурируют в каких-либо иных формулировках, представленных здесь, потому что алгоритмически каждое ограничение равенства может быть описано двумя ограничениями неравенства, в которых верхняя и нижняя границы установлены на одинаковое число, например,

$$h_k(x) = 0 \sim 0 \leq h_k(x) \leq 0; \quad (2.14)$$

$$g_j(x) \leq 0; j = 1, 2, \dots, m. \quad (2.15)$$

Необходимые условия для решения x^* - являются условиями оптимальности Каруша-Куна-Таккера:

$$\nabla f(x^*) + \lambda^T \nabla g(x^*) = 0; \quad (2.16)$$

$$\lambda^T g(x^*) = 0; \quad (2.17)$$

$$g(x^*) \leq 0; \quad (2.18)$$

$$\lambda \geq 0. \quad (2.19)$$

Эти условия описаны дифференцированием функции Лагранжа задачи ограничения минимизации

$$L(x) = f(x) + \lambda^T g(x); \quad (2.20)$$

и применение условий

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						21
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$$\nabla^T f dx^* \geq 0; \text{ (оптимальности)} \quad (2.21)$$

$$\nabla^T f g x^* \leq 0; \text{ (вероятности)} \quad (2.22)$$

к возмущению δx^* . λ_j представляет собой множитель Лагранжа, который может быть отличным от нуля только в том случае, если соответствующее ограничение активно, т. е. $g_j(x^*) = 0$. Для x^* – локальный ограниченный минимум, гессиан функции Лагранжа; $\nabla^2 f(x^*) + \lambda^T \nabla^2 g(x^*)$ на подпространстве, касательном к активному ограничению g , должно быть положительно определено в точке x^* .

Алгоритм оптимизации требуется для решения задачи оптимизации. Метод последовательного квадратичного приближения, возможно, является самым популярным алгоритмом для ограниченной оптимизации и считается самым топовым подходом к структурной оптимизации. В большинстве программ подзадача оптимизируется с использованием точного и надежного алгоритма на основе градиента: метод динамической прыжковой лягушки. Оба этих алгоритма и большинство других имеют общие черты, что они основаны на формулировках первого порядка, т. е. требуют первых производных компонентных функций: df/dx_i и dg_i/dx_i для построения локальных приближений. Эти градиенты можно рассчитать либо аналитически, либо численно. Чтобы алгоритмы на основе градиента, такие как SQP, сходились, функции должны быть неизменными с непрерывными первыми производными.

Создания и реализации производных по отношению к проектным переменным в строках кода моделирования требует аналитическая дифференциация. Из-за сложности этой задачи аналитические градиенты, также известные как чувствительность к дизайну, в основном недостижимы. Численное дифференцирование обычно разработано на прямых разностных методах, которые требуют оценки возмущенных конструкций в дополнение к текущему пространству. Это просто реализовать, но дорого, опасно из-за наличия ошибки округления. В результате сложно выбрать размер и интервалы проектных переменных, не рискуя побочными производными, интервал слишком мал, или неточность, слишком большой интервал.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						22
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

нулевой относительной плотностью. Исходя из напряженно-деформированного состояния конечного элемента, указываются области, где нет необходимости в материале, пустые элементы. Следовательно, при оптимизации происходит отклонение из модели наименее нагруженных конечных элементов, и в результате создается новая конфигурация модели в пределах пространства первоначальной геометрии.

От технологии производства ограничений зависит результат распределения материала по объему рассматриваемой конструкции:

- фиксирование элементов – задание области конечно-элементной модели, которую нельзя изменять по конструктивным соображениям;
- условия симметрии – задание параметров для зеркальной и циклической симметрии;
- максимальный и минимальный размеры – контроль толщины образуемых в процессе генерации новых конструктивных элементов детали;
- параметры литья – предотвращение образования впадин и пустот, дыр.

Файл, содержащий модель в виде фасетного описания, генерируется на основании полученных расчетов распределения плотности материала. Файл может применяться в приложении NX в качестве исходной конфигурации для получения новой оптимизированной геометрии, что актуально на этапе разработки новой модели.

Несколько разных вариантов решений, что позволяет одновременно указать широкий набор проектных переменных и ограничений можно использовать в рамках одного процесса оптимизации.

Доступные типы решений для NX Nastran SOL 200:

- линейный статический (SESTATIC 101);
- определение собственных частот и форм колебаний (SEMODES 103);
- анализ устойчивости (SEBUCKL 105);
- частотные анализы (SEDCEIG 107, SEDFREQ 108, SEMSEIG 110, SEMFREQ 111);
- модальный переходной анализ (SEMTRAN 112).

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		24

От вида задачи зависит выбор целевой функции.

Таблица 2.2

Статистический анализ

Тип анализа	Целевые функции
Линейный статический (SESTATIC 101)	Объем, напряжение/деформация, перемещения, усилие реакции
Модальный (SEMODES 103)	Объем, номер формы собственной частоты
Устойчивость (SEBUCKL 105)	Номер формы потери устойчивости
Частотные	Динамические напряжения, перемещение, скорость, ускорение, значения частот
Модальный переходной (SEMTRAN 112)	Динамические напряжения, перемещение, скорость, ускорение, значения частот

В качестве проектных переменных определяют:

- свойства материалов (модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, плотность материала, коэффициент температурного расширения);
- физические свойства 2D элементов, в том числе свойства многослойных оболочек (толщины слоев, ориентация материалов);
- свойства 1D и 0D элементов (параметры сечений, инерционные и жесткостные характеристики, демпфирование);
- расположение узлов 2D, 1D и 0D элементов.

2.6 Методика разработки модели в Siemens NX

Так как программа использует только данные, введенные юзером, и внутренние решатели, при выполнении любого конечно-элементного расчета в Siemens NX необходимо четко понимать физику определяемого процесса. В случае некорректно поставленной пользователем задачи полученное решение будет неявным или неверным.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

Выполнение процедуры инженерного расчета геометрических форм методом конечных элементов в NX Advanced Simulation условно можно разбить на несколько шагов (рисунок 2.2). При этом в ходе создания модели и выполнения расчета создаются файлы, которые содержат определенные виды данных о расчетной модели.

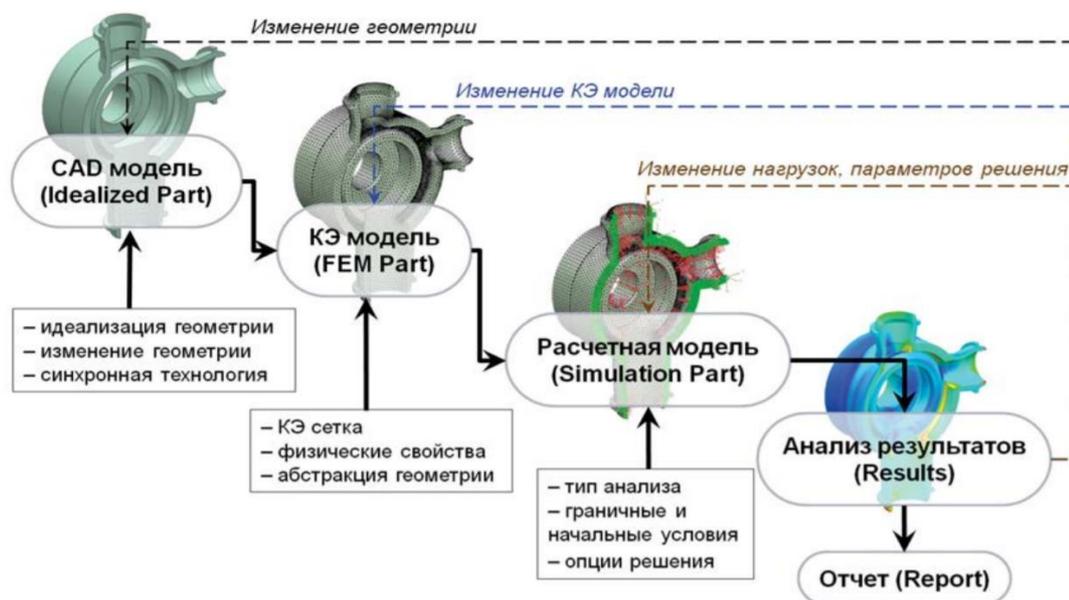


Рис. 2.2. Этапы создания расчётной модели

Ниже представлены этапы создания расчётной модели на примере простой балки с заделкой одной из плоскости и некоторой приложенной силой на одной из граней модели:

1. Создание идеальной геометрической модели.

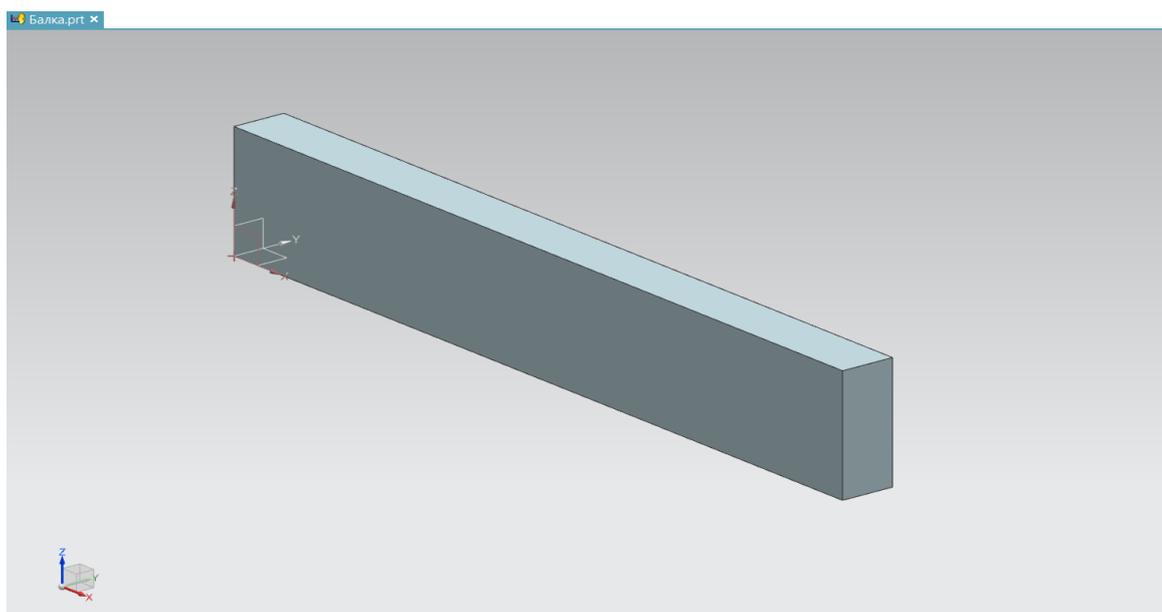


Рис. 2.3. Геометрическая модель

Корректная и максимально простая геометрическая модель должна быть построена для эффективного применения метода КЭ. Для этого необходимо провести идеализацию исходной геометрии. Необходимо исключить все геометрические элементы, которые приводят к усложнению используемой модели, технологические отверстия, скругления, фаски, но не оказывают влияния на предполагаемые результаты выполняемого расчета. Если в исходной геометрии имеются видимые поверхностные дефекты, то следует изменить соответствующие геометрические элементы.

2. Создание КЭ модели.

Задаются и хранятся физические свойства частей модели, такие как свойства материалов или параметры оболочечных и стержневых элементов, вес, помимо построения непосредственно КЭ сетки. Геометрия в созданном файле является полигональной, то есть состоит из фасетов, вершин и ребер. В дальнейшем именно полигональная геометрия используется для задания предназначенных правил генерации сетки, таких как количество или размер элементов на геометрическом объекте, абстракция геометрии.

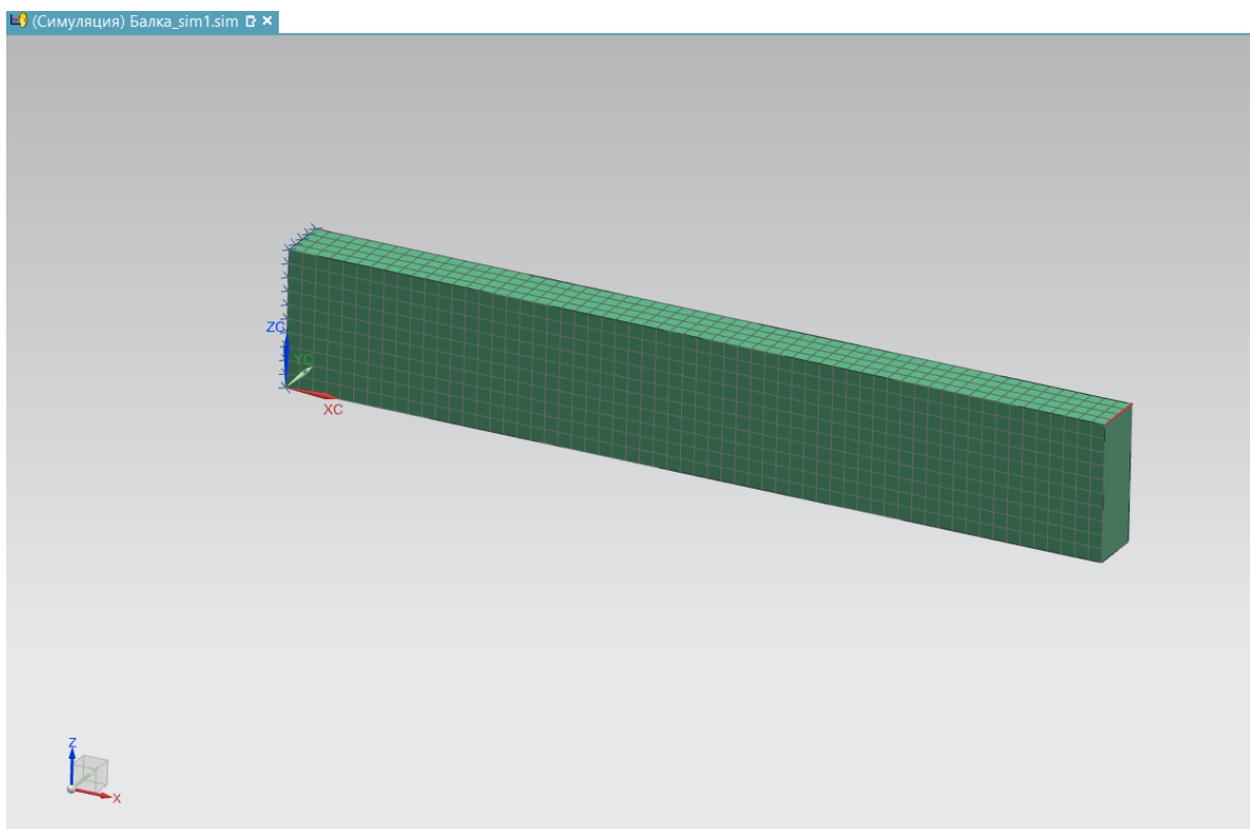


Рис. 2.4. КЭ модель

									Лист
									27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

В случае внесения изменений в исходную или идеализированную геометрию файл FEM непрерывно связан с идеализированной геометрией, то есть может быть обновлен автоматически. Приложение NX Расширенная симуляция (NX Advanced Simulation) может проводить численное моделирование не только для отдельных элементов конструкций, но и для нескольких деталей, объединенных в единую концепцию. В этом случае структура расчетной сборки немного отличается от структуры расчетной модели. Для генерации конечно-элементной модели сборки предварительно генерируются КЭ модели каждой из деталей, а затем создается КЭ модель сборки AFEM, где все КЭ модели деталей объединяются в единую сборку. При этом позиционирование КЭ моделей отдельных моделей относительно друг друга в сборке происходит автоматически в соответствии с их исходным положением в CAD-сборке. В случае отсутствия исходной CAD-сборки можно использовать специальные инструменты для позиционирования КЭ моделей отдельных моделей вручную.

3. Создание расчетной модели.

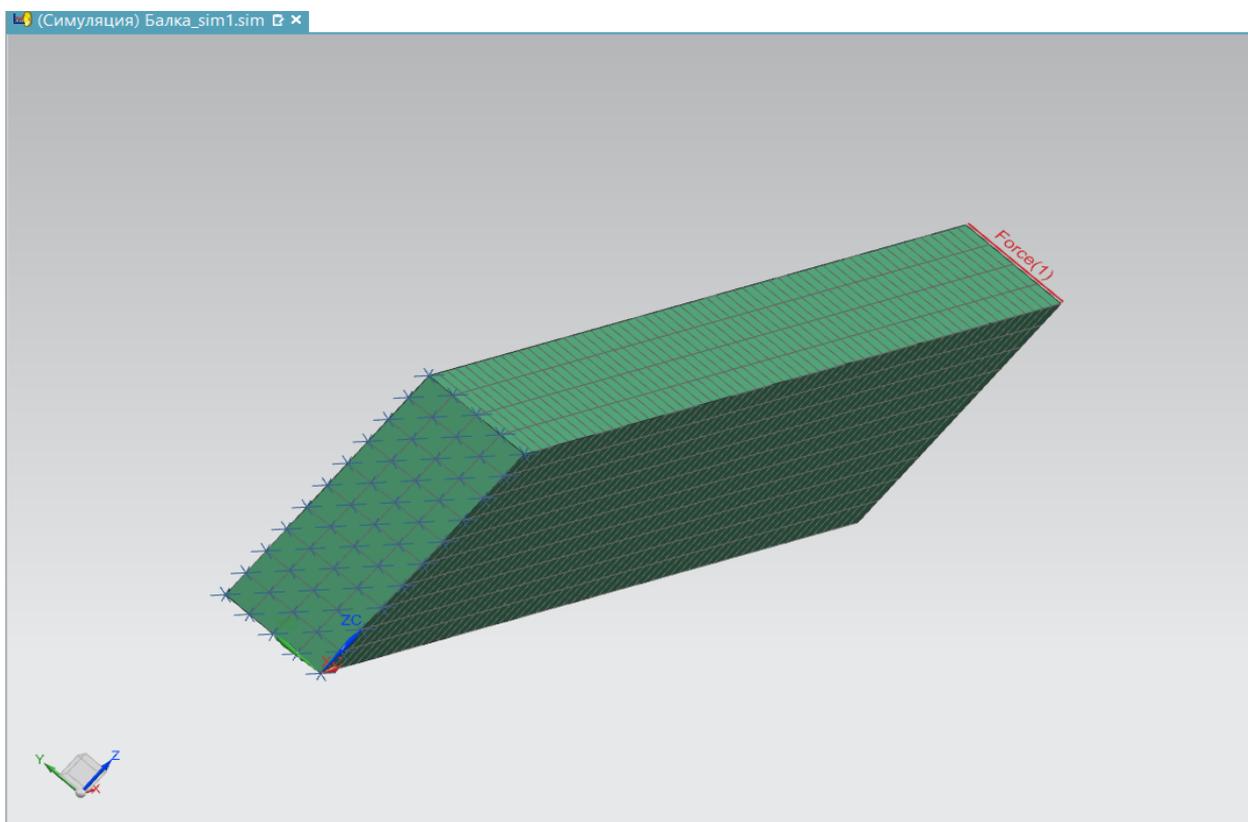


Рис. 2.5. Расчётная модель

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

На данном этапе необходимо выбрать решатель и тип решения. В нашем случае был использован решатель NX Nastran и тип решения SOL200 оптимизация топологии. Важные моменты при использования оптимизации топологии: необходимо указать область проектирования (обычно выбирается модель целиком), цель проектирования (минимизация веса). Так же указываем тип закрепления (заделка, простое опирание, болтовое соединение), тип нагрузки (сила, давление и т.д.).

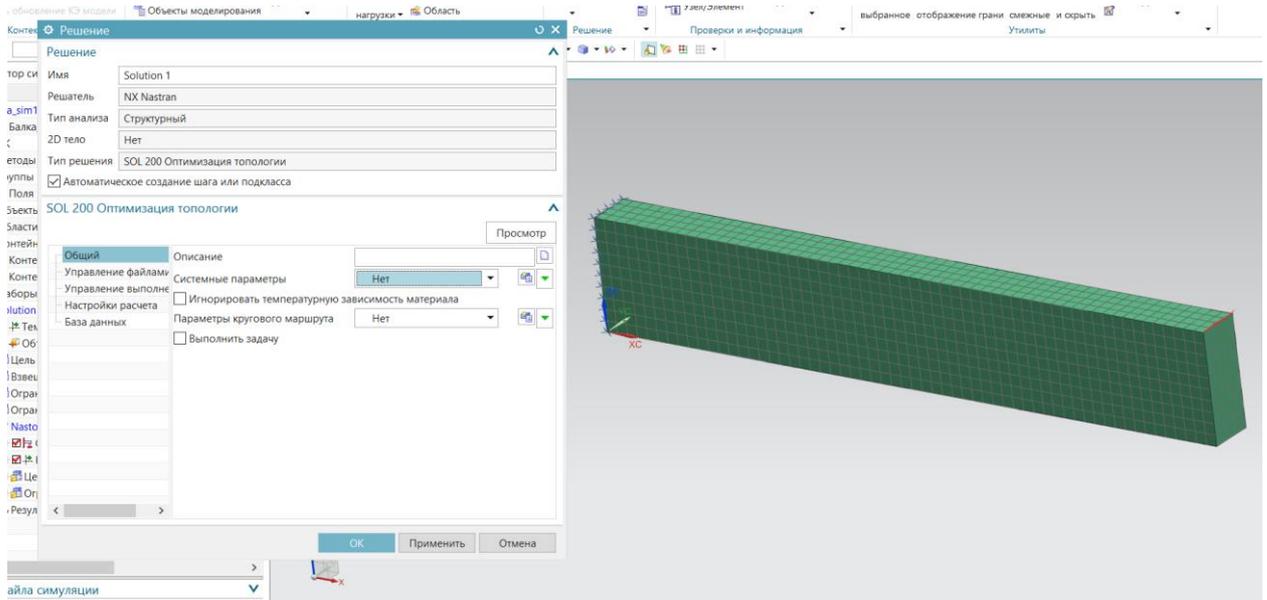


Рис. 2.6. Установка типа решения SOL200 Оптимизация топологии

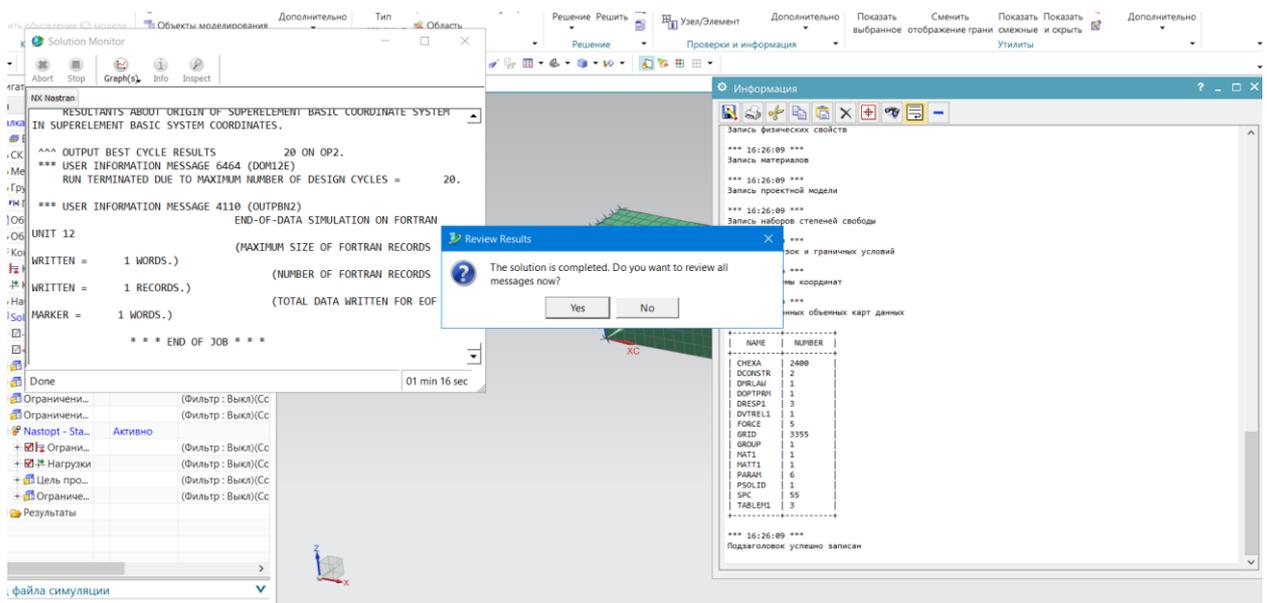


Рис. 2.7. Мониторинг хода решения

Во время мониторинга хода решения можно отслеживать какие циклы дизайна в данный момент решается, просмотреть графики изменения целевой

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

функции. В конце хода решения можно увидеть какой цикл дизайна был лучшим и оценить время решения задачи.

4. Анализ полученных результатов.

Программный комплекс выводит результаты расчета в виде графического отображения распределения видов нагружения.

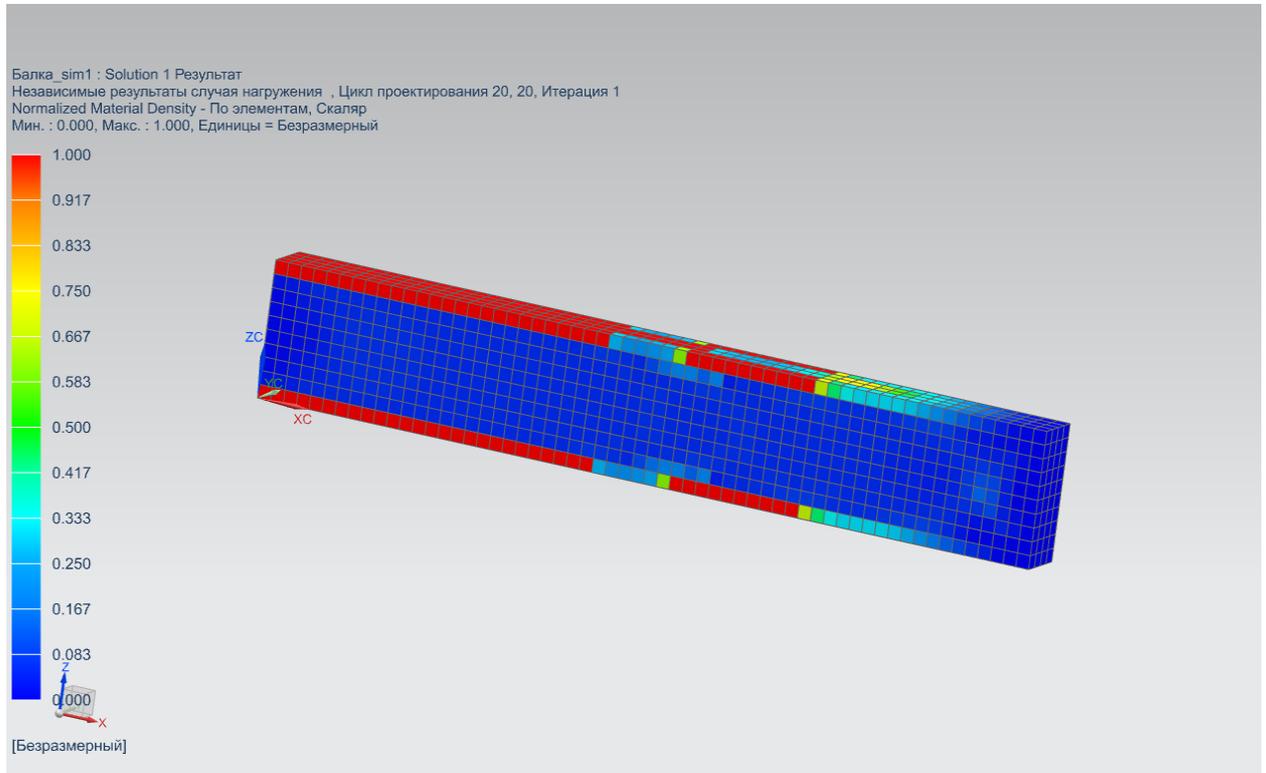


Рис. 2.8. Относительная плотность конечных элементов модели

На рис. 2.8 можем наблюдать результаты расчета относительной плотности конечных элементов модели. Данные представляются в графическом и в виде численной шкалы, диапазон варьируется от 0 до 1, где 1 – отображения распределения нагрузки по относительной плотности конечных элементов модели.

									Лист
									30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ				

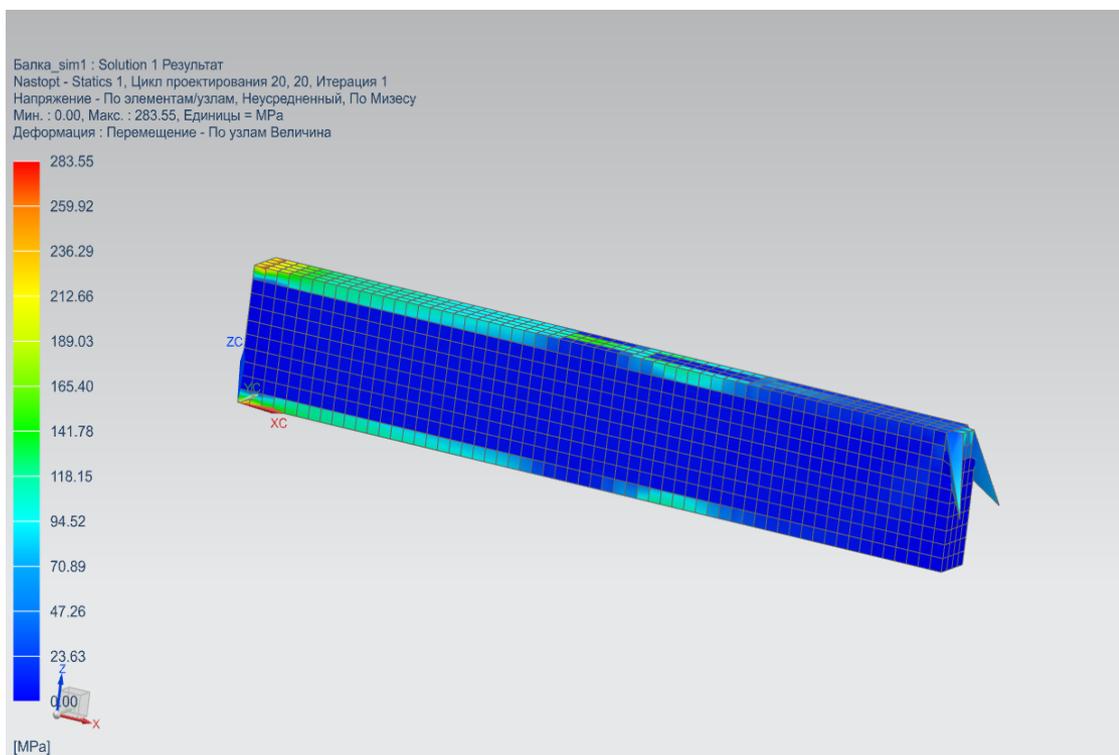


Рис. 2.9. Отображение результатов на деформацию

Следующий необходимый отчет – это результат на деформацию: напряжение. Показывается графическое отображение напряжения и численное, единицы измерения - МПа.

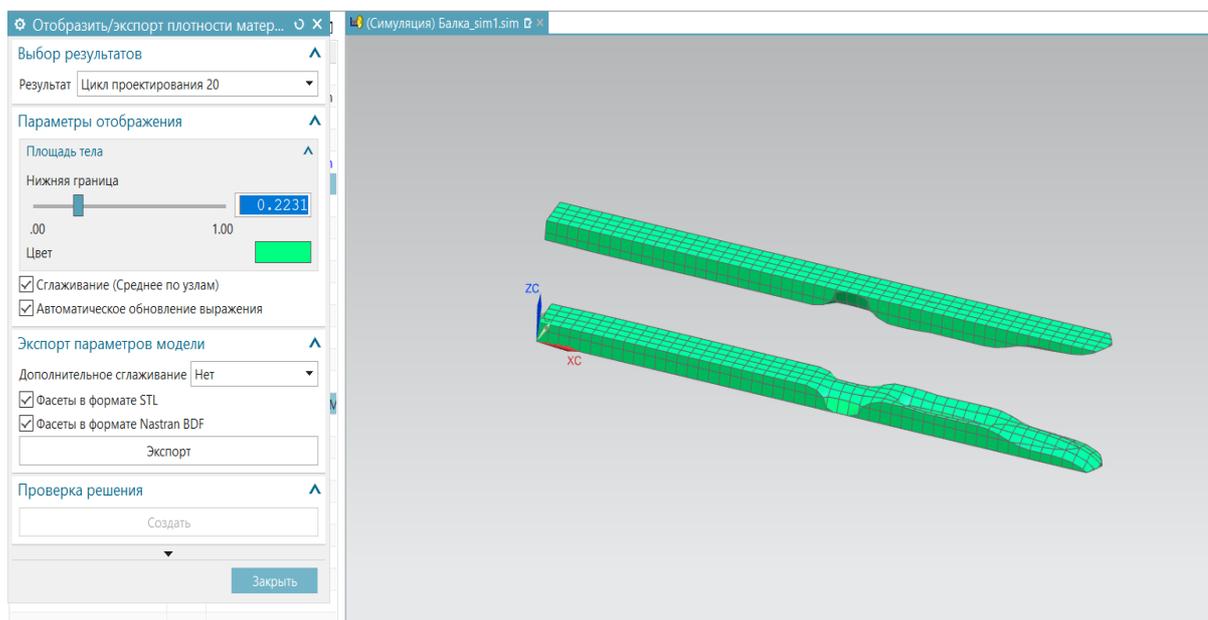


Рис. 2.10. Отображение плотности материала

Так же можно увидеть отображение плотности распределения нагрузки по материалу. Благодаря этому графику можно понять в каком направлении продолжать выполнить оптимизацию геометрии модели.

Глава III. РАСЧЕТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Анализ условий нагружения кронштейна навески двигателя

Несмотря на то, что современные дизельные силовые агрегаты Cummins имеют отличную уравновешенность, во время работы любого двигателя возникает вибрация, которая не должна передаваться на шасси, а вследствие не должна ощущаться водителем транспортного средства как нежелательная и неприятная вибро-шумовая нагрузка. Поэтому крепление силового агрегата должно быть спроектировано таким образом, чтобы уменьшить передачу излишних вибраций на шасси автомобиля и предотвратить возникновение напряжений в местах крепления к блоку цилиндров при кренах и перекосах шасси при различных режимах движения.

На силовых агрегатах Cummins ISB6,7 E5 используется подвеска в 4 точках: 2 спереди и 2 сзади. Общий вид двигателя можно наблюдать на рис. 3.1.



Рис. 3.1 Общий вид двигателя Cummins ISB6,7 E5 250

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		32

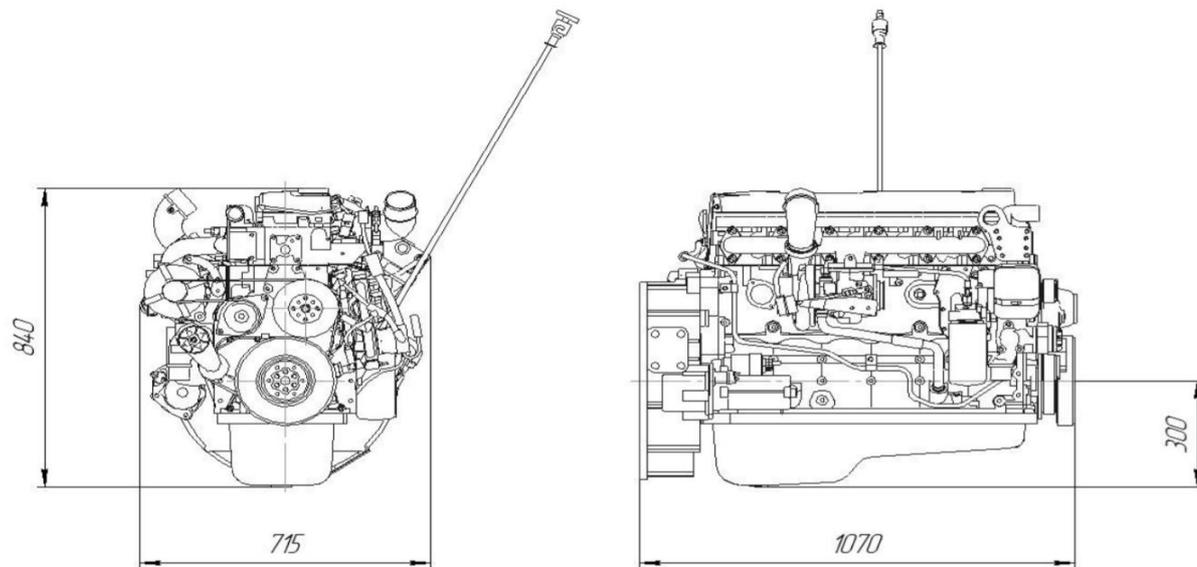
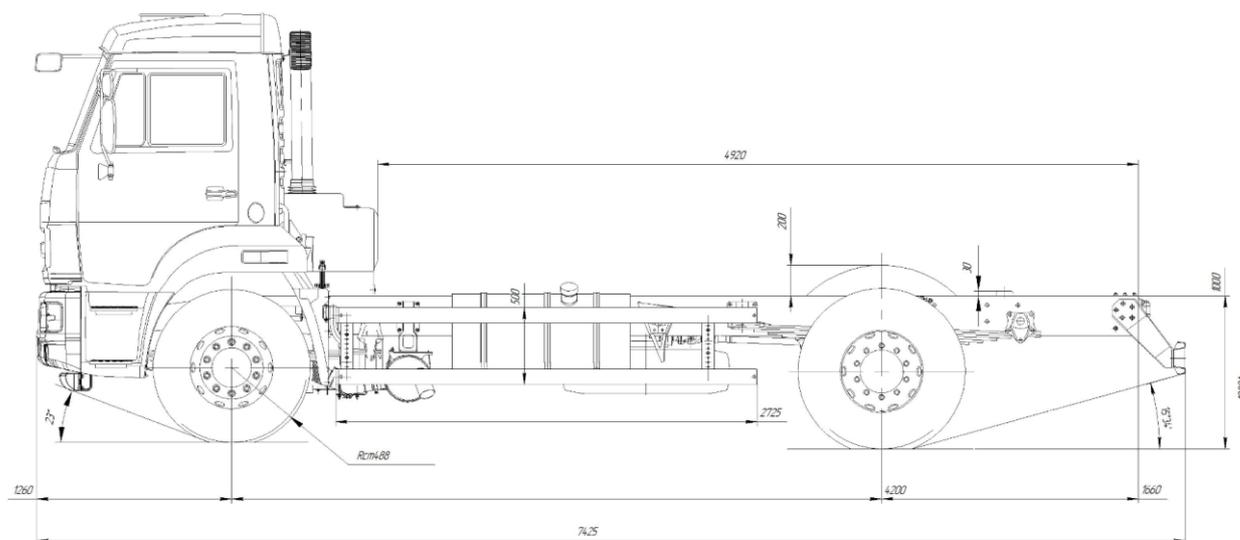


Рис. 3.2. Принципиальная схема двигателя Cummins ISB6,7 E5 250

На рис. 3.2 представлена принципиальная схема двигателя с указанием габаритных размеров, а также габаритная схема шасси КАМАЗ 43253 (рис. 3.3).



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

33

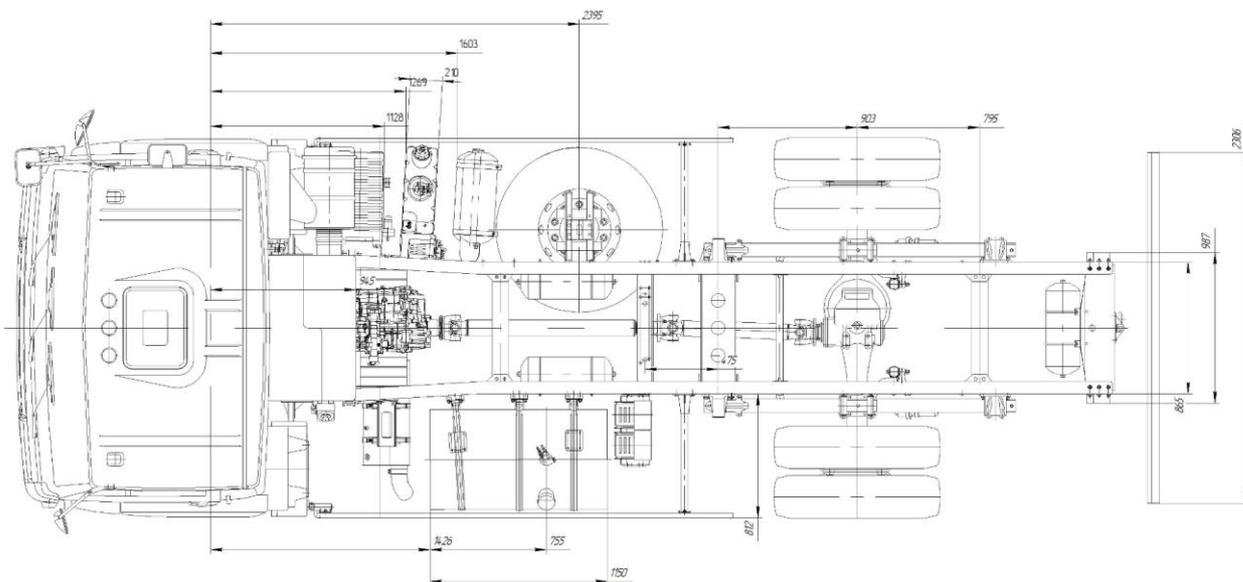


Рис. 3.3. Габаритная схема шасси КАМАЗ-43253

Передние опоры состоят из кронштейна, соединенного с блоком цилиндров, резиновой подушки и стяжки связанной с кронштейном, приклепанным к раме автомобиля.



Рис. 3.4. Передняя опора двигателя КАМАЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

34

Задние опоры состоят из кронштейна двигателя, установленного на картере маховика и кронштейна опоры, приклепанной к шасси автомобиля и имеющие в соединении демпфирующий резиновый элемент.



Рис. 3.5. Задний кронштейн двигателя КАМАЗ

3.2 Определение реакций на опорах двигателя

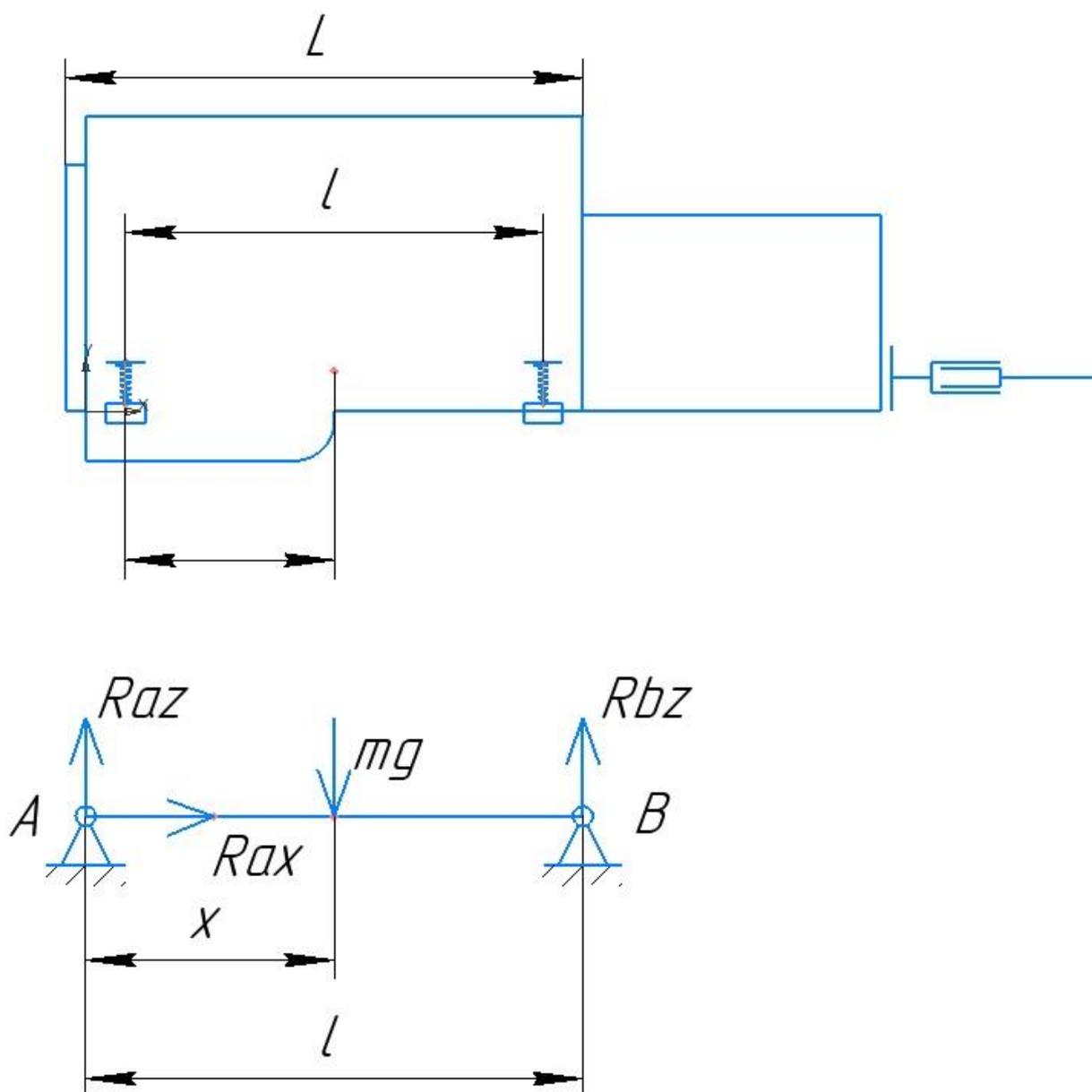


Рис. 3.6. Расчетная схема для определения реакций на опорах

Данная схема приведена для определения сил реакций на опорах для автомобиля, стоящего неподвижно на горизонтальной поверхности.

Вследствие температурного расширения материалов корпуса силового агрегата необходимо определить величину изменения конструктивных размеров:

$$\Delta l = dl * dt = 10^{-6} * 800 * 50 = 0.04 \text{ мм}, \quad (3.1)$$

при $l=800$

Величина $\Delta l = 0.04$ мм является допустимой и несущественной, поэтому в расчет учитываться не будет.

3.3 Расчет нагружения опор при движении с ускорением по наклонной поверхности

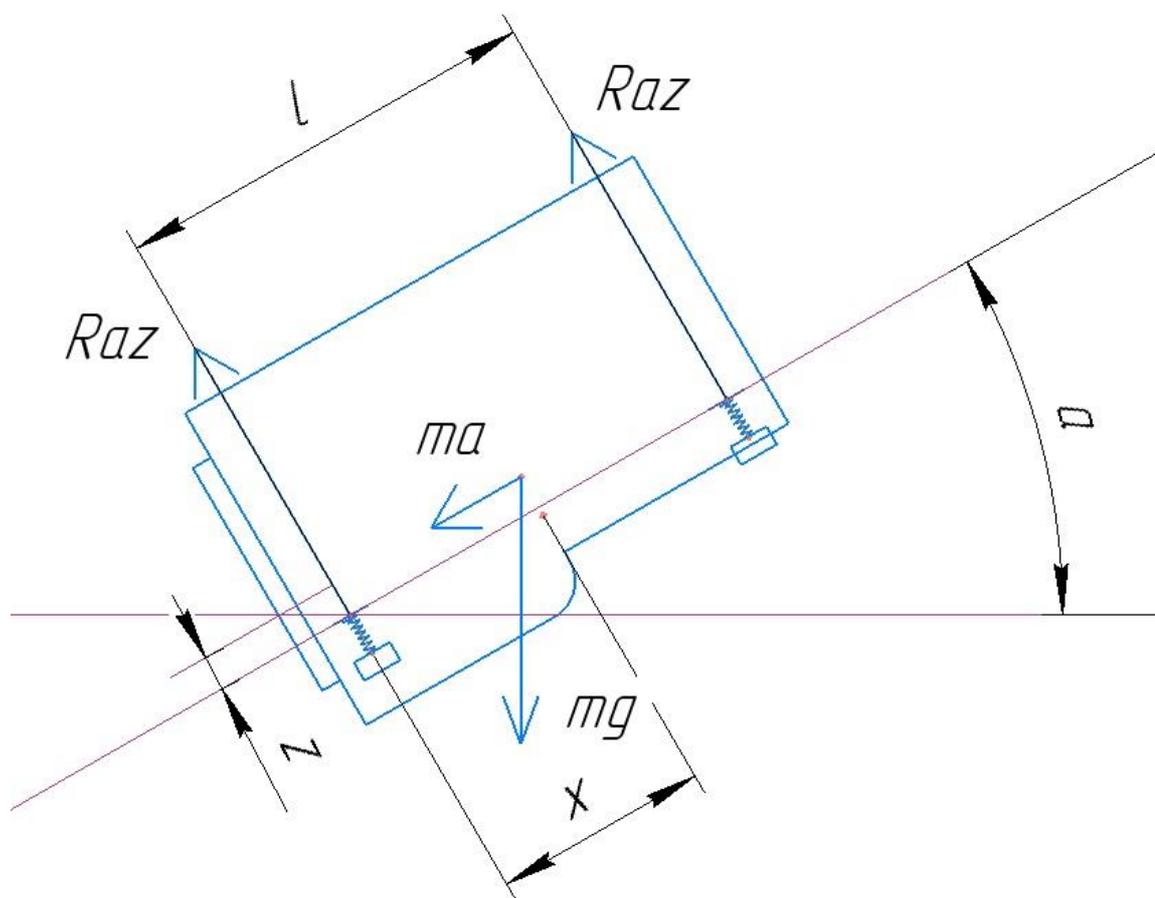


Рис. 3.7. Схема для расчета нагружения опор

Расчет нагружения опор при движении с ускорением по наклонной поверхности необходим для правильного расчета сумм сил, действующих на кронштейн при статической и динамической нагрузках. Следует учитывать вес силового агрегата, силу тяжести, центростремительное ускорение, результирующая сила, угол наклона поверхности.

$$\sum F_z = R_{AZ} + R_{BZ} - mg * \cos\alpha - ma * \sin\alpha = 0; \quad (3.2)$$

$$\sum F_x = R_{ax} - ma - mg * \sin\alpha = 0; \quad (3.3)$$

$$\sum M_A = ma * z + R_{BZ} = 0. \quad (3.4)$$

Так же необходимо рассчитать для движения с ускорением в гору:

$$\sum F_z = R_{AZ} + R_{BZ} + mg * \cos\alpha + ma * \sin\alpha = 0; \quad (3.5)$$

$$\sum F_x = R_{ax} + ma + mg * \sin\alpha = 0; \quad (3.6)$$

$$\sum M_A = ma * z - R_{BZ} = 0. \quad (3.7)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

3.4 Расчет дополнительных нагрузок на опорах за счет реактивного крутящего момента

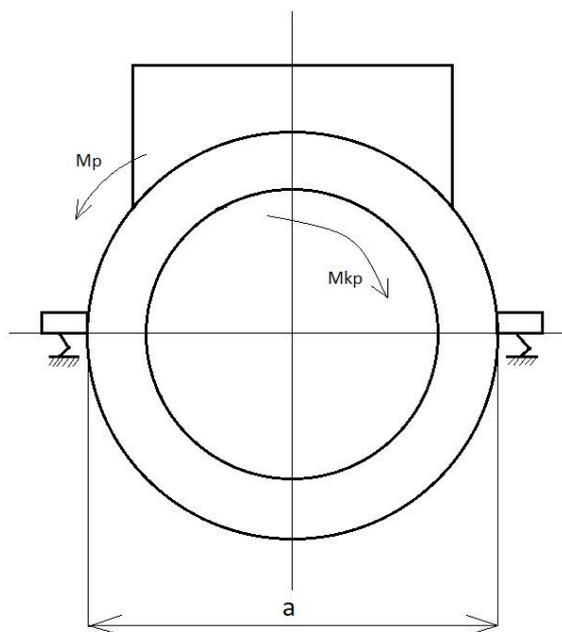


Рис. 3.8. Схема расчета реактивного крутящего момента

Для расчета дополнительных нагрузок на опоры необходимо рассчитать усилие, прилагаемое от силового агрегата за счет реактивного крутящего момента двигателя P_{My} :

$$P_{My} = \frac{2M_p}{a} = \frac{2 \cdot 937}{0,7} = 2677 \text{ Нм}, \quad (3.8)$$

где M_p - Макс. полезный крутящий момент, Нм

3.5 Расчет дополнительных нагрузок на опорах при движении по радиусной поверхности

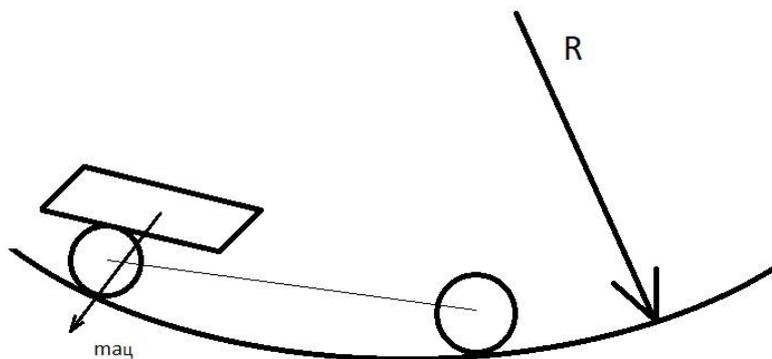


Рис. 3.9. Схема для определения дополнительных нагрузок

Определим $a_{ц}$ центростремительное ускорение при движении по радиусной поверхности:

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R} = \frac{90000}{3600 \cdot 20} = 1,25 \text{ м/с}^2 \quad (3.9)$$

3.6 Расчет дополнительных нагрузок на опору за счет предварительной затяжки болтовых соединений

Данный расчет дополнительных нагрузок на опору за счет предварительной затяжки болтовых соединений необходим для того, чтобы резиновый демпфирующий элемент не имел люфта в местах крепления к кронштейну силового агрегата и посадочного места на шасси автомобиля.

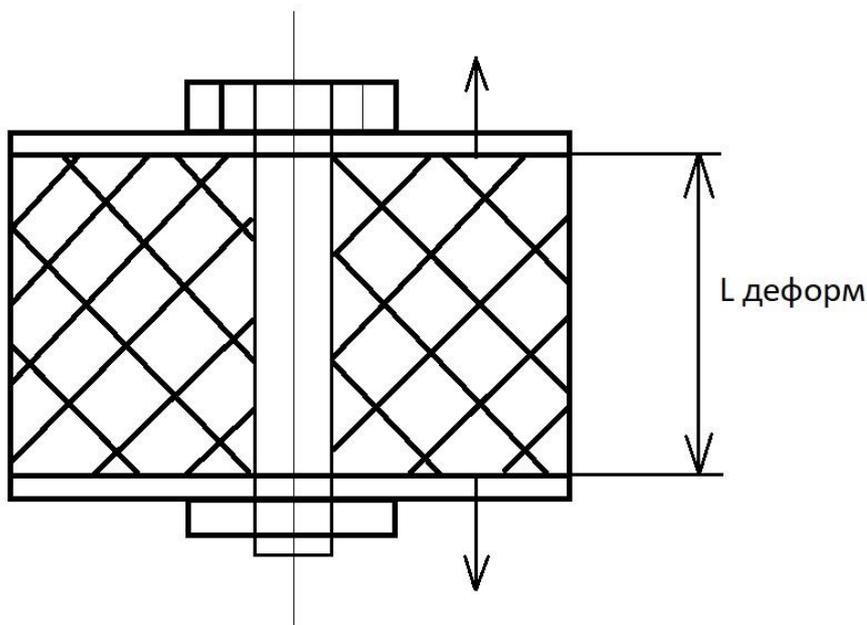


Рис. 3.10. Схема для определения дополнительных нагрузок

$$l_{п} - l_{п \text{ деформ}} = \Delta l = \frac{PF}{l_{п} * E}; \quad (3.10)$$

3.7 Определение геометрии кронштейна

Возможны несколько вариантов установки кронштейна на двигатель. Рассмотрим некоторые из них.

С завода на автомобили с данным силовым агрегатом устанавливается следующий тип кронштейнов:



Рис. 3.11. Передний кронштейн двигателя (вид сбоку)

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40



Рис. 3.12. Передний кронштейн двигателя (вид сверху)



Рис. 3.13. Задний кронштейн двигателя

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

На основе стандартной компоновки двигателя и шасси, разработаем новые конструкции опор силового агрегата методом топологической оптимизации с целью повышения жесткости и снижения массы детали.

Рассмотрим варианты.

Модель 1. Тестовый вариант.

В данном случае была разработана пробная версия кронштейна для V-образных двигателей КАМАЗ. На рисунке показана компоновка деталей.

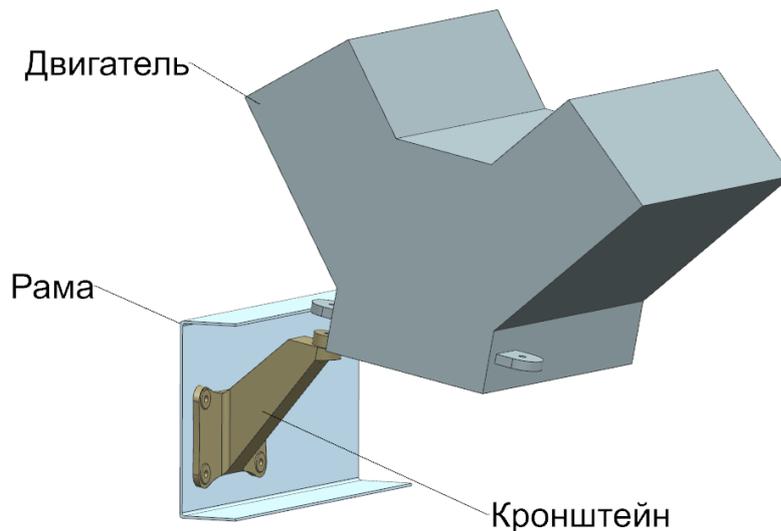


Рис. 3.14. Компоновка деталей

Проведем анализ зависимости топологической оптимизации от таких параметров, как габариты, модуль упругости материала и приложенная сила.

Рассмотрим результаты полученных вариаций данной модели, а также несколько итераций улучшения топологии модели.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42

Модель 1. Итерация 1. Исходная геометрия.

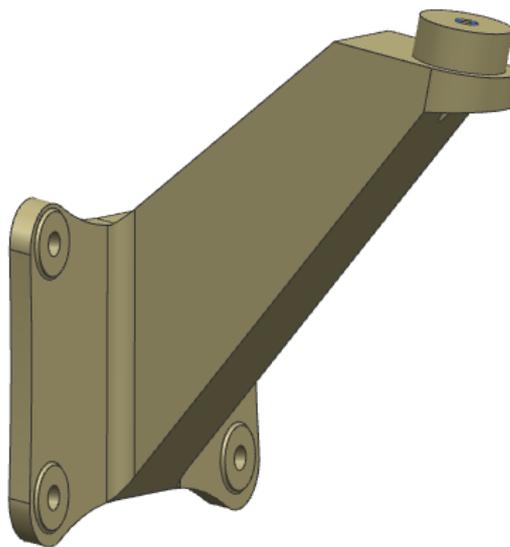


Рис. 3.15. Общий вид модели 1

Исходная геометрия построена с учетом габаритных и конструктивных размеров: диаметры крепежных отверстий, расстояние между ними, размеры выноса и ответной части крепежа. В данном случае модель является тестовой и размеры выбраны произвольно под V-образный тип двигателя.

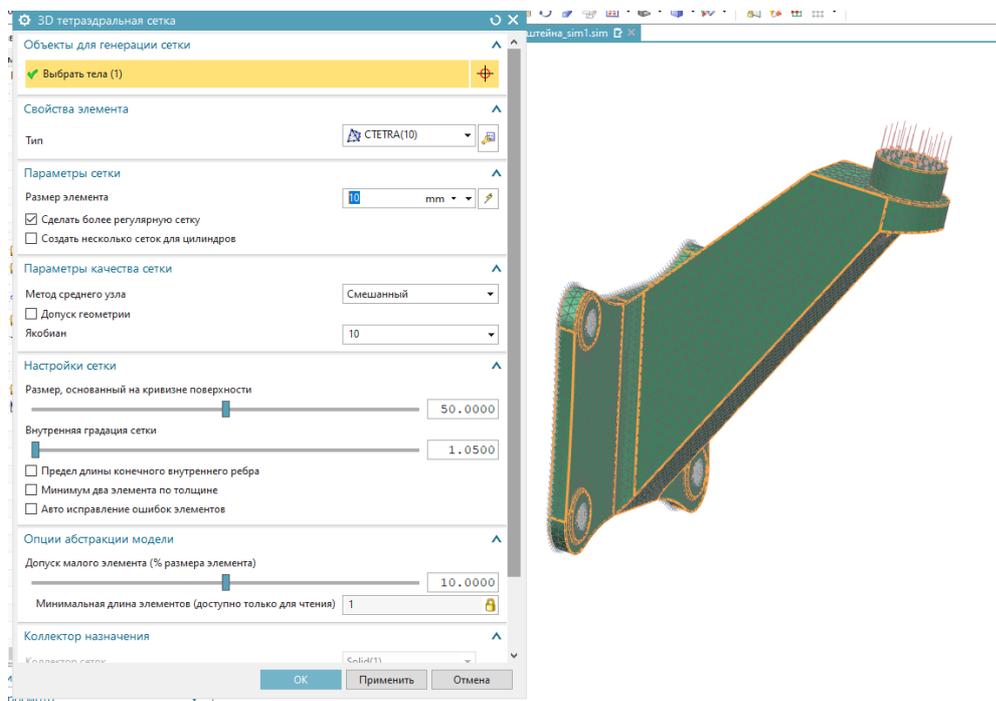


Рис. 3.16. КЭ сетка

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

43

Информация о сетке

Информация о сетке

Имя : 3d_mesh(1)
Тип сетки : 3D
Число элементов в сетке : 10503
Число узлов в сетке : 19277
Tetra10 элементов : 10503

==== Ориентация материала
Метод ориентации материала : Таблица физических свойств

Слой : 1
Наследованный материал : Steel

Информация о коллекторе сетки

Имя : Solid(1)
Тип : Solid

==== Физические свойства

Свойство тела : PSOLID1
Имя : PSOLID1
Тип : PSOLID1
Метка : 1
Материал : Наследованные от геометрии
Наследованный материал для 3d_mesh(1) : Steel
Задание CORDM : Задаваемый пользователем
CORDM : Абсолютно
Метод интегрирования : По умолчанию
Вывод напряжений : По умолчанию
Схема интегрирования : По умолчанию

ИНФОРМАЦИЯ О МЕТОДЕ СЕТКИ

Element Type : CTETRA(10)

==== Параметры сетки

Размер элемента : 10 mm
Сделать более регулярную сетку : истина
Создать несколько сеток для цилиндров : ложь
Переход с пирамидальными элементами : ложь

==== Параметры качества сетки

Метод среднего узла : Смешанный
Допуск геометрии : ложь
Якобиан : 10

==== Настройки сетки

Размер, основанный на кривизне поверхности: 87.8
Внутренняя градация сетки : 1.05
Предел длины конечного внутреннего ребра: ложь
Минимум два элемента по толщине : ложь
Авто исправление ошибок элементов : ложь

==== Опции абстракции модели

Допуск малого элемента (% размера элемента): 17.7
Минимальная длина элементов (доступно только для чтения): 4.9029

										Лист
										44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Концепт_кронштейна_sim1 : Solution 1 Результат
 Nastopt - Statics 1, Цикл проектирования 20, 20, Итерация 1
 Напряжение - По элементам/узлам, Неусредненный, По Мизесу
 Мин. : 0.00, Макс. : 13.01, Единицы = МПа
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

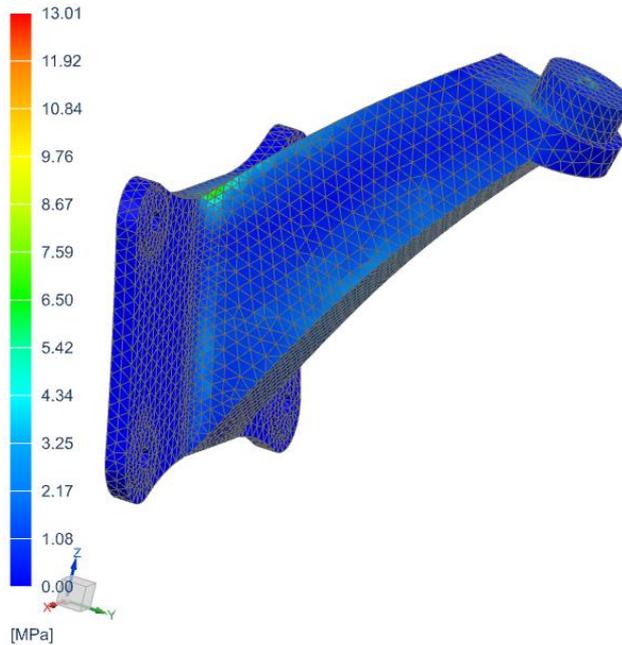


Рис. 3.17. Отображение результатов распределения напряжений

В изначальной геометрии используется слишком большое количество материала, вследствие чего и напряжение составляют все 13.01 МПа, что является ничтожно малым, с учетом предела текучести материала Сталь 550 МПа.

Концепт_кронштейна_sim1 : Solution 1 Результат
 Nastopt - Statics 1, Цикл проектирования 0, 0, Итерация 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0, Макс. : 0.00729699, Единицы = mm
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

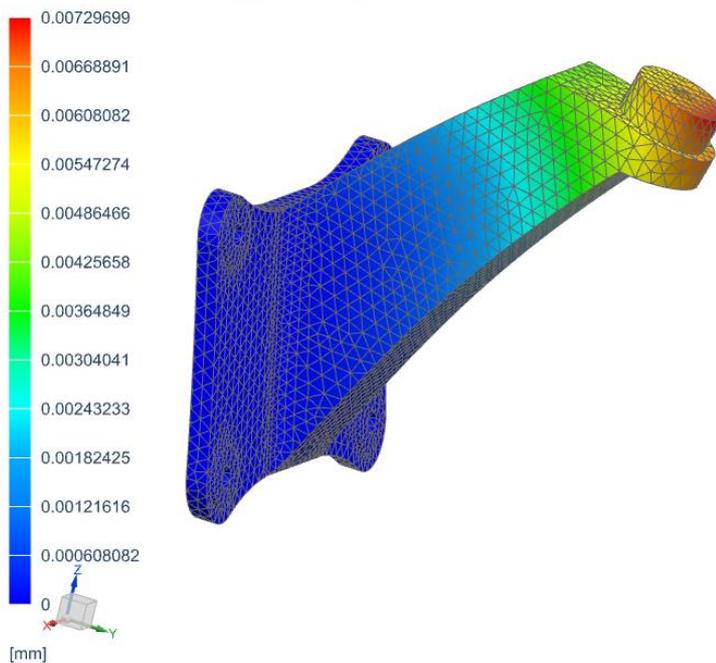


Рис. 3.18. Отображение результатов деформации – перемещение

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

Как видно на графике максимальное перемещение по узлам составляет 0.00729 мм, что так же является ничтожно малой величиной. Модель требует оптимизации.

Теперь перейдём к рассмотрению результатов решения задачи топологической оптимизации.

Концепт_кронштейна_sim1 : Solution 1 Результат
 Независимые результаты случая нагружения , Цикл проектирования 20, 20, Итерация 1
 Normalized Material Density - По элементам, Скаляр
 Мин. : 1.15379e-05, Макс. : 0.000346905, Единицы = Безразмерный

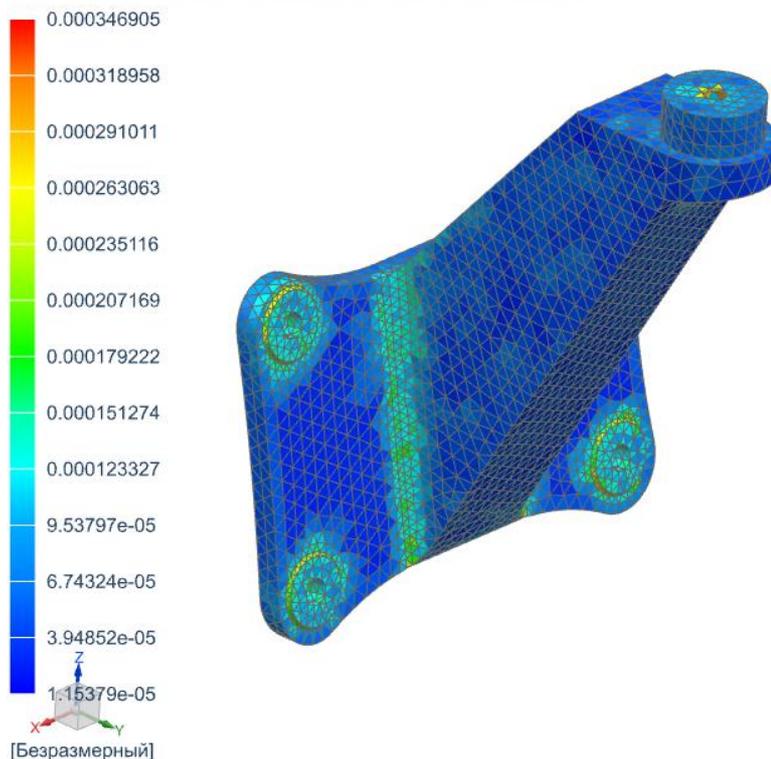


Рис. 3.19. Отображение относительной плотности конечных элементов модели

На рис. 3.19 можно проанализировать результаты решения задачи топологической оптимизации в виде представления результатов относительной плотности конечных элементов модели. По результатам данного графика можно понять, что основная относительная плотность конечных элементов модели распределяется в узлах и на основных несущих гранях. Далее изучим результаты отображения распределения плотности материала.

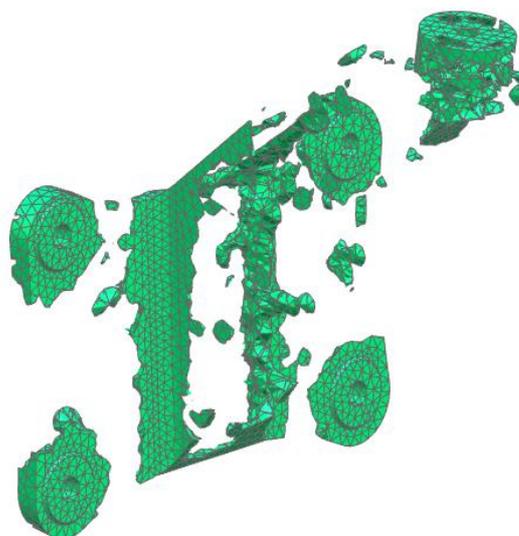


Рис. 3.20. Отображение распределения плотности материала

Данный рисунок наглядно даёт понять как распределяется нагрузка по детали в целом. С учётом этих данных мы можем провести улучшение геометрии конструкции.

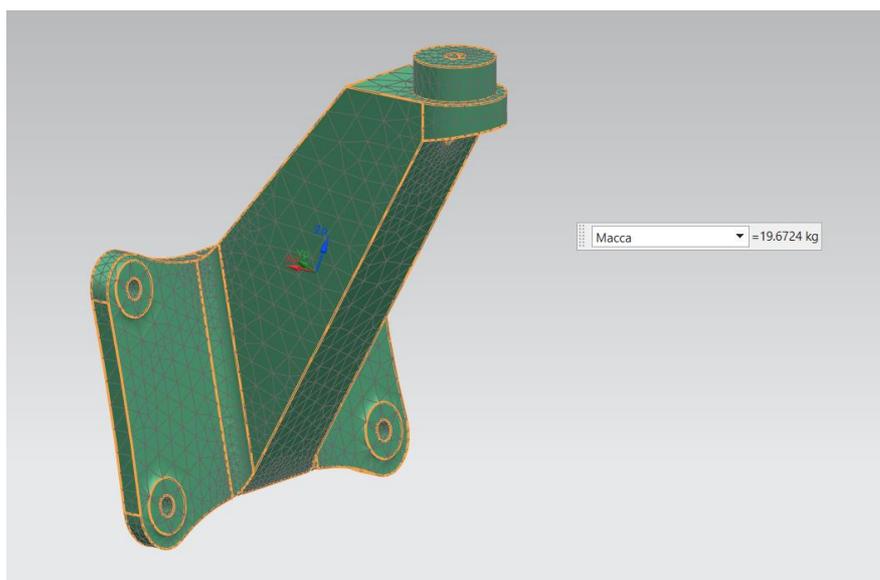


Рис. 3.21. Измерение массы детали

Очень важно заметить, что благодаря неразумному использованию материала, масса детали составляет более 19 кг. Это приведёт к нежелательному увеличению общей массы транспортного средства и колоссальной трате материала при изготовлении.

Перейдем к рассмотрению результатов первичной улучшении геометрии детали на основе полученных данных.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		47

Модель 1. Итерация 2

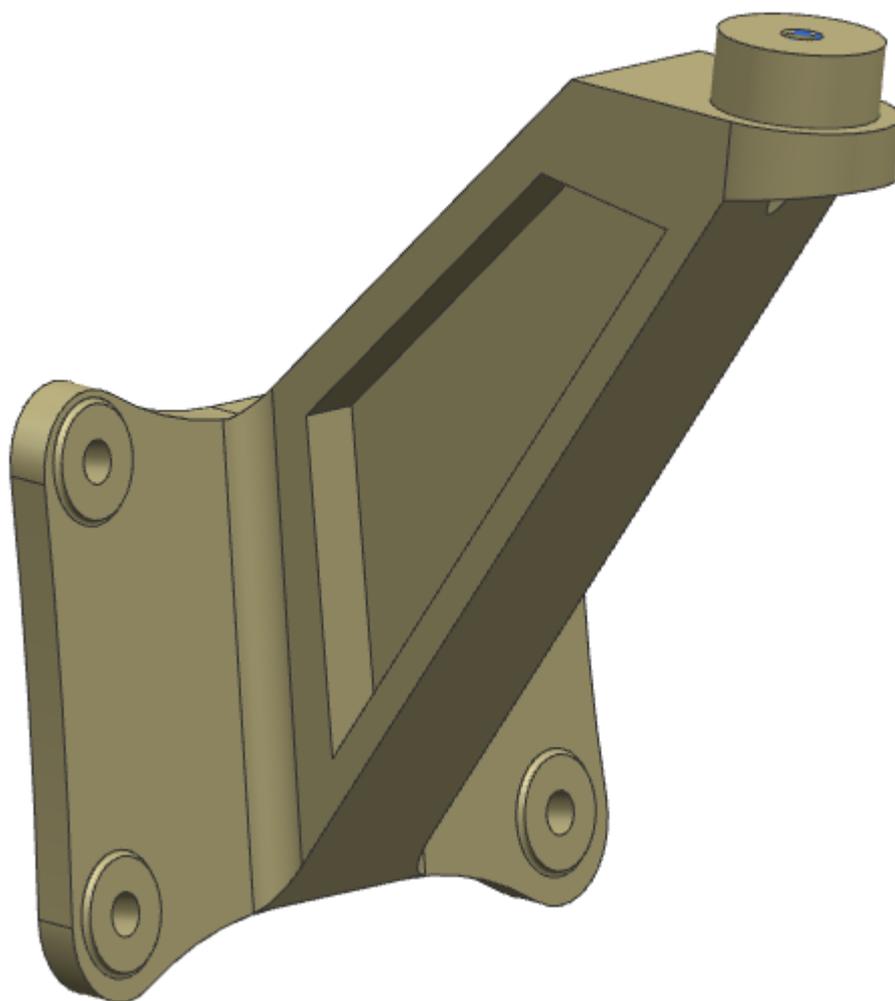


Рис. 3.22. Общий вид модели 1. Итерация 2

По результатам полученных при оптимизации исходной геометрии пришли к выводу о том, что необходимо привести модель к виду двутавра. Рассмотрим результаты анализа на напряжение и перемещение, а также новую модель распределения нагрузки по материалу.

Как видно на рис. 3.23. возросло напряжение и составляет максимально 207.46 МПа. Напомним что предел текучести материала сталь - 550 МПа.

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

Напряжение - По элементам/узлам, Неусредненный, По Мизесу
 Мин. : 0.00, Макс. : 207.46, Единицы = МПа
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

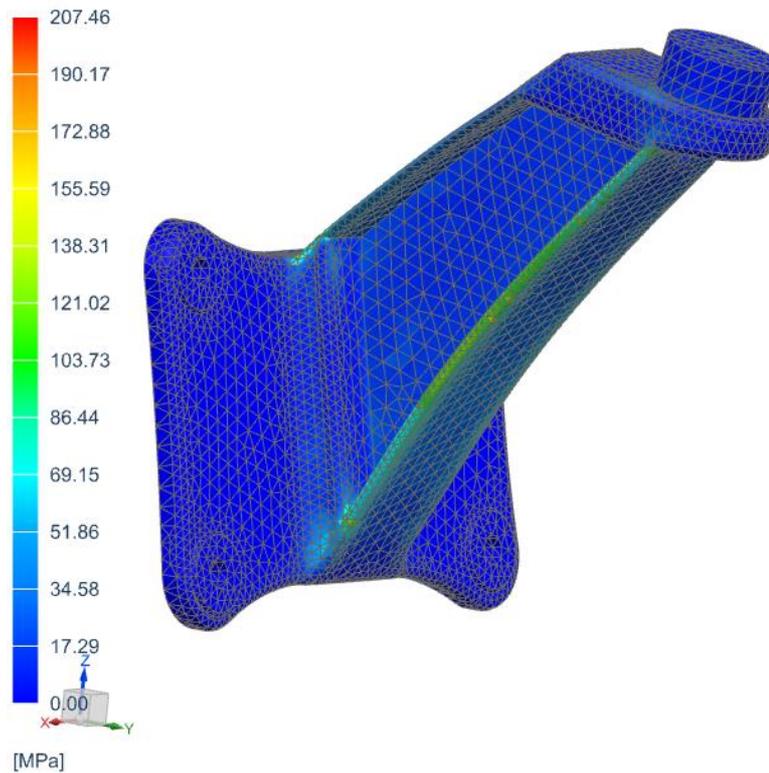


Рис. 3.23. Отображение результатов распределения напряжений

Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.000, Макс. : 0.165, Единицы = mm
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

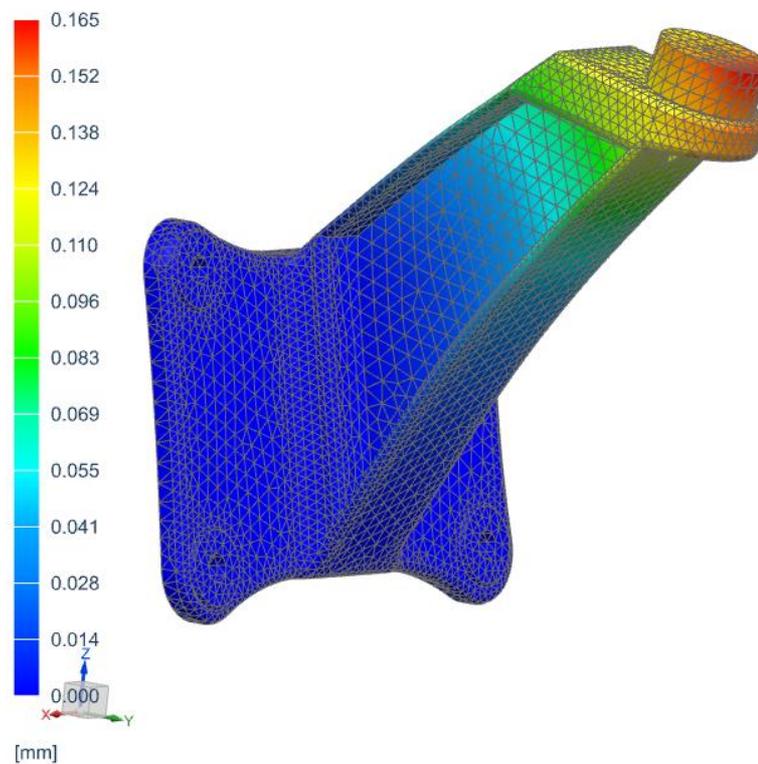


Рис. 3.24. Отображение результатов деформации – перемещение

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

49

Как видно на графике максимальное перемещение по узлам составляет 0.165 мм, что так же является малой величиной. Модель требует дальнейшей оптимизации.

Теперь перейдём к рассмотрению результатов решения задачи топологической оптимизации.

Крон 1 опт 22222_sim1 : Solution 1 Результат
 Независимые результаты случая нагружения , Цикл проектирования 20, 20, Итерация 1
 Normalized Material Density - По элементам, Скаляр
 Мин. : 8.08347e-06, Макс. : 0.000352748, Единицы = Безразмерный

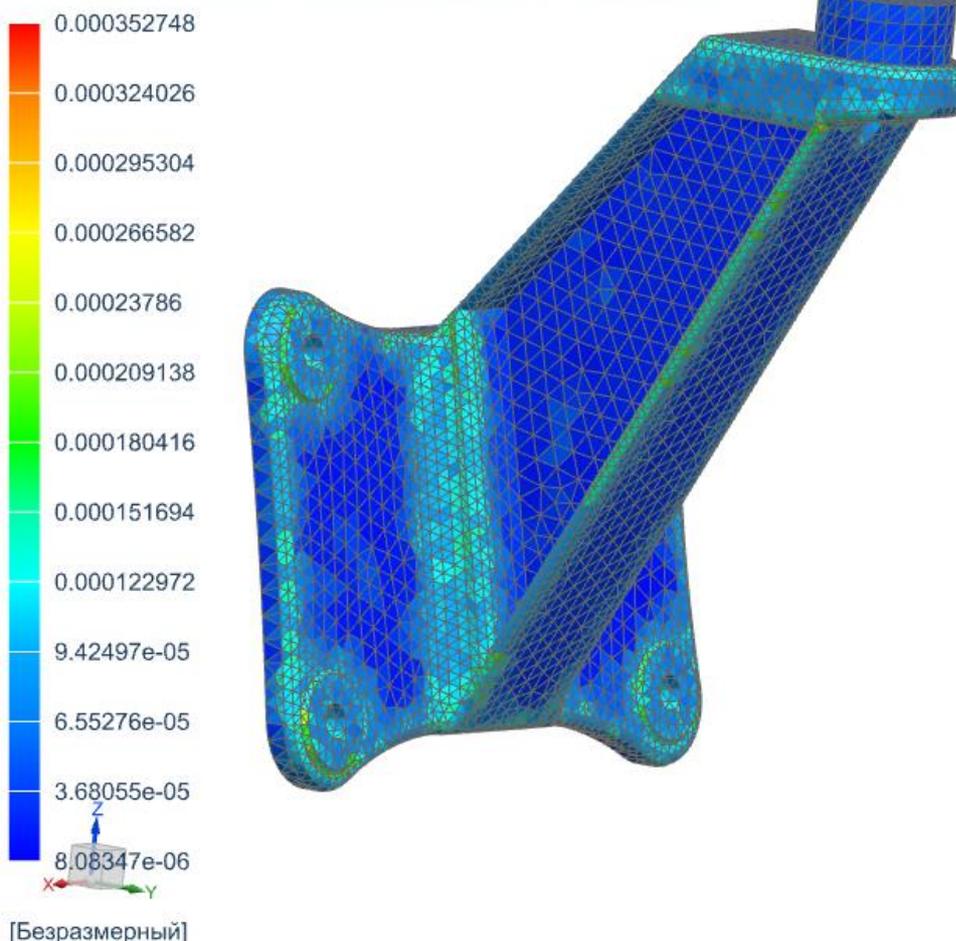


Рис. 3.25. Отображение относительной плотности конечных элементов модели

На рис. 3.25 можно проанализировать результаты решения задачи топологической оптимизации в виде представления результатов относительной плотности конечных элементов модели. По результатам данного графика можно понять, что основная относительная плотность конечных элементов модели распределяется в узлах и на основных несущих гранях. Далее изучим результаты отображения распределения плотности материала.

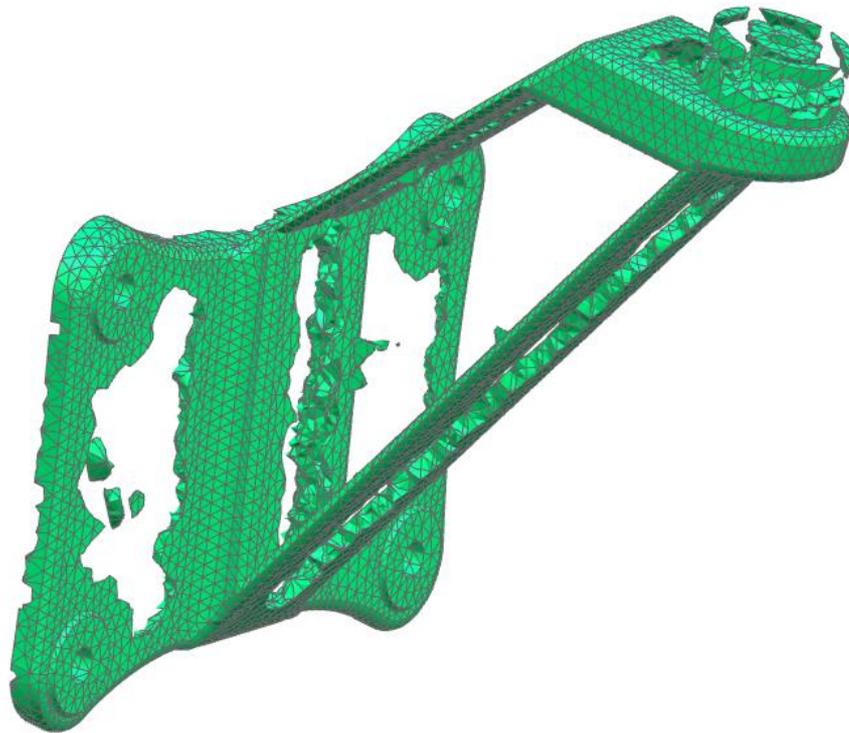


Рис. 3.26. Отображение распределения плотности материала

Рисунок 3.26 наглядно даёт понять, что нагрузка распределится по несущим граням. С учётом этих данных мы можем провести улучшение геометрии конструкции.

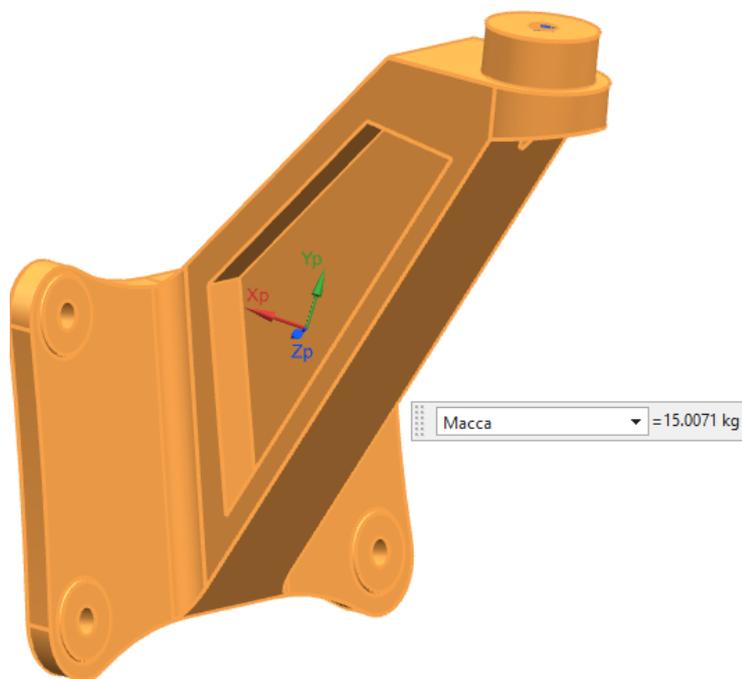


Рис. 3.27. Измерение массы детали

Как видно масса снизилась с 19 кг до 15 кг.

Перейдём к рассмотрению финальной итерации улучшения данной модели.

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

Модель 1. Итерация 3



Рис. 3.28. Общий вид модели 1 итерация 3

В данной итерации мы убрали материал, не участвующий в распределении нагрузки, но также старались сохранить на достаточном уровне жесткость и прочность конструкции. Рассмотрим результаты расчета.

Как видно на рис. 3.29. возросло напряжение и составляет максимально 354.96 МПа. Напомним что предел текучести материала сталь - 550 МПа. Мы все еще имеем большой запас по пределу текучести.

Крон 1 опт 22222_sim2 : Solution 1 Результат
 Nastopt - Statics 1, Цикл проектирования 20, 20, Итерация 1
 Напряжение - По элементам/узлам, Неусредненный, По Мизесу
 Мин. : 0.00, Макс. : 354.96, Единицы = МПа
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

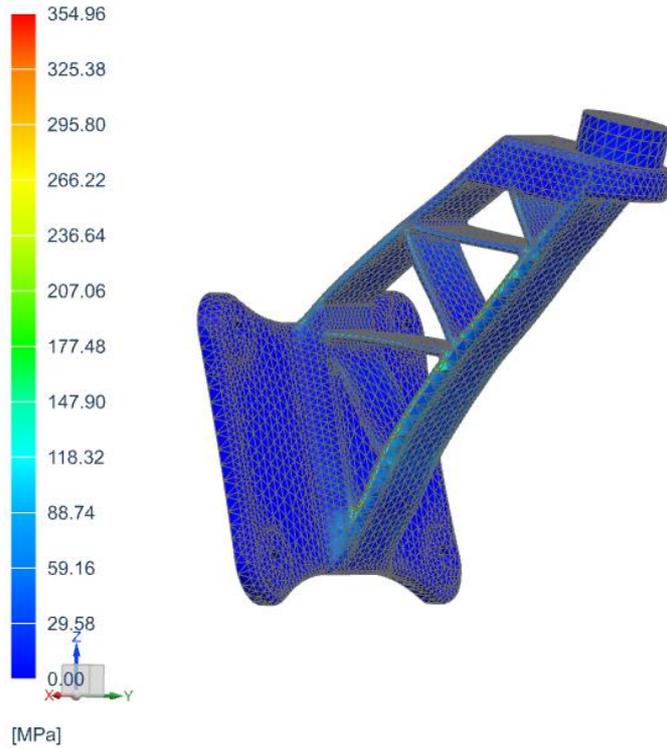


Рис. 3.29 Отображение результатов распределения напряжений

Крон 1 опт 22222_sim2 : Solution 1 Результат
 Nastopt - Statics 1, Цикл проектирования 0, 0, Итерация 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.000, Макс. : 0.185, Единицы = mm
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

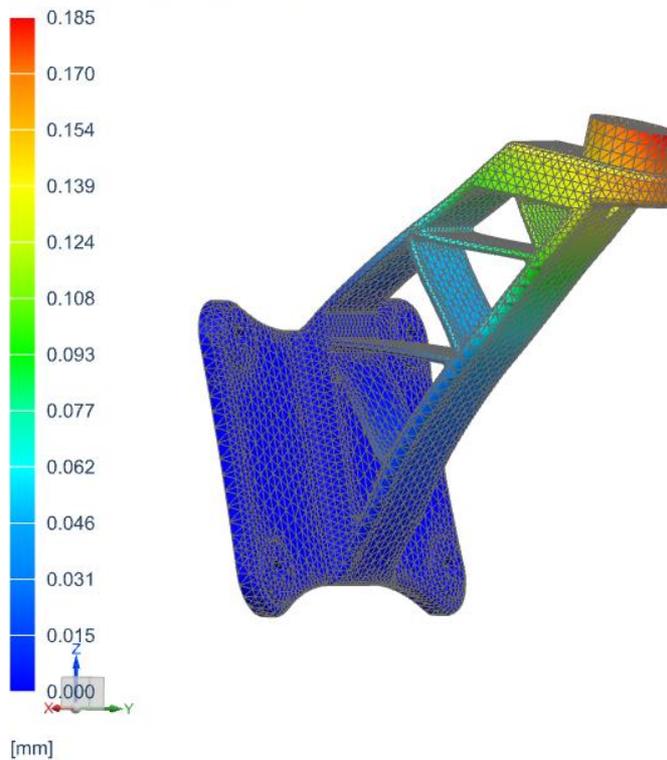


Рис. 3.30. Отображение результатов деформации – перемещение

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

53

Как видно на графике максимальное перемещение по узлам составляет 0.170 мм, что так же является малой величиной.

Теперь перейдём к рассмотрению результатов решения задачи топологической оптимизации.

Крон 1 опт 22222_sim2 : Solution 1 Результат
Независимые результаты случая нагружения , Цикл проектирования 20, 20
Normalized Material Density - По элементам, Скаляр
Мин. : 6.65986e-06, Макс. : 0.000481328, Единицы = Безразмерный

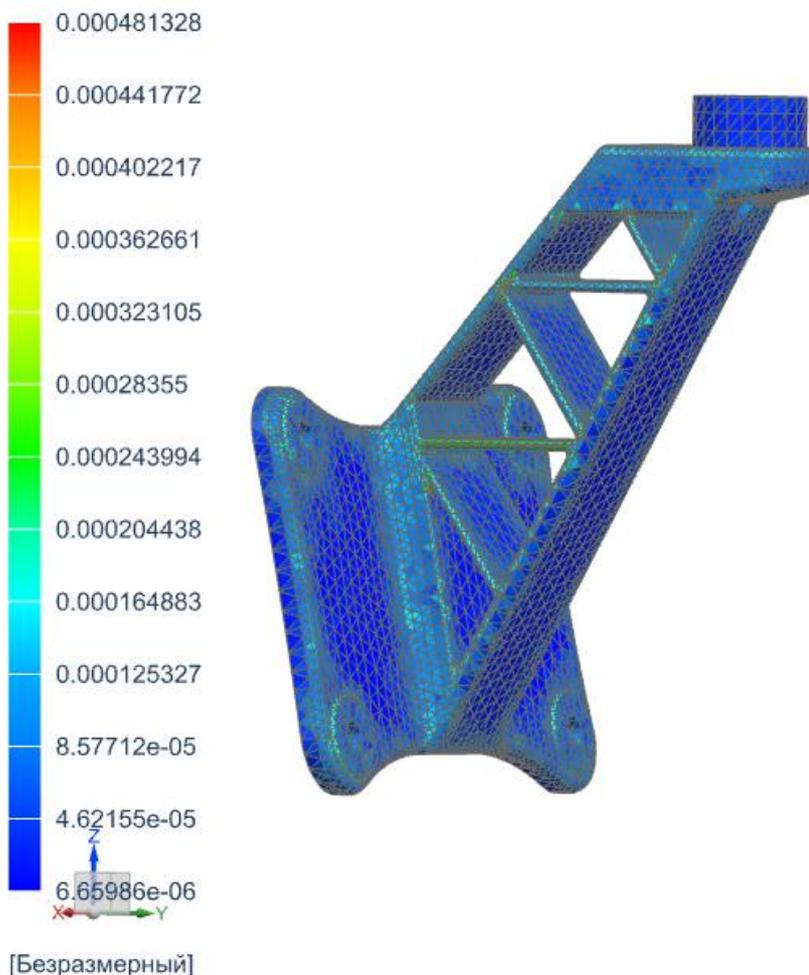


Рис. 3.31. Отображение относительной плотности конечных элементов модели

На рис. 3.31 можно проанализировать результаты решения задачи топологической оптимизации в виде представления результатов относительной плотности конечных элементов модели. По результатам данного графика можно понять, что основная относительная плотность конечных элементов модели распределяется в узлах и на основных несущих гранях. Далее изучим результаты отображения распределения плотности материала.

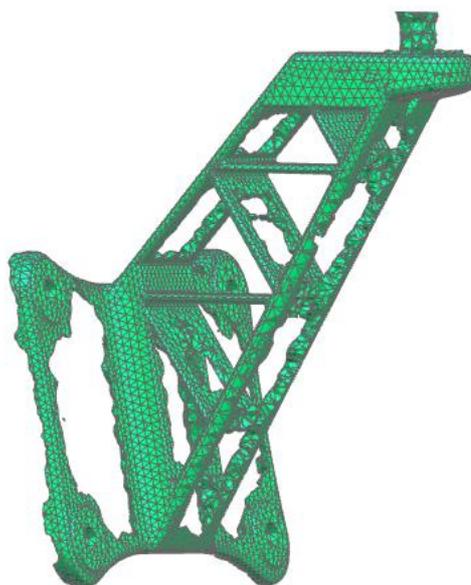


Рис. 3.32. Отображение распределения плотности материала

Рисунок 3.32 наглядно даёт понять, что нагрузка распределится по несущим граням.



Рис. 3.33. Измерение массы детали

Как видно из рисунка 3.33 масса детали снизилась с 15 кг до 12 кг.

На примере данной модели провели порядок проведения решения задачи топологической оптимизации. Приостановим дальнейшее проведение улучшения геометрии для данной модели, так как вариант и компоновка не подходит под исходные данные работы.

3.8 Разработка геометрии передней опоры двигателя

Модель 2. Исходная геометрия.

В данном случае был разработан опытный образец кронштейна навески для рядного R6 двигателя Cummins ISB6,7 E5 250 (Евро-5). Кронштейн крепится к блоку двигателя в 3 точках. Все конструкционные и габаритные размеры были подобраны специально под данный вид силового агрегата и шасси а/м КАМАЗ 43253.

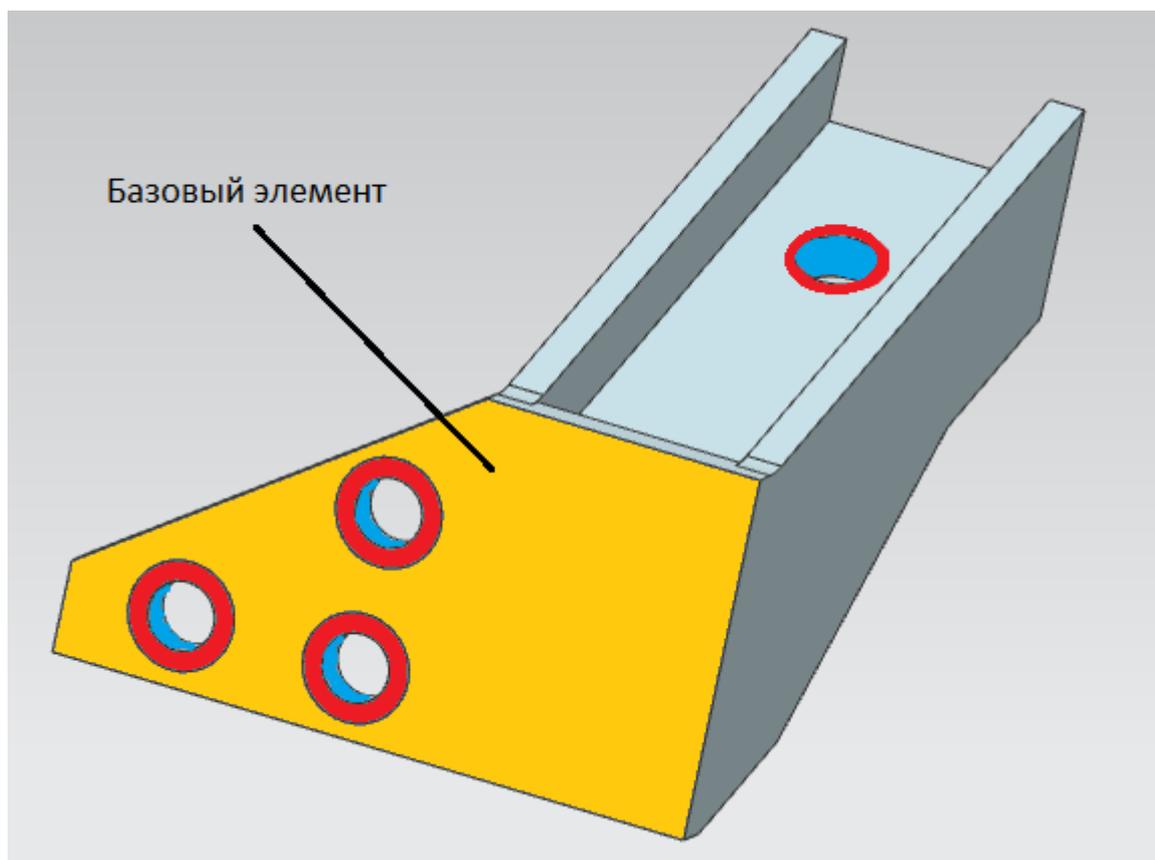


Рис. 3.34. Общий вид концепта модели 2

Информация о сетке

Имя : 3d_mesh(1)
Тип сетки : 3D
Число элементов в сетке : 8095
Число узлов в сетке : 16281
Tetra10 элементов : 8095

Наследованный материал : Steel

ИНФОРМАЦИЯ О МЕТОДЕ СЕТКИ

Element Type : CTETRA(10)

==== Параметры сетки

Размер элемента : 8 mm

==== Настройки сетки

Размер, основанный на кривизне поверхности: 67.5

Внутренняя градация сетки : 82.2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

56

==== Опции абстракции модели
Допуск малого элемента (% размера элемента): 12.5
Минимальная длина элементов (доступно только для чтения): 1

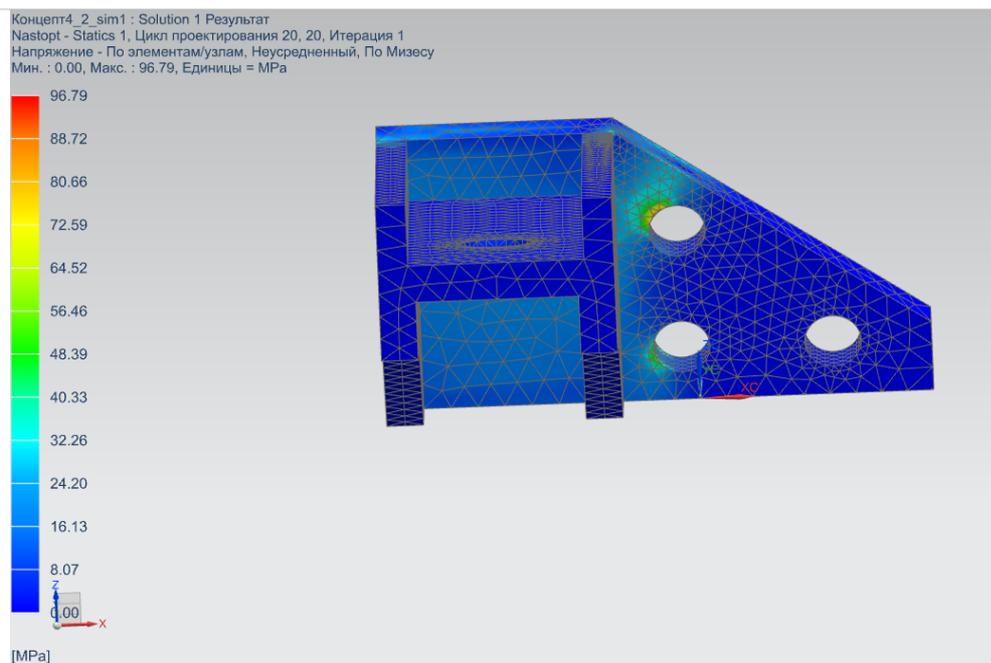


Рис. 3.35. Результаты расчёта на напряжения по Мизесу

Рассмотрим полученные результаты. На рис. 3.35 мы видим результаты расчетов на напряжение по Мизесу. Оно составляет от 0. до 96.79 МПа, что является очень низким показателем предела текучести материала. Геометрия требует дальнейшей оптимизации формы.

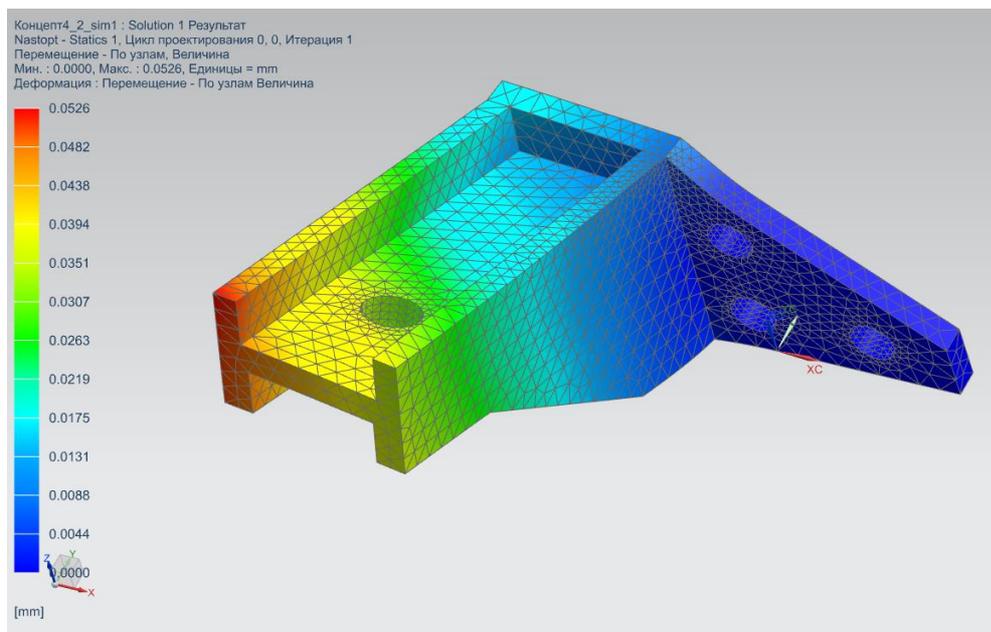


Рис. 3.36. Результаты расчета деформаций на перемещение

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

57

На рис. 3.36 мы видим результаты расчёта на перемещение по узлам. Оно составляет от 0 до 0.0526 мм, что является малой величиной. Модель требует дальнейшей оптимизации геометрии.

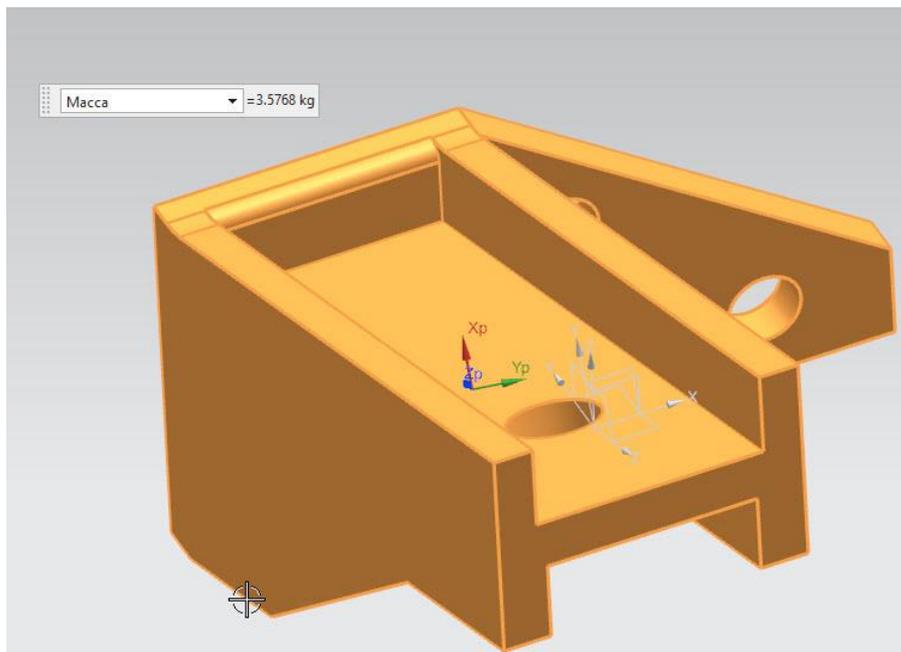


Рис. 3.37. Измерение массы детали

Как видно на рисунке 3.37 масса детали составляет 3.57 кг, можно сделать вывод, что материал используется не экономно и впустую ведь лишний материал не распределяет и не несет никакой нагрузки.

На примере этой модели мы видим частичное распределение нагрузки по материалу. Данная конструкция обладает избыточной прочностью и содержит область материала, не несущая распределение нагрузки, следовательно по результатам топологической оптимизации можно внести изменение в конструкцию детали с последующим сохранением жесткости детали, несущей способности, сохранением срока службы и уменьшением массы детали.

Вариант №3 является самым доступным в плане изготовления и экономической целесообразности массового изготовления подобных деталей, следовательно выбираем этот вариант исходным для дальнейшего применения топологической оптимизации.

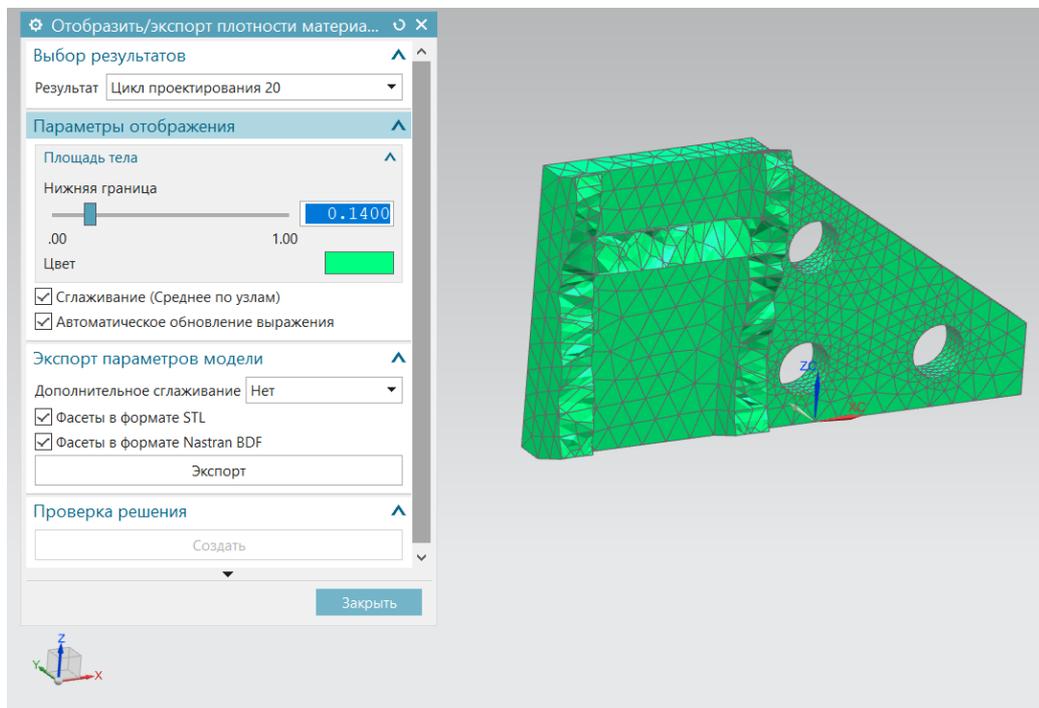


Рис. 3.38. Отображение плотности материалов 1

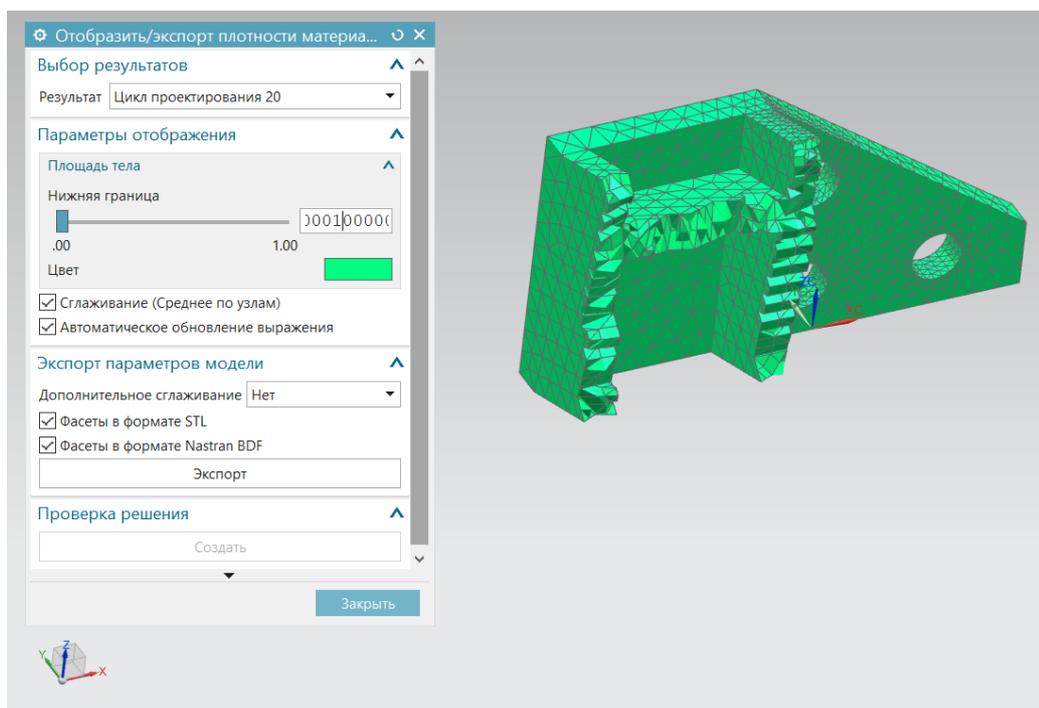


Рис. 3.39. Отображение плотности материалов 2

Исходя из результатов отображения плотности материала можно прийти к выводу о нецелесообразном использовании материала, а точнее его избыточное количество, не влияющее на жесткость и дающее лишь избыточный вес детали. Внесем изменения в конструкцию на основе полученных данных.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Модель 2. Итерация 1.

Для начала сделаем незначительные изменения по форме: уменьшим толщину стенок детали для уменьшения потребления материала, но со способностью обеспечить необходимый уровень жесткости и прочности конструкции.

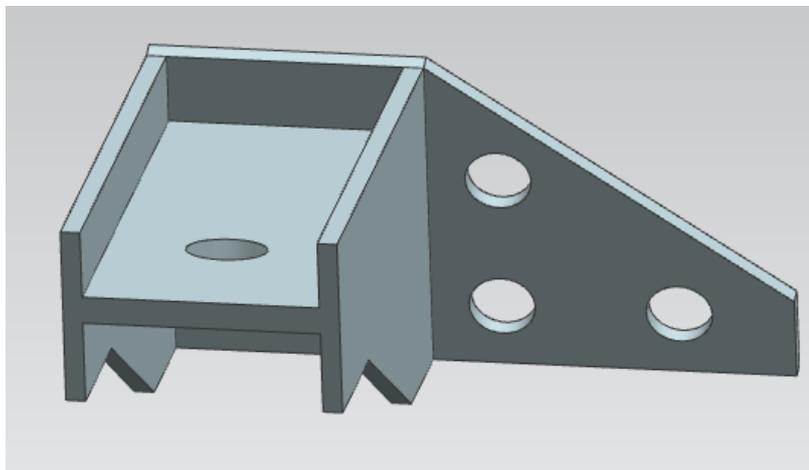


Рис. 3.40. Общий вид модели 2. итерация 1

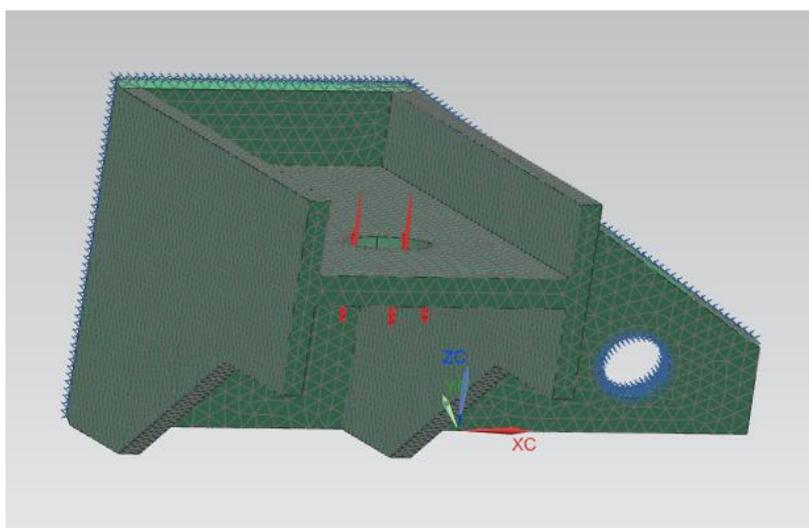


Рис. 3.41. КЭ сетка

Информация о сетке

Имя	: 3d_mesh(1)
Тип сетки	: 3D
Число элементов в сетке	: 25338
Число узлов в сетке	: 48814
Tetra10 элементов	: 25338

==== Параметры сетки

Размер элемента	: 4 mm
-----------------	--------

==== Настройки сетки

Размер, основанный на кривизне поверхности	: 50
Внутренняя градация сетки	: 1.05

Допуск малого элемента (% размера элемента): 10.2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

60

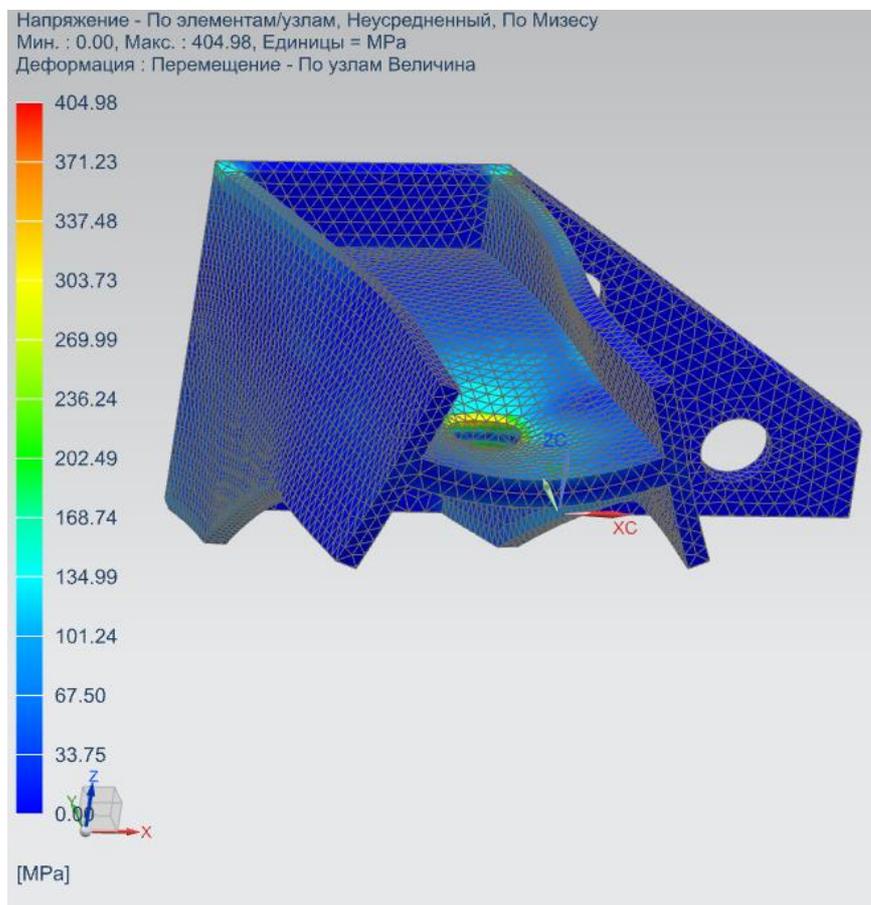


Рис. 3.42. Отображение результатов распределения напряжений

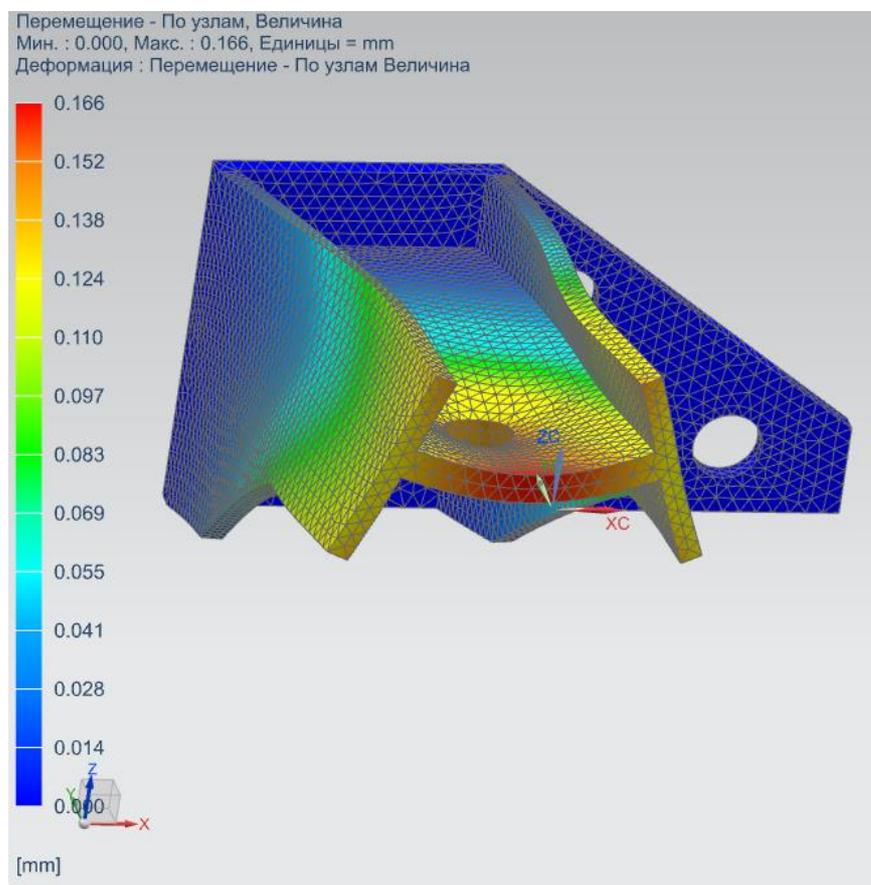


Рис. 3.43. Отображение результатов деформации – перемещение

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Как видно на рис. 3.42. возросло напряжение и составляет максимально 404.98 МПа. Напомним что предел текучести материала сталь - 550 МПа. Мы все еще имеем большой запас по пределу текучести.

Как видно на рисунке 3.43 максимальное перемещение по узлам составляет 0.166 мм, что так же является малой величиной.

Теперь перейдём к рассмотрению результатов решения задачи топологической оптимизации.

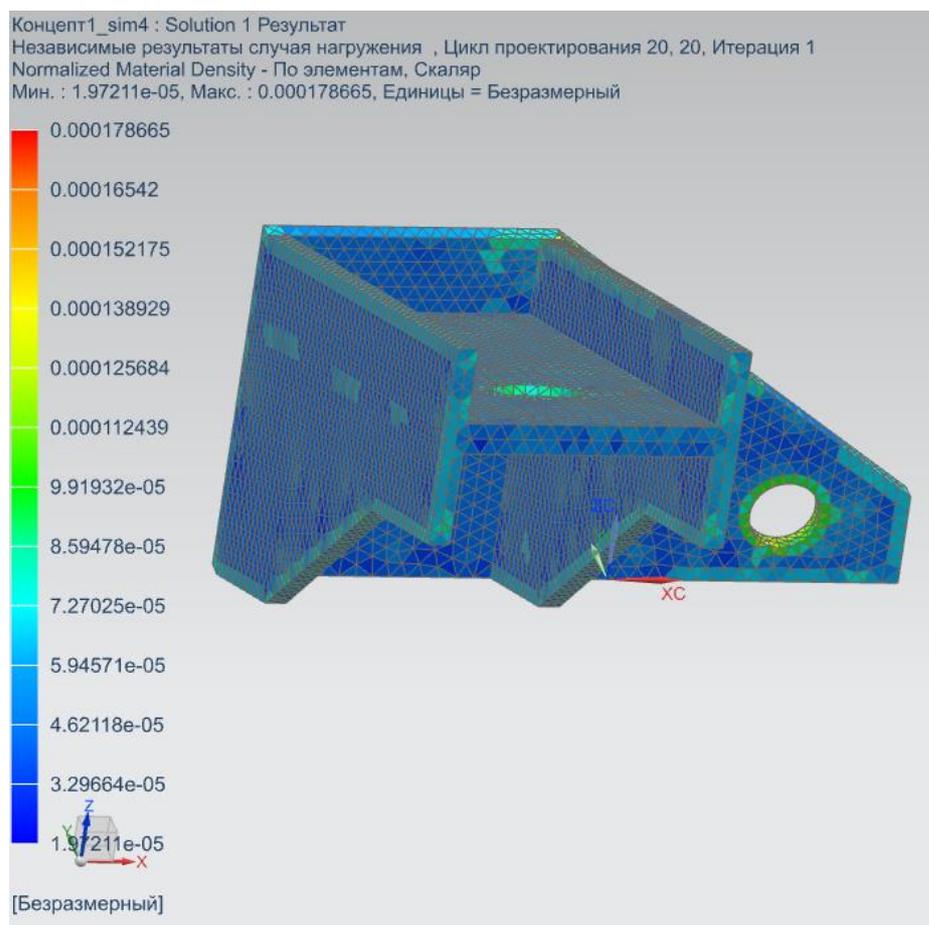


Рис. 3.44. Отображение относительной плотности конечных элементов модели

На рис. 3.44 можно проанализировать результаты решения задачи топологической оптимизации в виде представления результатов относительной плотности конечных элементов модели. По результатам данного графика можно понять, что основная относительная плотность конечных элементов модели распределяется в узлах и на основных несущих гранях. Далее изучим результаты отображения распределения плотности материала.

Модель 2. Итерация 2.

В данной итерации проведём сравнение с исходной геометрией для того, чтобы узнать, как сильно влияют фаски и скругления на распределение и передачу нагрузки по материалу модели.

Для этого была взята изначальная геометрия, добавлены скругления и фаски по несущим элементам, а также внутренним и внешним граням задействованные в распределении нагрузки.

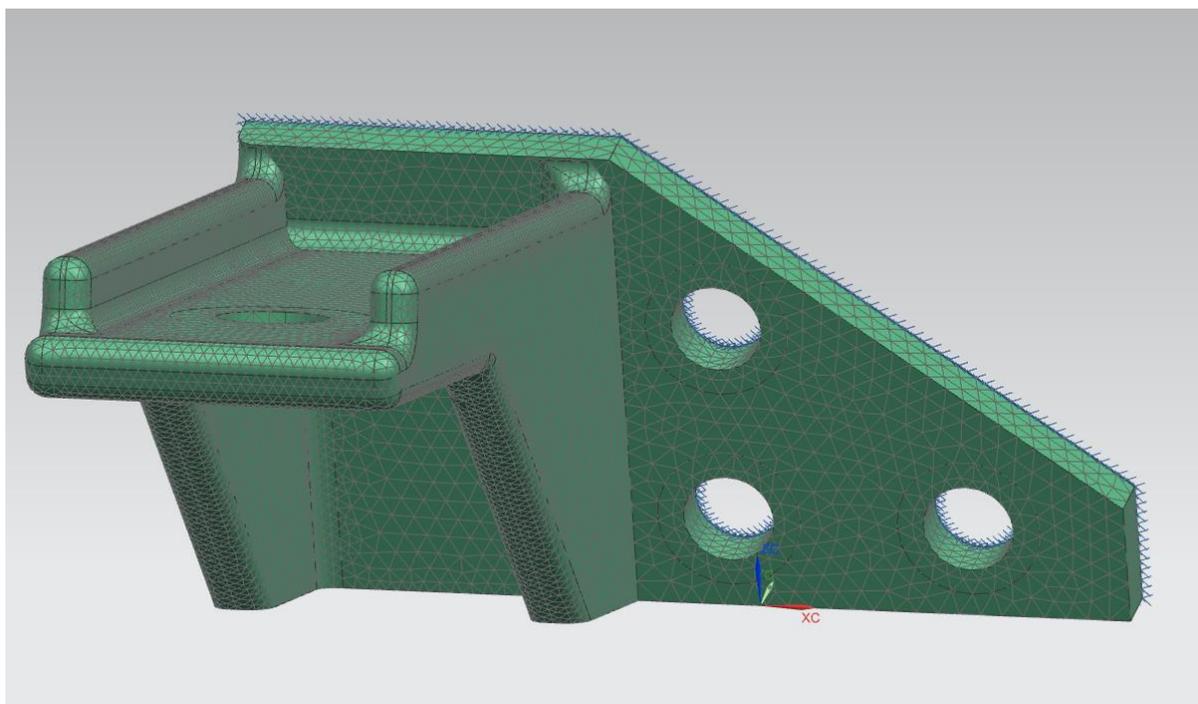


Рис. 3.47. Модель 2. Итерация 2. КЭ сетка

Информация о сетке

Имя : 3d_mesh(1)
Тип сетки : 3D
Число элементов в сетке : 8095
Число узлов в сетке : 16281
Tetra10 элементов : 8095

Наследованный материал : Steel

==== Параметры сетки

Размер элемента : 8 mm

==== Настройки сетки

Размер, основанный на кривизне поверхности: 67.5
Внутренняя градация сетки : 82.2

Так же произведем решение задачи методом топологической оптимизации и найдём элементы и узлы, в которых сосредоточена наибольшая концентрация напряжений.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

64

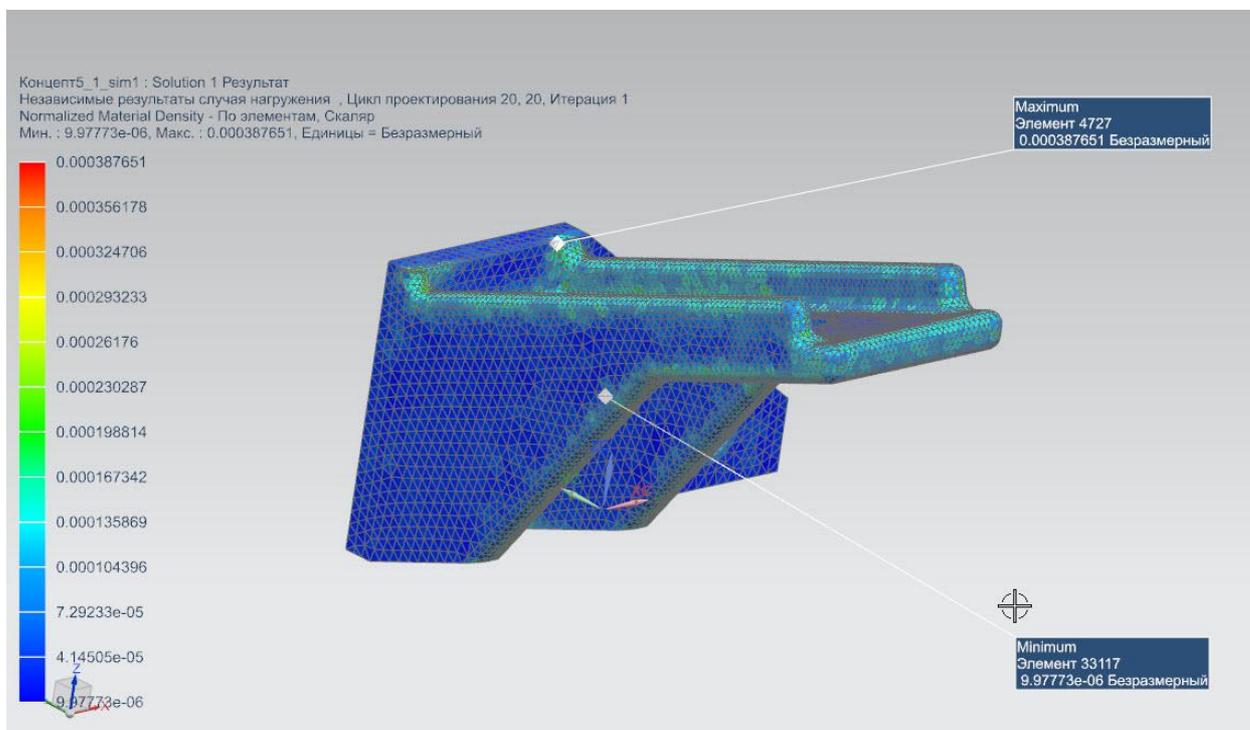


Рис. 3.48. Отображение относительной плотности конечных элементов модели

На рис. 3.48 можно проанализировать результаты решения задачи топологической оптимизации в виде представления результатов относительной плотности конечных элементов модели. По результатам данного графика можно понять, что основная относительная плотность конечных элементов модели распределяется в узлах и на основных несущих гранях. Далее изучим результаты отображения распределения плотности материала.

Рассмотрим максимальные деформация напряжения и перемещения по Мизесу и по узлам.

Как видно на рис. 3.49. возросло напряжение и составляет максимально 163.92 МПа. Напомним что предел текучести материала сталь - 550 МПа. Мы все еще имеем большой запас по пределу текучести.

Как видно на рисунке 3.50 максимальное перемещение по узлам составляет 0.221 мм, что так же является малой величиной.

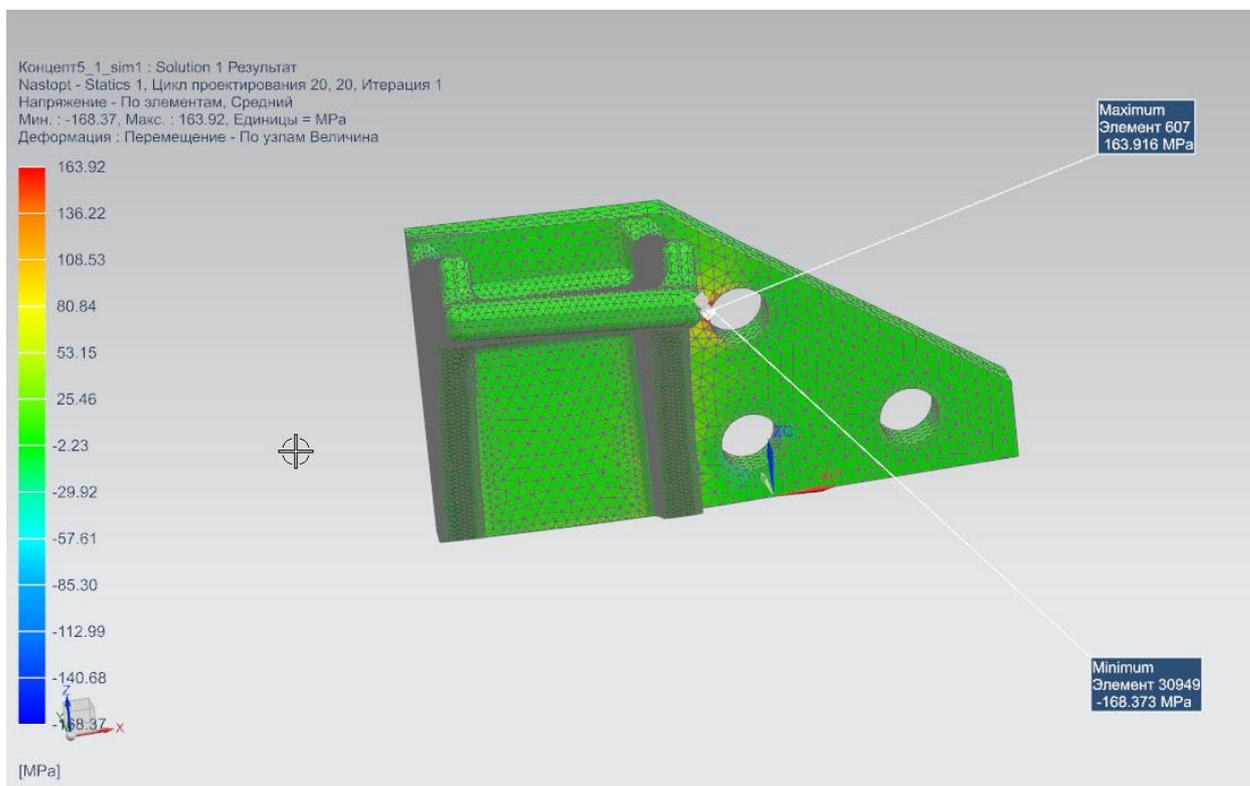


Рис. 3.49. Отображение результатов распределения напряжений

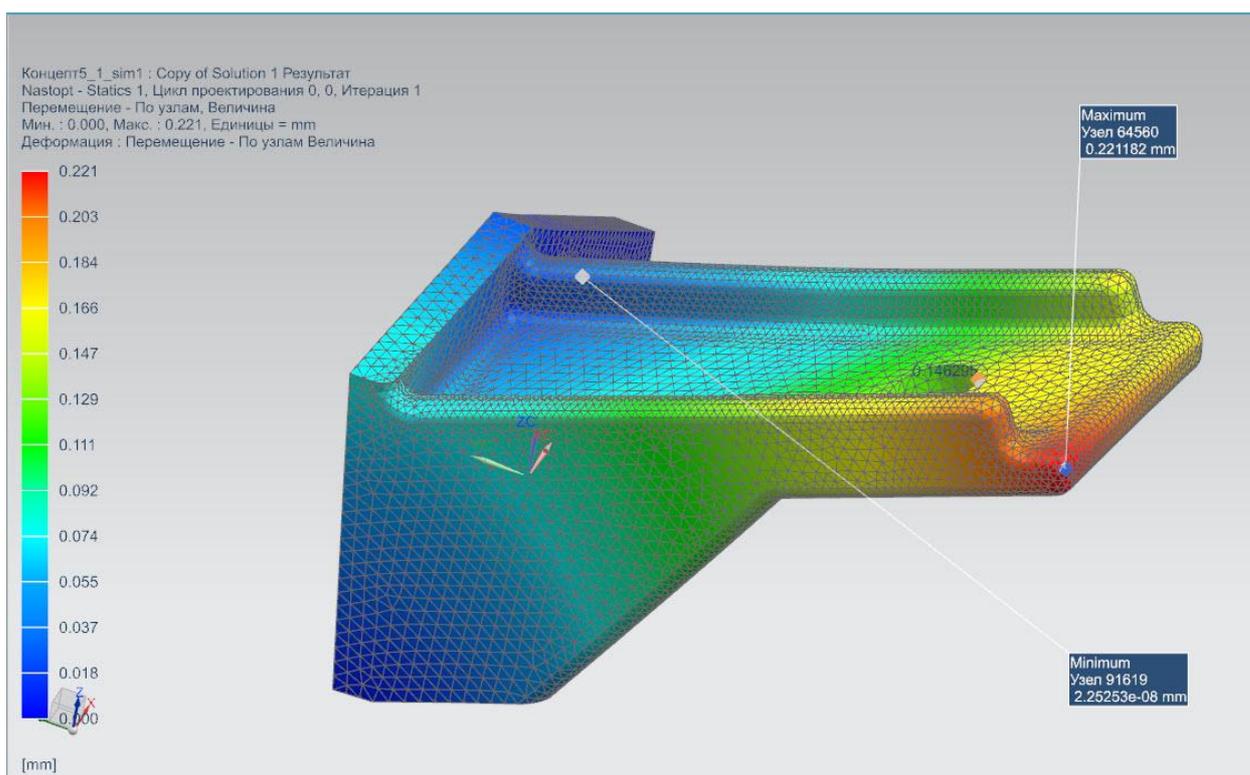


Рис. 3.50. Отображение результатов деформации – перемещение

Приняв во внимания результаты проведенных расчетов приходим к выводу о том, что возможная дальнейшая топологическая оптимизация модели, так как остается большой запас по максимально допустимым перемещениям, напряжениям и жесткости конструкции.

Модель 2. Итерация 3.

Рассмотрим предложенный вариант.

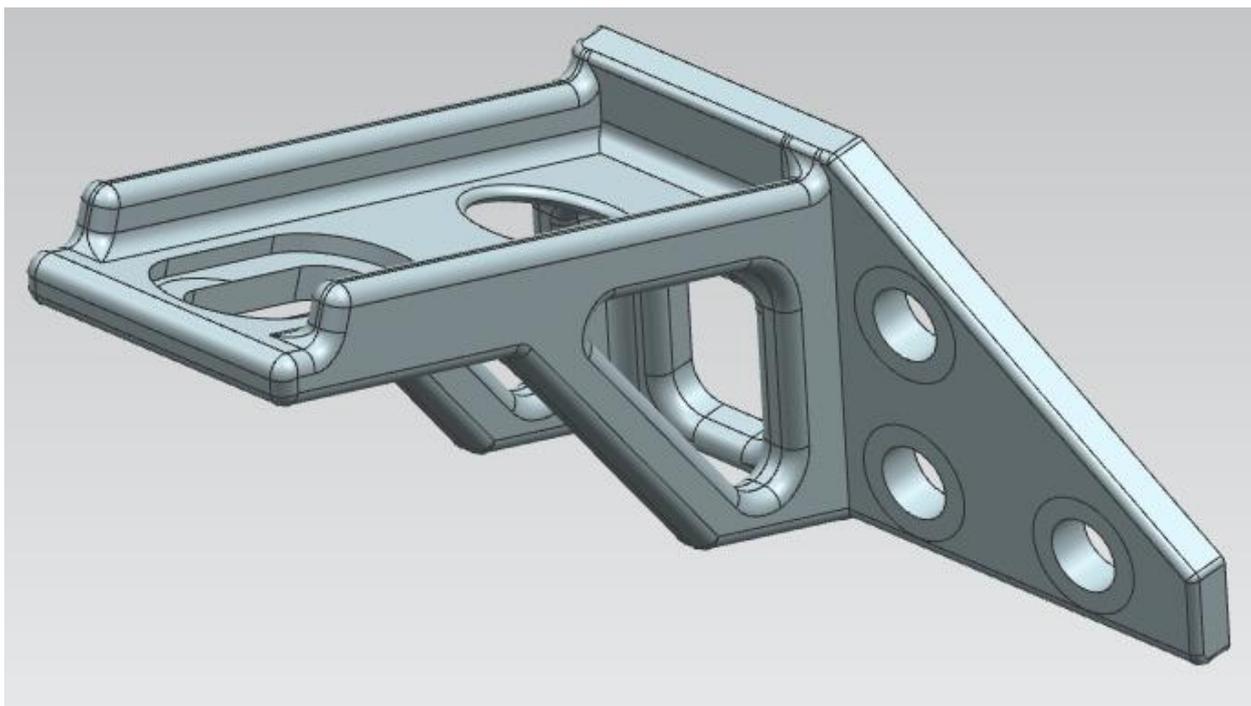


Рис. 3.51.1 Модель 3. Итерация 3

В последней итерации были произведены некоторые модернизации модели кронштейна:

1. Предусмотрено технологическое окно для центровка позиции кронштейна относительно ответной части крепления к шасси;
2. Предусмотрена канавка для возможности регулировки и центрования элементов крепления резинового демпфирующего элемента. Так же это необходимо и возможных отклонений конструкторских размеров вследствие дорожно-транспортных происшествий, заломов и изгибных кручений от превышения максимально допустимого перевозимого груза;
3. Отделен материал, не несущий нагрузку вдоль нижних ребер усиления;
4. Так же убран материал со стыковочной площадкой с блоком цилиндров в месте, где не происходит непосредственно опирание на плоскость блока.

Посмотрим на результаты распределения плотности материала.

Проанализируем результаты на напряжения и перемещения.

										Лист
										67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ					

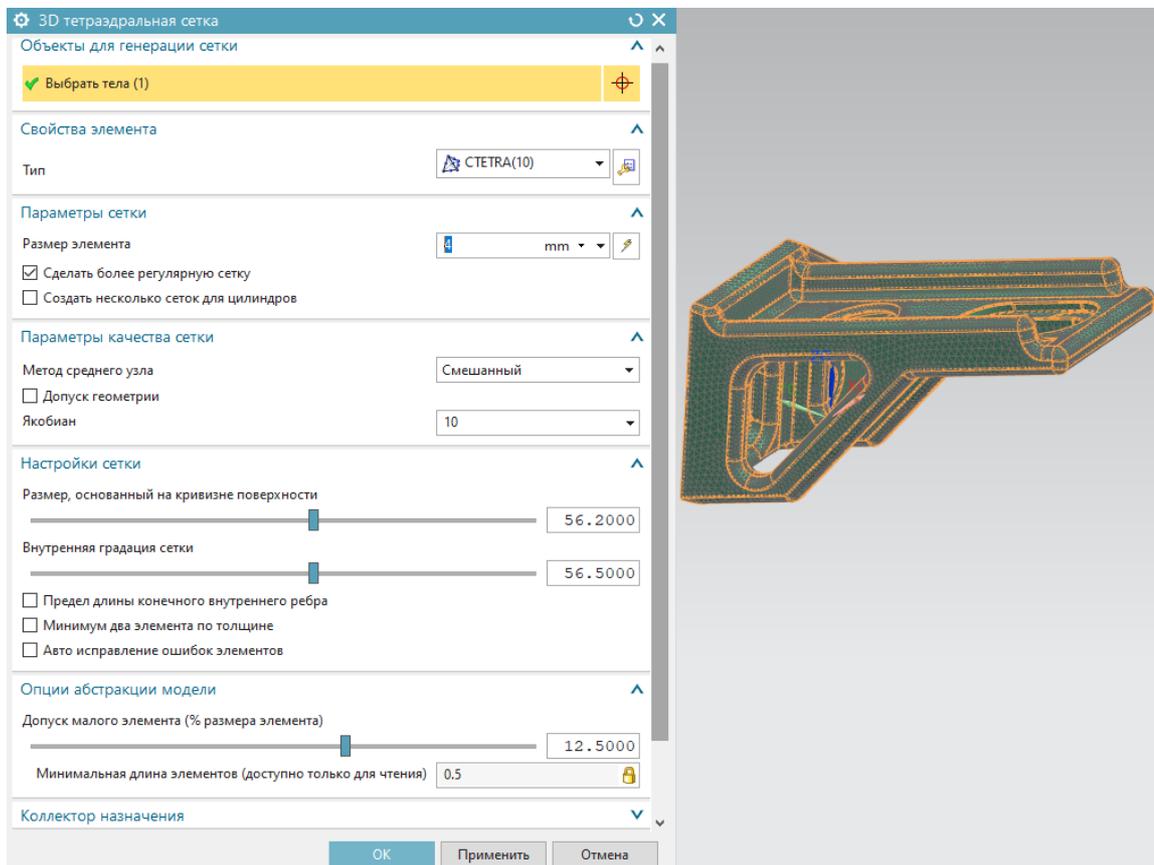


Рис. 3.51.2 КЭ сетка модели 2

Информация о сетке

Имя : 3d_mesh(1)
 Тип сетки : 3D
 Число элементов в сетке : 70533
 Число узлов в сетке : 124088
 Tetra10 элементов : 70533

Наследованный материал : Steel

ИНФОРМАЦИЯ О МЕТОДЕ СЕТКИ

Element Type : CTETRA(10)

==== Параметры сетки

Размер элемента : 4 mm
 Сделать более регулярную сетку : истина

==== Настройки сетки

Размер, основанный на кривизне поверхности: 56.2
 Внутренняя градация сетки : 56.5

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

68

Способ закрепления и нагружения кронштейнов

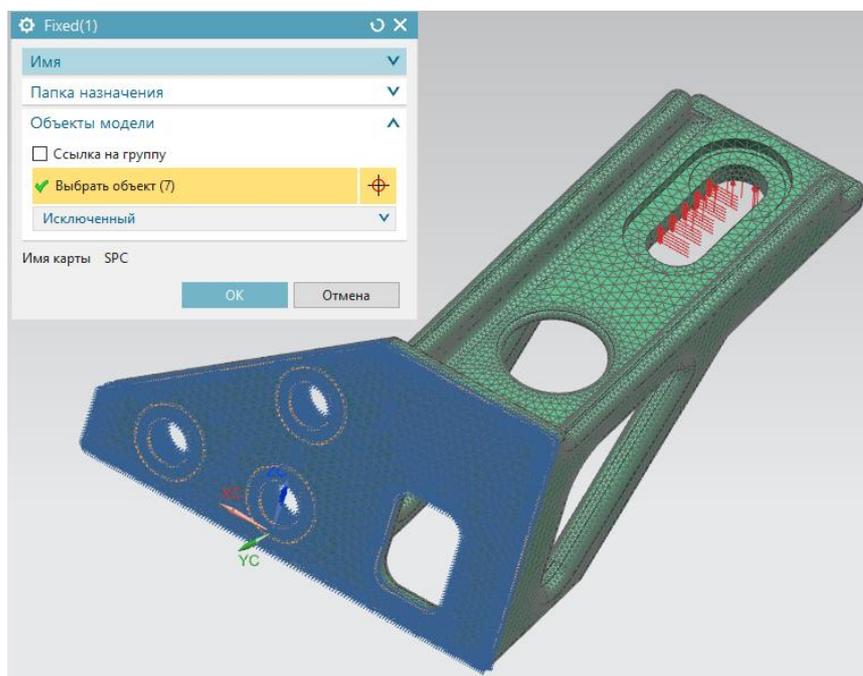


Рис. 3.51.3. Тип ограничения

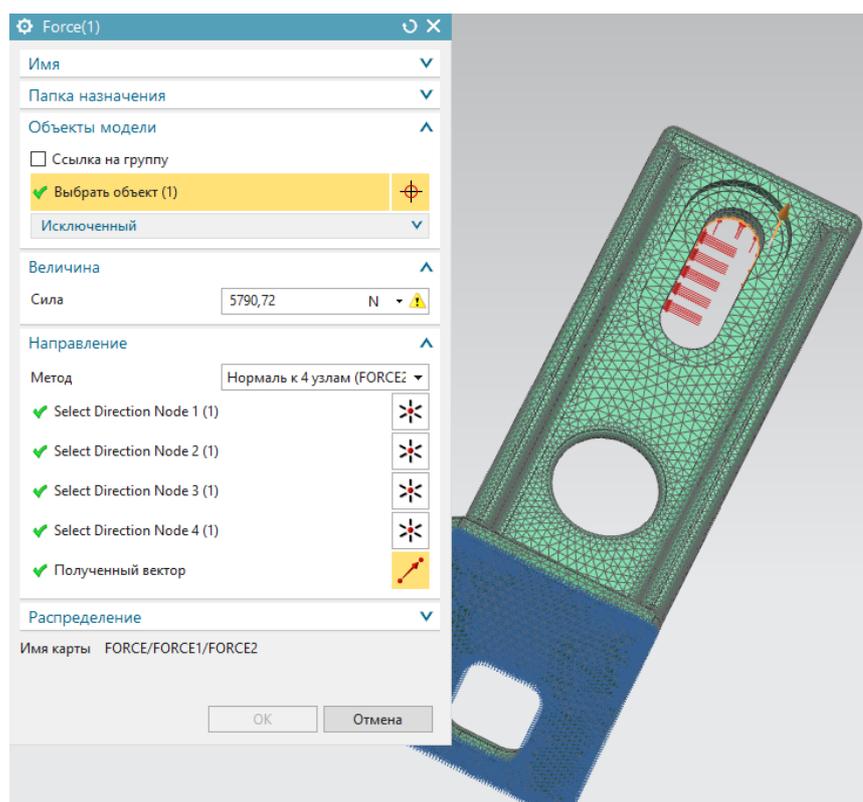


Рис. 3.51.4 Тип нагрузки

Для проведения расчетов была применен тип ограничения: заделка на базовом элементе, и так же места крепления кронштейна к блоку двигателя в 3 точках. Сила прикладываемая к кронштейну считалась как результирующая сумм при статической нагрузке: вертикальная, боковая.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

69

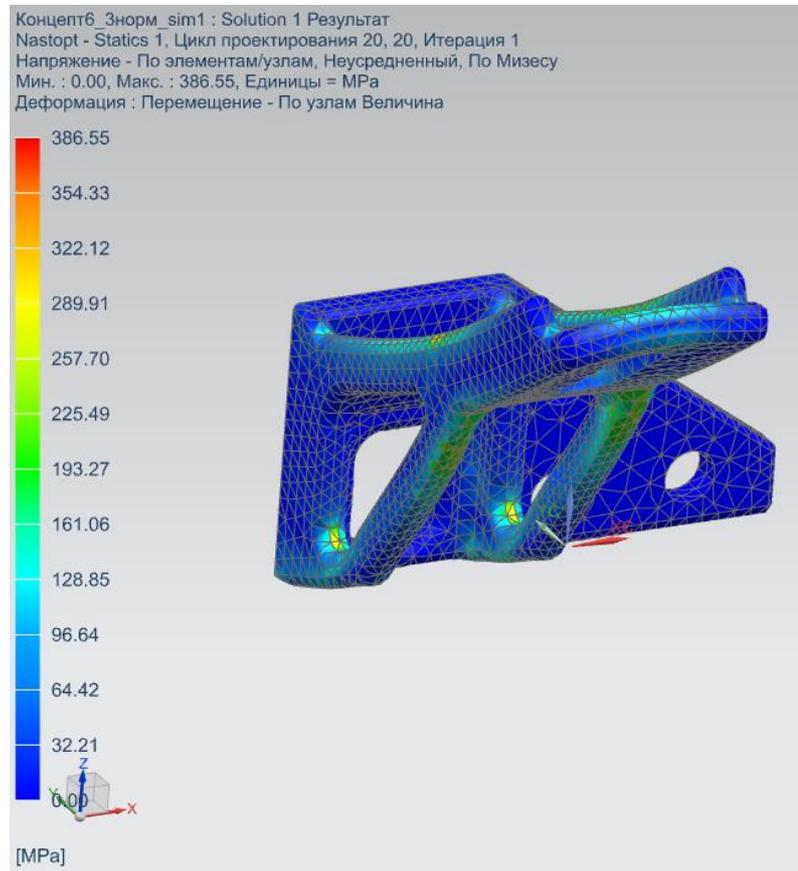


Рис. 3.52. Отображение результатов распределения напряжений

Как видно на рис. 3.52 напряжение составляет 386.55 МПа, что полностью удовлетворяет требованиям. Напомним что предел текучести материала сталь - 550 МПа.

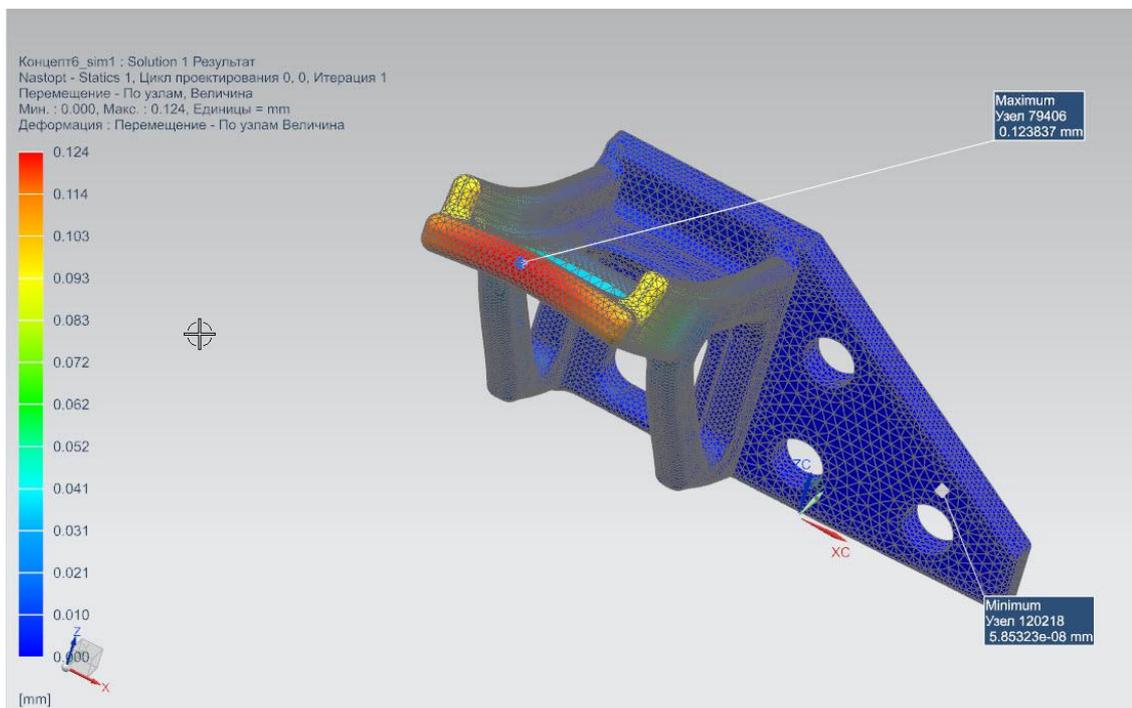


Рис. 3.53. Отображение результатов деформации – перемещение

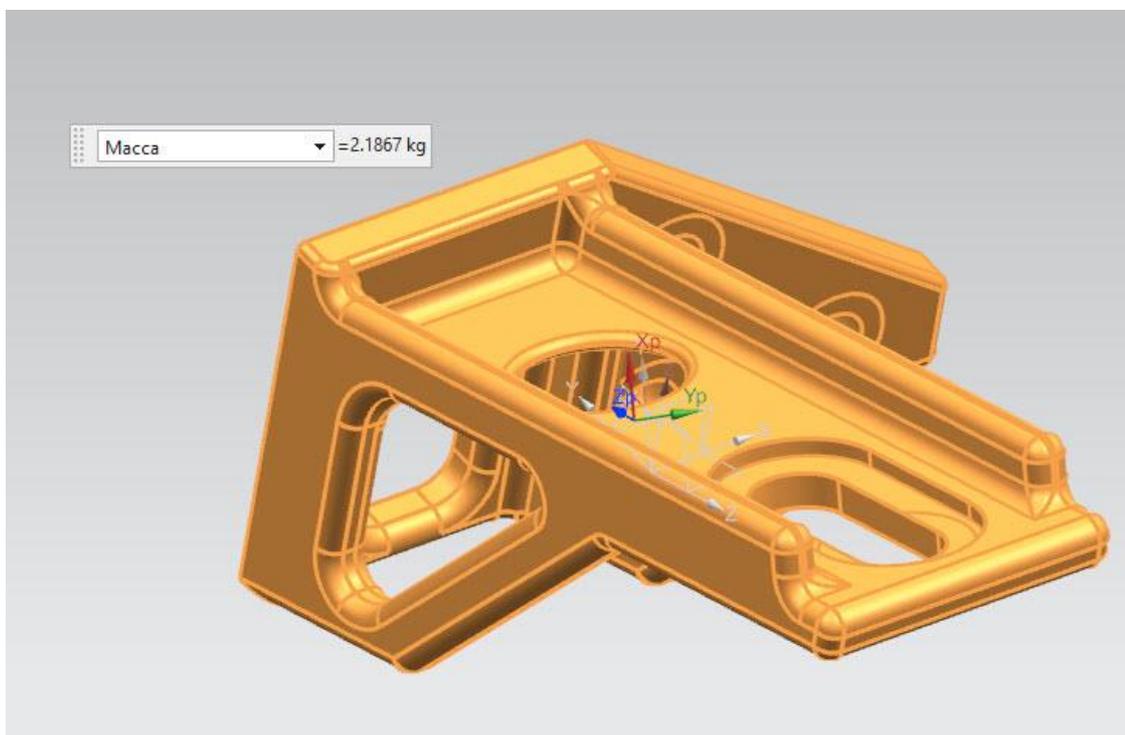


Рис. 3.55. Результаты измерения массы модели

Неоспоримым преимуществом данной итерации является существенное уменьшение веса детали. В первой итерации модели вес детали составлял 3.58 кг, в последней итерации вес модели составляет 2.18 кг, что меньше на 1.4 кг.

С учетом того, что данной типа кронштейна на двигатель Cummins устанавливается в количестве 2 штук общий вес, который удалось сократить будет 2.8 кг.

Модель 2 в итерации 3 полностью удовлетворяет техническому заданию и исходным данным, в связи с этим, принимаем данный кронштейн в качестве финальной версии для передней конструкционной опоры силового агрегата.

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

3.9 Разработка геометрии задней опоры двигателя

Модель 2. Исходная геометрия.

В данном случае был разработан опытный образец заднего кронштейна навески для рядного R6 двигателя Cummins ISB6,7 E5 250 (Евро-5). Кронштейн крепится к блоку двигателя в 4 точках. Все конструкционные и габаритные размеры были подобраны специально под данный вид силового агрегата и шасси а/м КАМАЗ 43253.

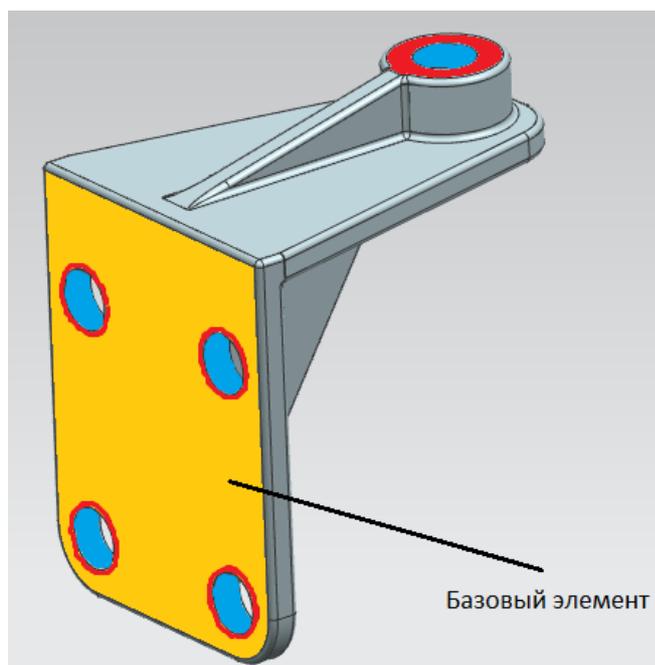


Рис. 3.56. Общий вид модели 3

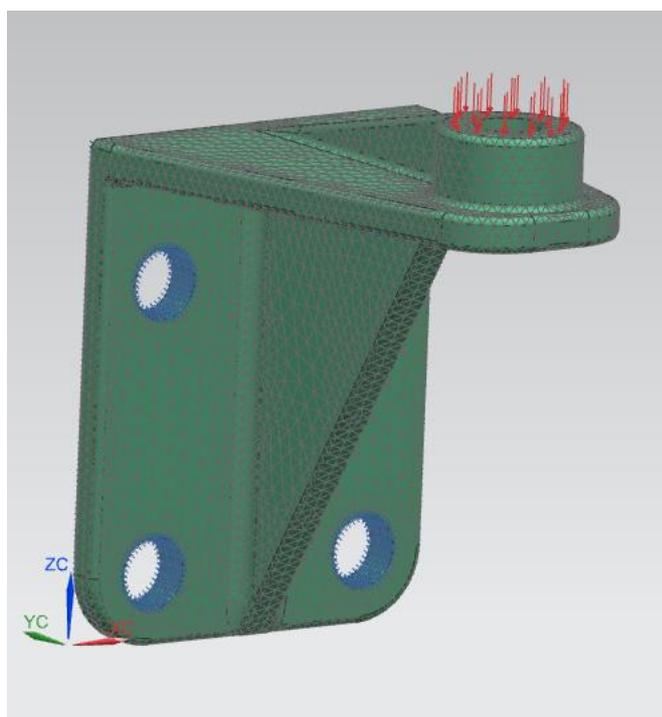


Рис. 3.57. КЭ сетка

										Лист
										73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ					

Информация о сетке

Имя : 3d_mesh(1)
Тип сетки : 3D
Число элементов в сетке : 9912
Число узлов в сетке : 18729
Tetra10 элементов : 9912

==== Ориентация материала
Метод ориентации материала : Таблица физических свойств

Слой : 1

Информация о коллекторе сетки

Имя : Solid(1)
Тип : Solid

==== Физические свойства

Свойство тела : PSOLID1
Имя : PSOLID1
Тип : PSOLID
Метка : 1
Материал : Steel
Задание CORDM : Задаваемый пользователем
CORDM : Абсолютно
Метод интегрирования : По умолчанию
Вывод напряжений : По умолчанию
Схема интегрирования : По умолчанию
Тип элемента : STRUCTURAL

ИНФОРМАЦИЯ О МЕТОДЕ СЕТКИ

Element Type : CTETRA(10)

==== Параметры сетки

Размер элемента : 10 mm
Сделать более регулярную сетку : истина
Создать несколько сеток для цилиндров: ложь
Переход с пирамидальными элементами : ложь

==== Параметры качества сетки

Метод среднего узла : Смешанный
Допуск геометрии : ложь
Якобиан : 10

==== Настройки сетки

Размер, основанный на кривизне поверхности: 50
Внутренняя градация сетки : 1.05
Предел длины конечного внутреннего ребра: ложь
Минимум два элемента по толщине : ложь
Авто исправление ошибок элементов : ложь

==== Опции абстракции модели

Допуск малого элемента (% размера элемента): 10
Минимальная длина элементов (доступно только для чтения): 1

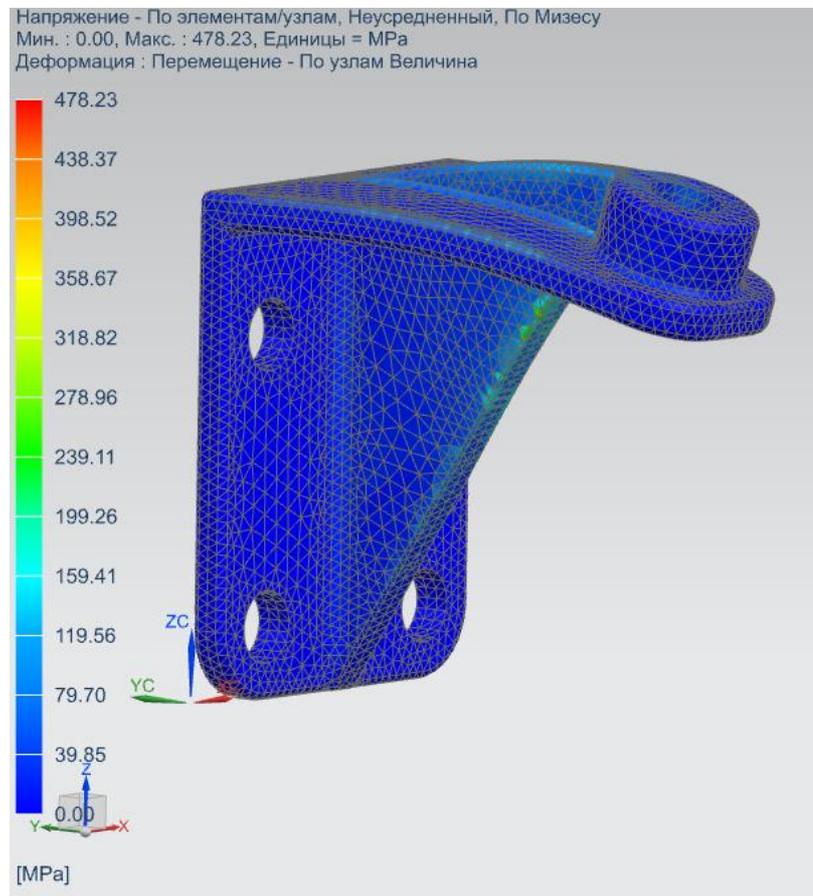


Рис. 3.58. Отображение результатов распределения напряжений

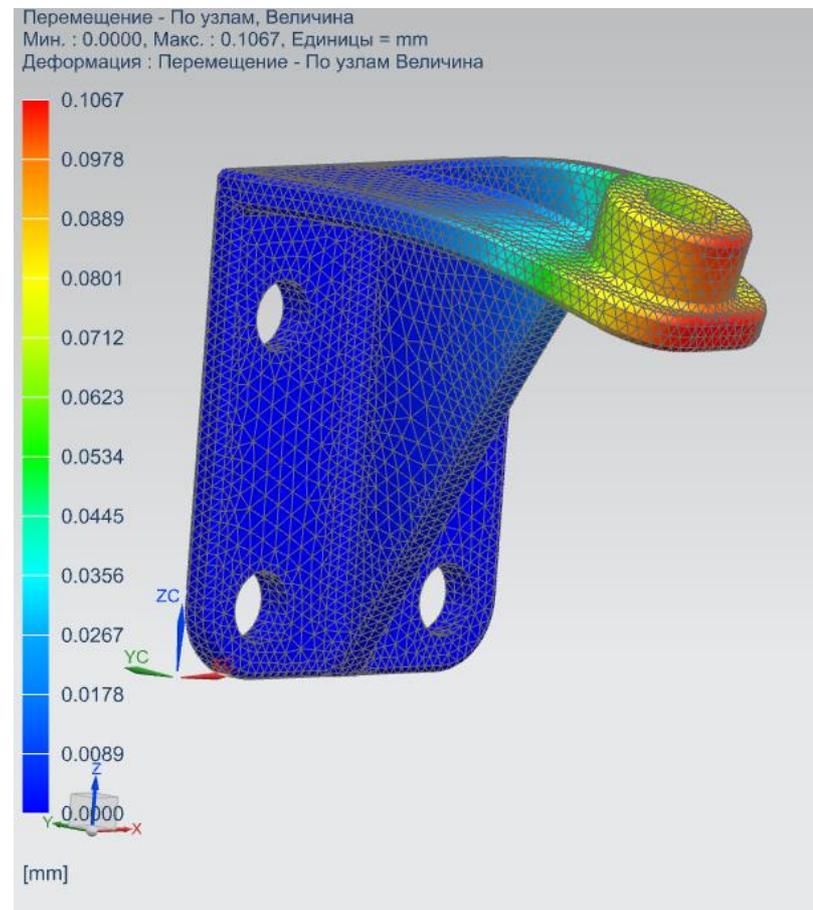


Рис. 3.59. Отображение результатов деформации – перемещение

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

75

Как видно на рисунке 3.58 максимальное напряжение составляет 478.23 МПа, что уже приближено к пределу 550 МПа. Дальнейшее улучшение геометрии нужно проводить с упором сохранения или уменьшение данного показателя.

На рисунке 3.59 показано, что максимальное перемещение составляет 0.1 мм, что входит в допуск.

Теперь перейдём к рассмотрению результатов решения задачи топологической оптимизации.

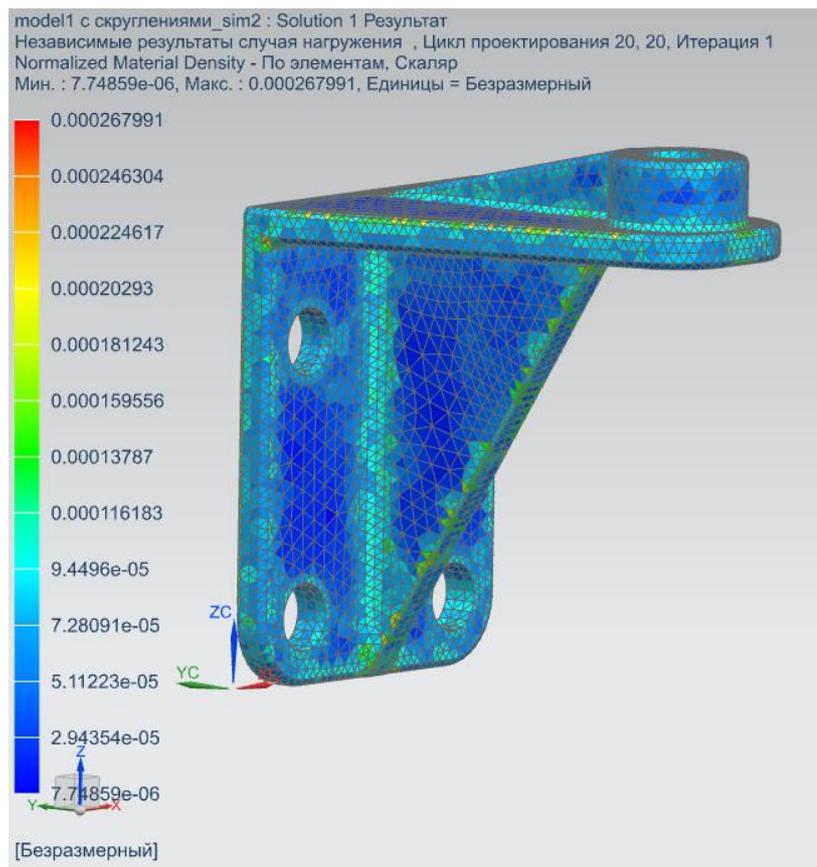


Рис. 3.60. Отображение относительной плотности конечных элементов модели

На рис. 3.60 можно проанализировать результаты решения задачи топологической оптимизации в виде представления результатов относительной плотности конечных элементов модели. По результатам данного графика можно понять, что основная относительная плотность конечных элементов модели распределяется в узлах и на основных несущих гранях. Далее изучим результаты отображения распределения плотности материала.

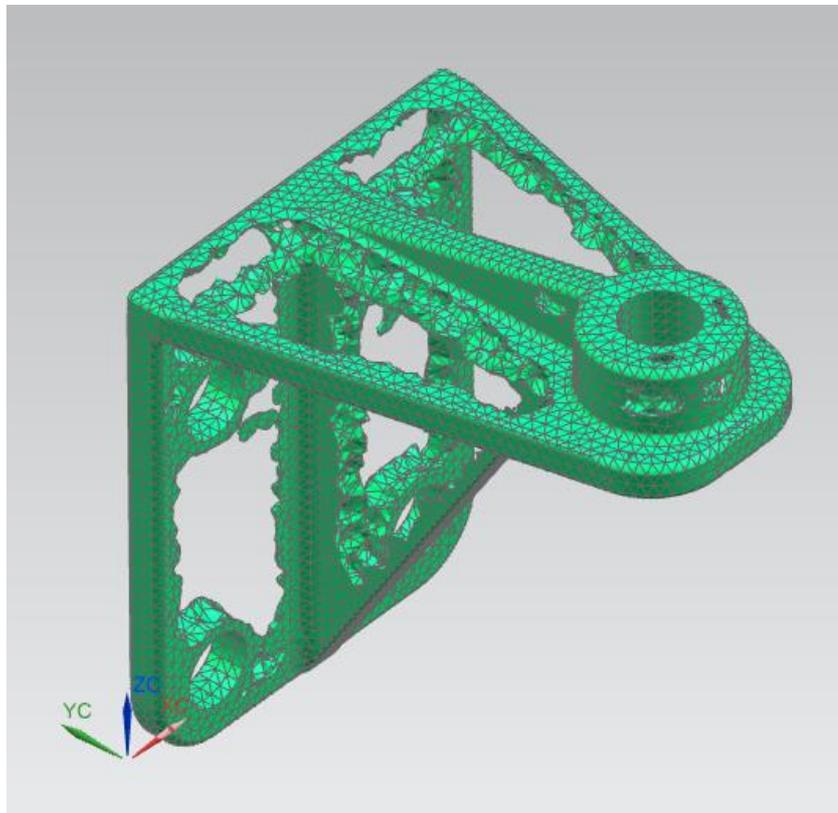


Рис. 3.61. Отображение распределения плотности материала

Данный рисунок наглядно даёт понять как распределяется нагрузка по детали в целом. С учётом этих данных мы можем провести улучшение геометрии конструкции.

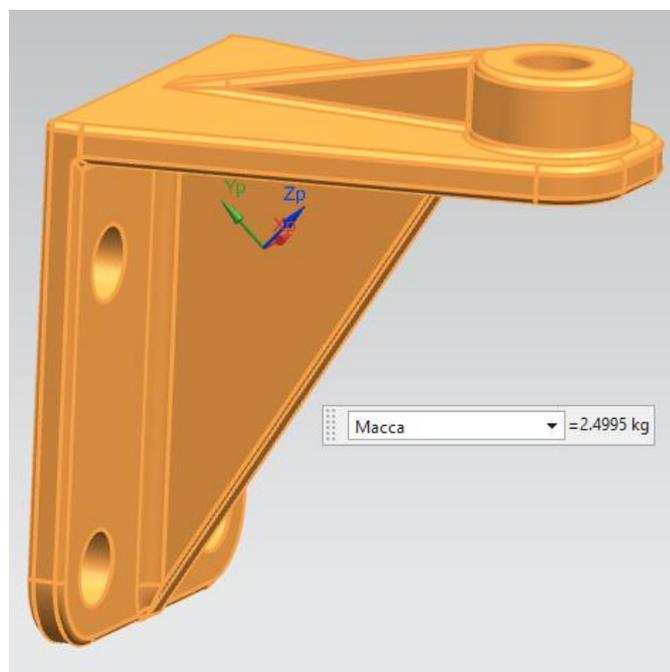


Рис. 3.62. Измерение массы детали

Перейдем к рассмотрению результатов первичной улучшения геометрии детали на основе полученных данных.

					<i>Лист</i>
					77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>

Модель 3. Итерация 2.

В данной итерации на основе полученных данных проведем следующие изменения в геометрии модели.

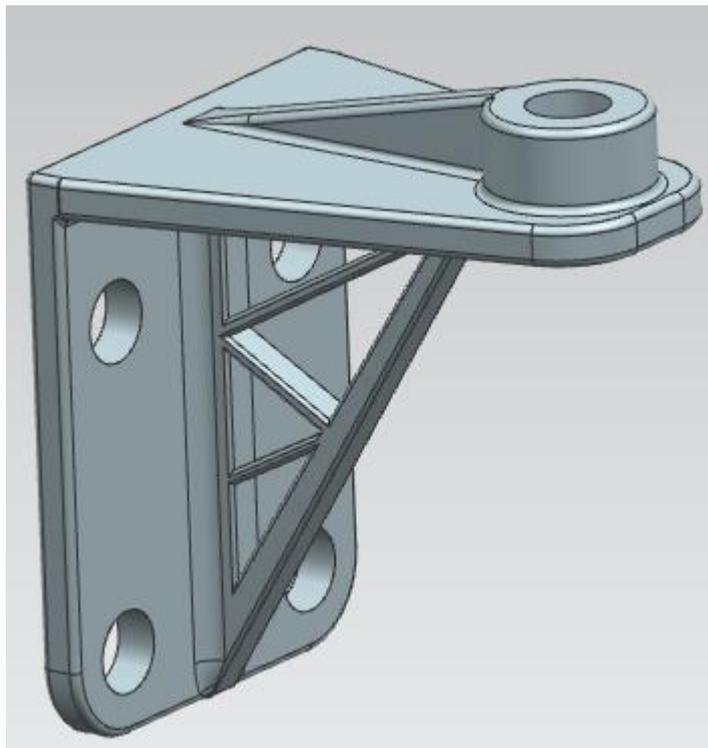


Рис. 3.63. Общий вид модели 4. Итерация 2

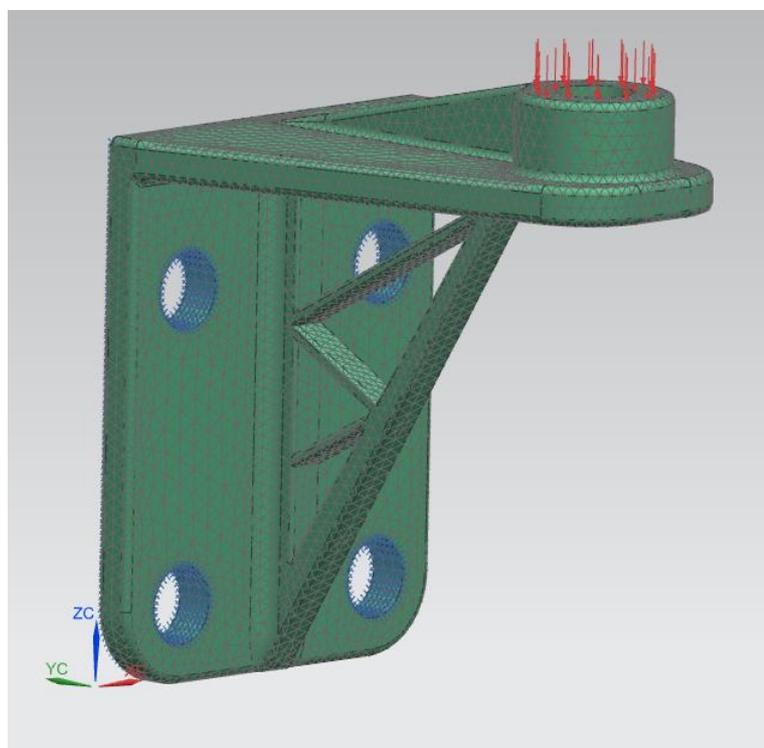


Рис. 3.64. КЭ сетка

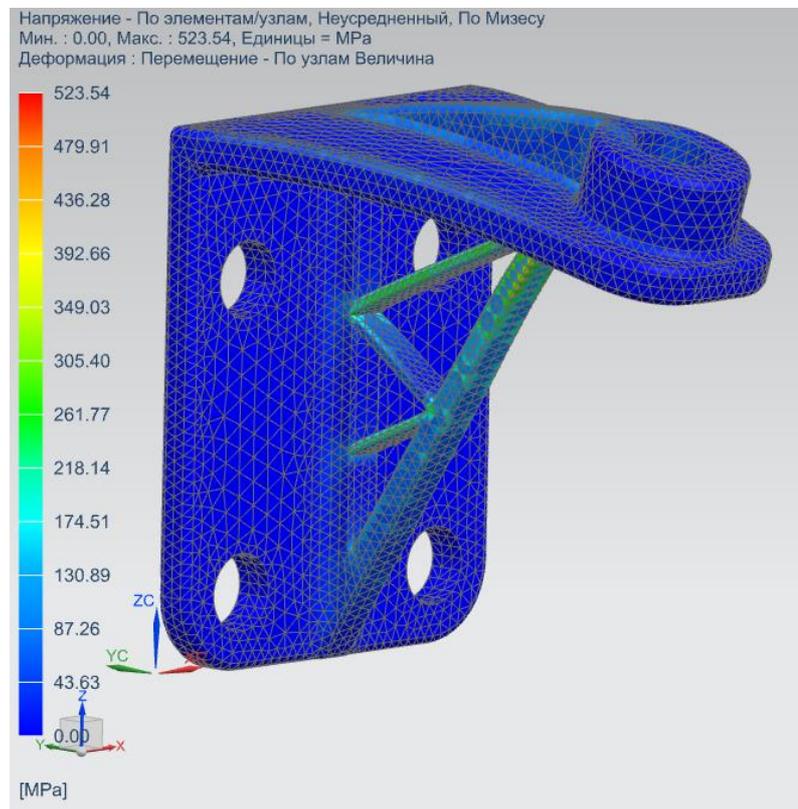


Рис. 3.65. Отображение результатов распределения напряжений
 Как видно на рис. 3.65 максимальное напряжение составляет 523.54 МПа, что уже приближено к пределу по текучести материала.

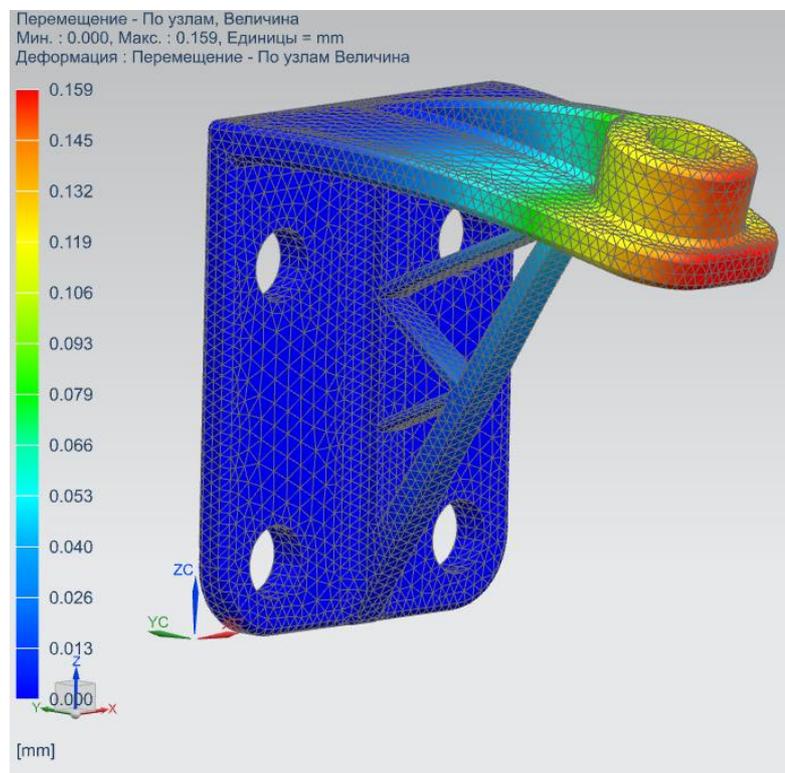


Рис. 3.66. Отображение результатов деформации – перемещение
 Как видно на графике максимальное перемещение по узлам составляет 0.159 мм, что так же является достаточной величиной.

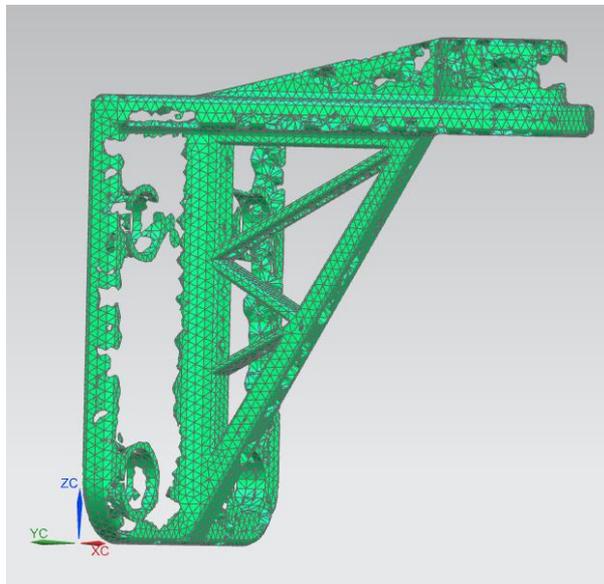


Рис. 3.68. Отображение распределения плотности материала

Данный рисунок наглядно даёт понять как распределяется нагрузка по детали в целом. С учётом этих данных мы можем прийти к выводу что нагрузка полностью распределяется по материалу.

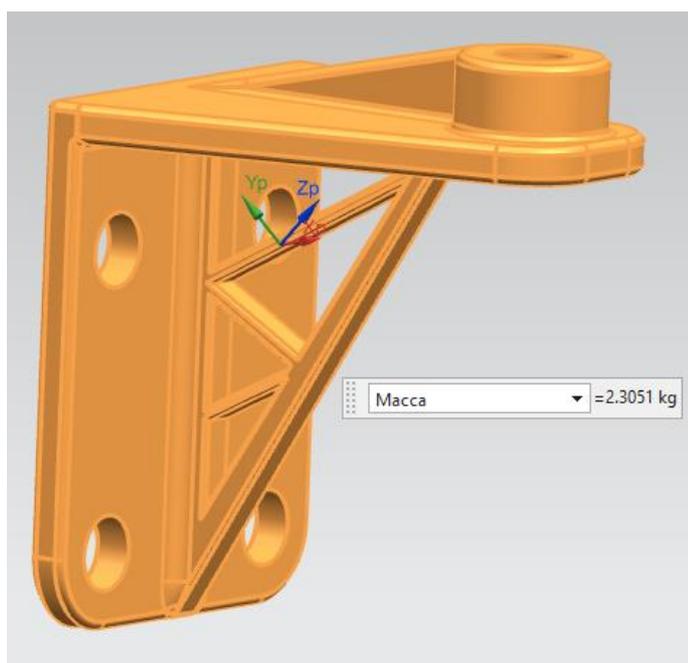


Рис. 3.69. Измерение массы детали

Масса детали составила 2.3 кг, что на 0.1944 кг меньше чем исходная геометрия модели.

Данная модель требует пересмотра дизайна, так как имеется область с концентратором напряжений. Из-за малой вычислительной мощности оборудования не удалось понизить плотность КЭ сетки чтобы можно было увидеть область с концентратором напряжений.

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

Модель 3. Итерация 3.

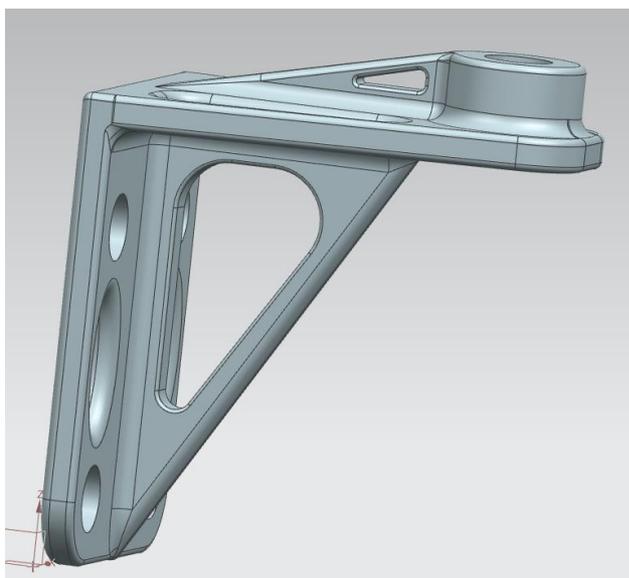


Рис. 3.70.1 Общий вид модели 3 итерации 3

Исходя из полученных данных предыдущей итерации, разработаем новую геометрию для модели. Конструкцию ферм заменим на простой вырез с использованием более крупного скругления в углах. Также увеличим скругление по внутренне скругление, добавим фаски.

Данная конструкции предполагает уменьшение вероятности появления областей концентраторов напряжения в углах примыкания укосин, как в предыдущей итерации. Для сохранения массы добавлен вырез в верхнем усилителе опоры.

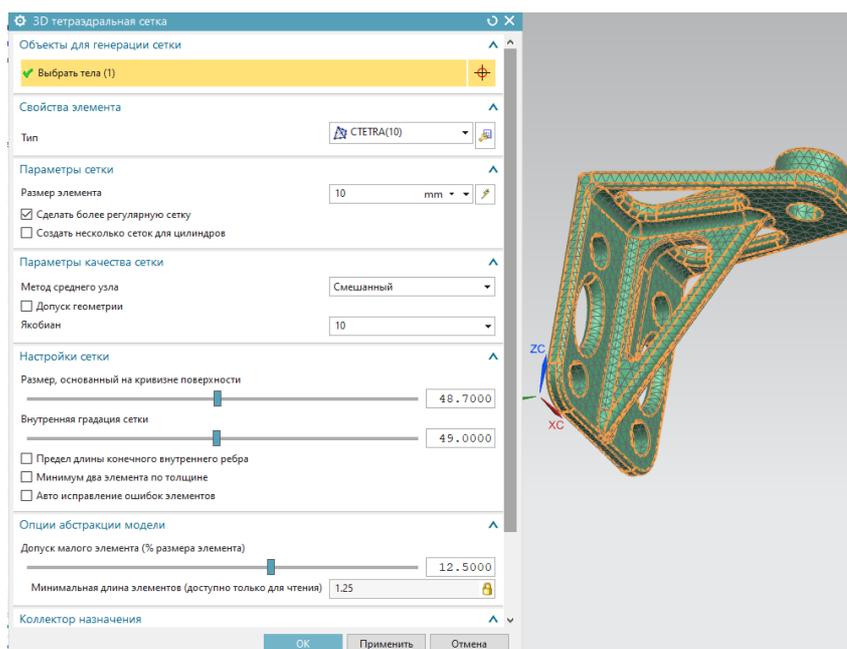


Рис. 3.70.2 КЭ сетка модели 3

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Информация о сетке

Имя : 3d_mesh(1)
Тип сетки : 3D
Число элементов в сетке : 9047
Число узлов в сетке : 17459
Tetra10 элементов : 9047

ИНФОРМАЦИЯ О МЕТОДЕ СЕТКИ

Element Type : CTETRA(10)

==== Параметры сетки

Размер элемента : 10 mm
Сделать более регулярную сетку : истина

Способ закрепления и нагружения кронштейна

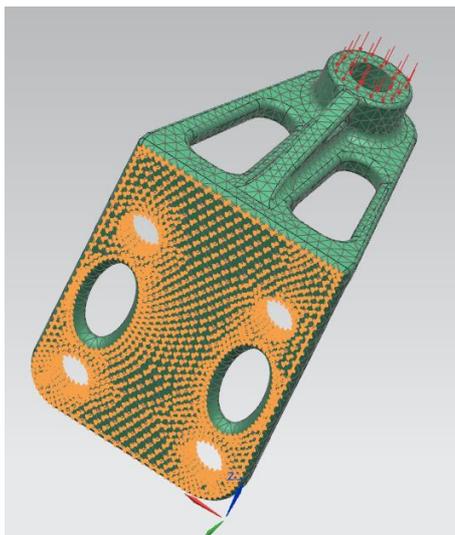


Рис. 3.70.3 Тип закрепления

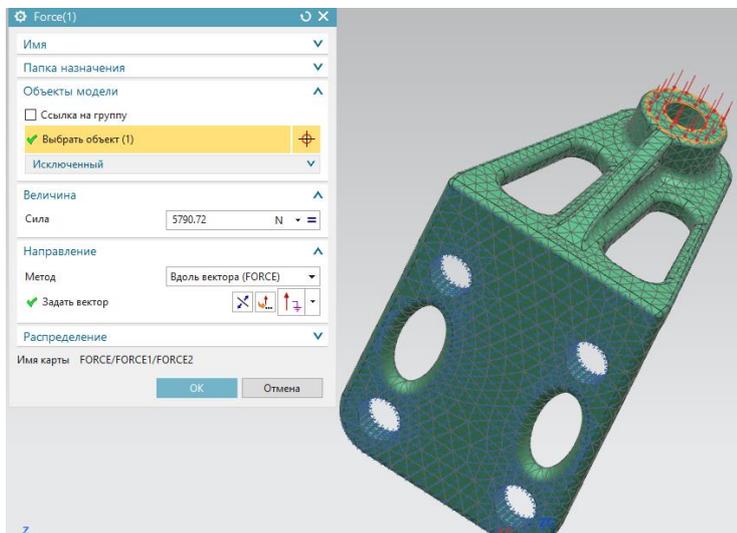


Рис. 3.70.4 Тип нагрузки

Для проведения расчетов была применен тип ограничения: заделка на базовом элементе, и так же места крепления кронштейна к блоку двигателя в 4 точках. Сила прикладываемая к кронштейну считалась как результирующая сумм при статической нагрузке.

Рассмотрим полученные результаты изменения геометрии.

Как видно на рисунке 3.71 максимальное напряжение составляет 385.07 МПа, что на 70 МПа меньше чем в предыдущей итерации.

Как видно из рисунка 3.72 немного поднялись значения перемещения, но они всё равно остаются в допусках и составляют 0.167 мм.

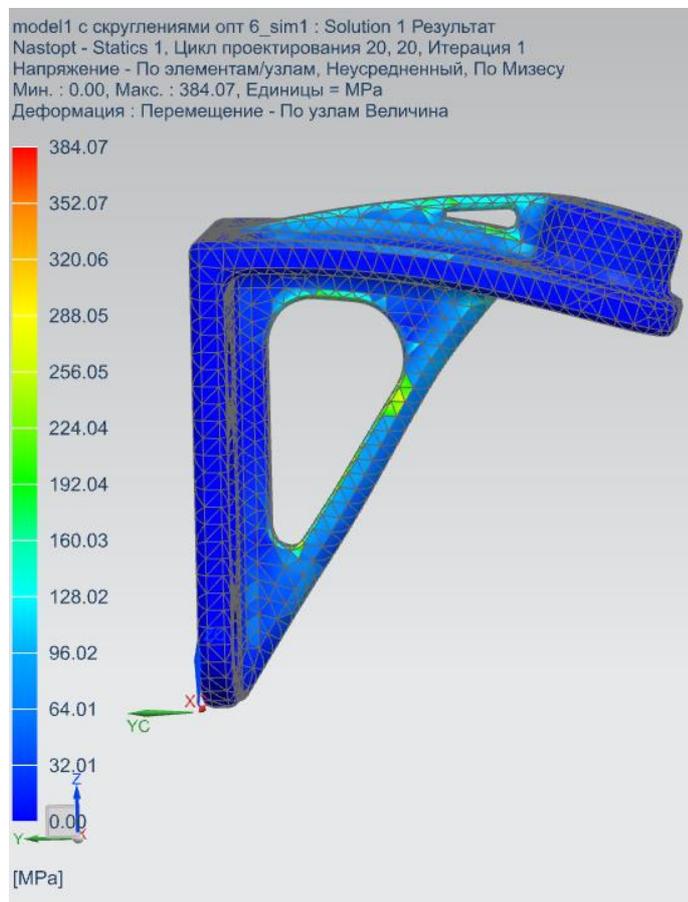


Рис. 3.71. Отображение результатов распределения напряжений

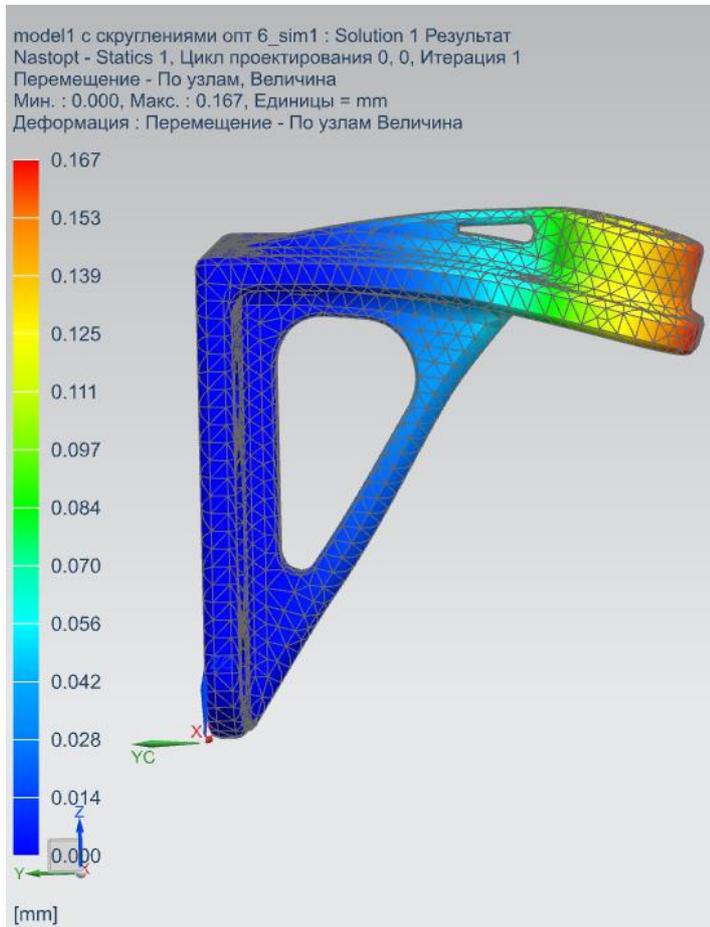


Рис. 3.72. Отображение результатов деформации – перемещение

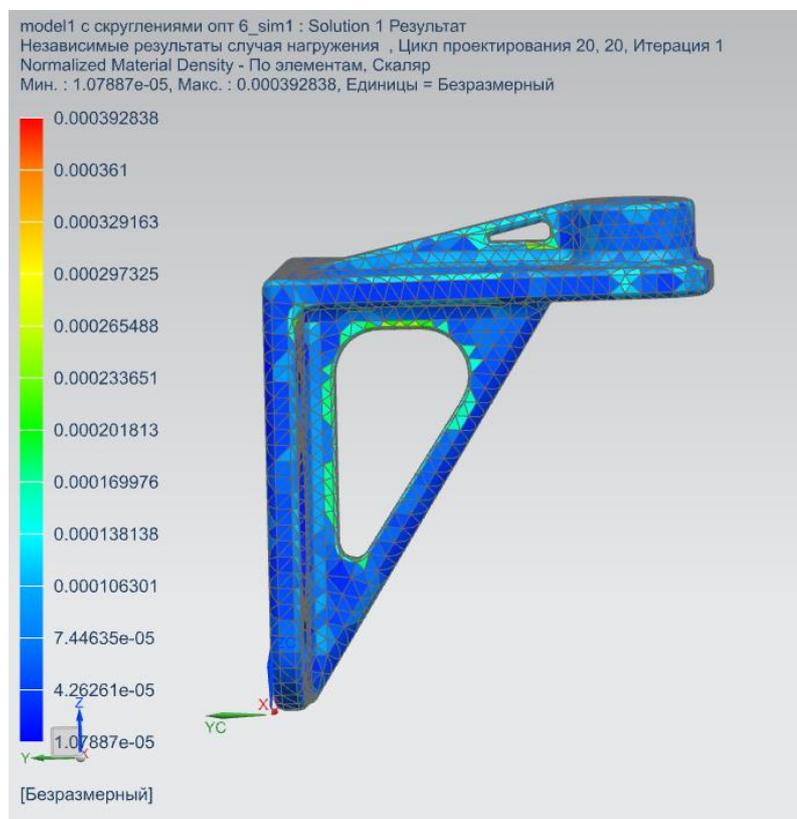


Рис. 3.73. Отображение относительной плотности конечных элементов модели

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

85

На рис. 3.73 можно проанализировать результаты решения задачи топологической оптимизации в виде представления результатов относительной плотности конечных элементов модели. По результатам данного графика можно понять, что основная относительная плотность конечных элементов модели распределяется в узлах и на основных несущих гранях. Далее изучим результаты отображения распределения плотности материала.

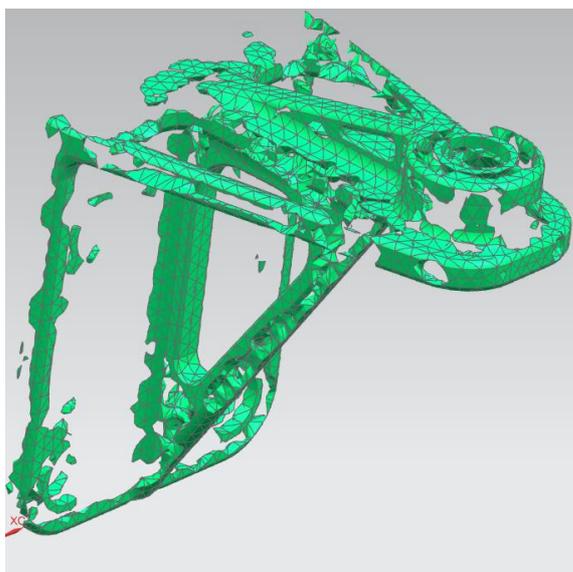


Рис. 3.74. Отображение распределения плотности материала

Данный рисунок наглядно даёт понять как распределяется нагрузка по детали в целом. С учётом произведённых изменений мы можем прийти к выводу что нагрузка полностью распределяется по материалу.

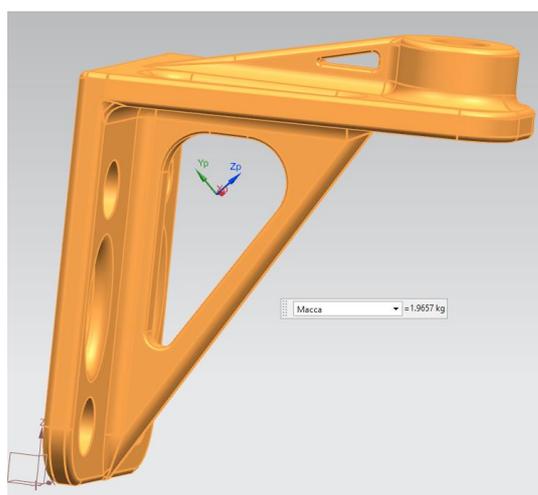


Рис. 3.75. Измерение массы детали

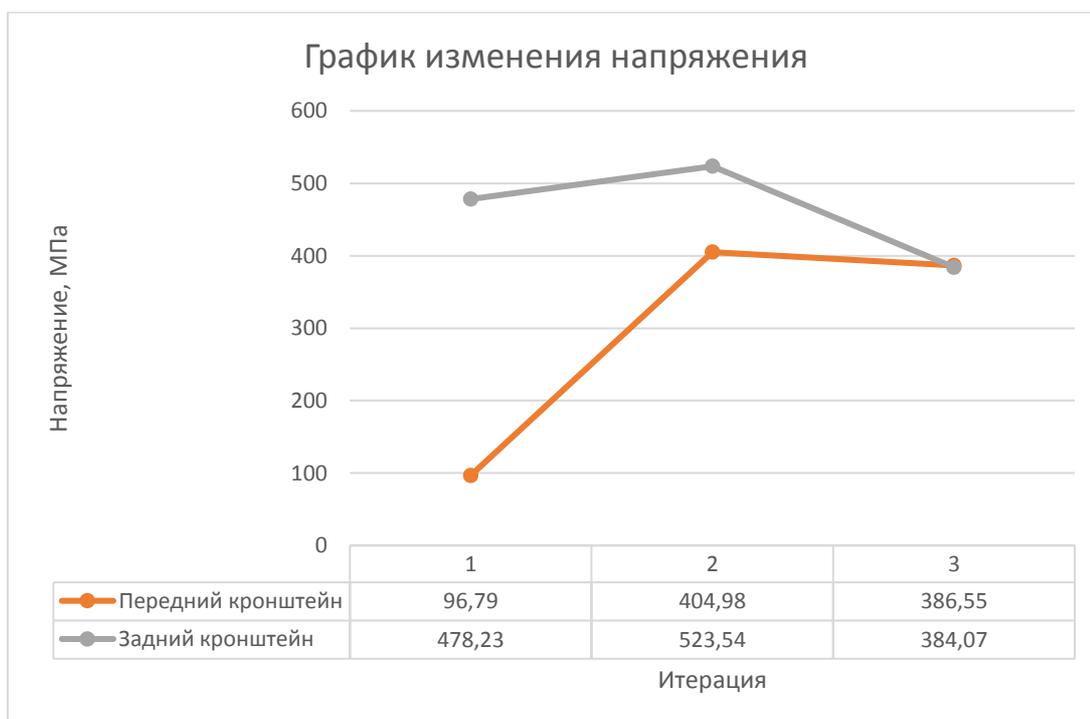
Масса модели составила 1.96 кг, что на 0.3864 кг меньше предыдущей итерации и на 0.5808 кг меньше чем изначальная геометрия модели

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		86

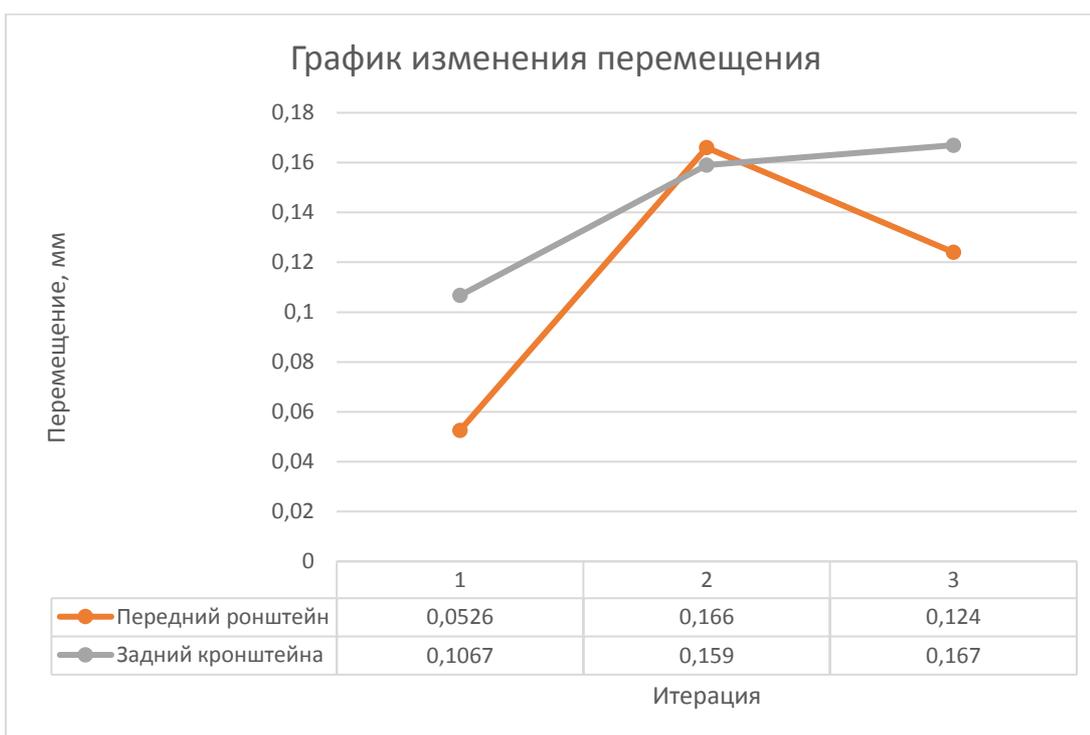
3.10 Сравнительный анализ полученных результатов

В этом параграфе проведем сравнительный анализ и сравнение всех моделей кронштейнов. На основе полученных результатов анализа напряжений, перемещений сделаем график для оценки изменений в полученных конструкциях.

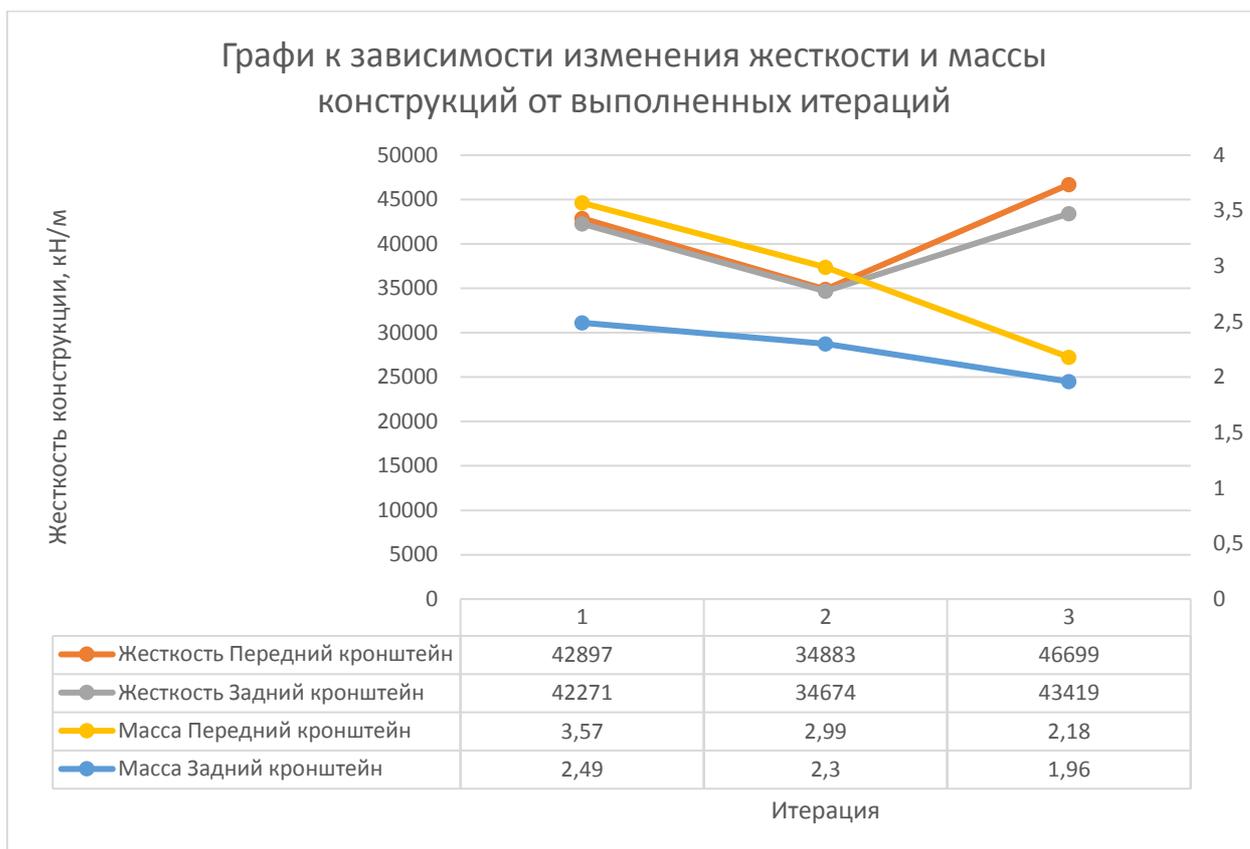
3.10.1 Анализ на распределение напряжения



3.10.2 Анализ на перемещение



3.10.3 Анализ изменения жесткости и массы конструкций



Неоспоримым преимуществом последней итерации для модели 2 является существенное уменьшение веса детали. В первой итерации модели вес детали составлял 3.57 кг, в последней итерации вес модели составляет 2.18 кг, что меньше на 1.4 кг.

Модель 3 в финальной итерации уменьшила вес с 2.49 кг до 1.96 кг, разница составляет 0.53 кг. Модель обладает отличными показателями по распределению напряжения и максимальному перемещению. Данная модель отлично подходит под заданные требования.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

88

3.10.4 Сравнение геометрии конструкций опор

Таблица 3.1

Передний кронштейн	
	
Заводская конструкция	Разработанная конструкция
Разработанная конструкция обладает массой 2.18 кг, максимальными напряжениями до 386.55 МПа, максимальным перемещением до 0.124 мм.	
Задний кронштейн	
	
Заводская конструкция	Разработанная конструкция
Разработанная конструкция обладает массой 1.96 кг, максимальными напряжениями до 384.07 МПа, максимальным перемещением до 0.167 мм.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ

Лист

89

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была проведена разработка конструкций опор силового агрегата с использованием метода топологической оптимизации. Была достигнута цель повышения жесткости, а также снижение массы детали. Передняя опора изначально имела вес 3.57 кг, после проведение нескольких итераций с использованием метода топологической оптимизации было снижение массы детали до 2.18 кг, разница составляет 1.39 кг. Задняя опора изначально имела вес 2.49 кг, после проведенных улучшений вес составил 1.96 кг.

Оптимизация кронштейна навески двигателя предпринята применяя определенные изменения в его дизайне и форме. После сравнение результатов, полученных из проведенного анализа, пришел к выводу, что найдена успешная попытка оптимизации.

Модифицированная конструкция кронштейна имеет на 39% и 23% меньше вес, чем начальная не оптимизированная геометрия. Это приводит к экономии материала и общему снижению затрат. Была достигнута цель повышения жесткости и уменьшения массы детали.

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		90

CONCLUSION

The design of the support structures of the power unit was carried out using the method of topological optimization. The goal of increasing rigidity was achieved, as well as reducing the mass of the part. The front support initially had a weight of 3.57 kg, after several iterations using the topological optimization method, the mass of the part was reduced to 2.18 kg, the difference is 1.39 kg. The rear support initially weighed 2.49 kg, after improvements the weight was 1.96 kg.

Optimization of the engine mount has been undertaken by applying certain changes in its design and shape. After comparing the results obtained from the analysis, I came to the conclusion that a successful optimization attempt was found.

The modified bracket design has 39% and 23% less weight than the original non-optimized geometry. This results in material savings and overall cost savings. The goal of increasing the rigidity and reducing the mass of the part was achieved.

					<i>ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		91

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tovar A. Bone Remodeling as a hybrid cellular automaton optimization process // Ph.D. thesis. University of Notre Dame. Notre Dame. IN. 2019. 215 p
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Мир, 1975. 541 с.
3. Сергеева С.А. Анализ чувствительности и оптимизации пологих стержневых конструкций с учетом геометрической нелинейности и ограничений на устойчивость. 2018г. 281 с.
4. Е.А. Чудаков. Инженерные расчеты в машиностроении. Том 1. 556 с.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Мир, 1979. 392 с.
6. http://www.ulsu.ru/media/documents/Линейный_статистический_анализ_конструкций.pdf.
6. Кленников В.М., Кленников Е.В. Теория и конструкция автомобиля. 2009 г. 312 с.
7. E.W. Andrews, L.J. Gibson, M.F. Ashby the creep of cellular solids 2018 // URL: <http://www.metalfoam.net/papers/andrews.pdf>
8. Стуканов В.А. Основы теории автомобильных двигателей и автомобиля. 2005 г. 186 с. Издательский дом «ИНФА-М»
9. Умняшкин В.А., Филькин Н.М., Музафаров Р.С. Теория автомобиля. Издательство ИжГТУ. 2017 г. 271 с.
10. Чистяков В.К. Динамика поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания 1989 г. 258 с.
11. Гончаров, Артамонов, Халитов, Денисихин, Сотник - NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. Изд.: ДМК Пресс. 2012 г.

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

ПРИЛОЖЕНИЕ

					ВКР.23.04.02.2020.1266.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		93