

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Институт прикладной математики и механики

Кафедра «Механика и процессы управления»

Работа допущена к защите

Зав. кафедрой

_____ Д.А. Индейцев

"__" _____

Бакалаврская работа

по направлению 151600 «Прикладная механика»

«Проектирование и оптимизация фрезерованного фитинга»

Выполнил студент группы 43602/1

Бронников И.С.

Руководитель

асс. Новокшенов А.Д.

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

1 Теория оптимизации	4
1.1 Определение	4
1.2 Виды оптимизации конструкции.....	5
1.2 Постановка задачи	6
1.3 Методы топологической оптимизации.....	8
1.4.1 Развитие подходов	8
1.4.2 Homogenization method.....	9
1.4.3 SIMP method	10
1.4.4 ESO method	12
2 Численные эксперименты	13
2.1 Модельные задачи	13
2.1.1 Консольная балка с круглым отверстием	13
2.1.2 Консольная балка с двумя условиями нагружения.	16
2.1.3. Консольная балка с неоптимизируемой областью и двумя условиями нагружения.	20
3 Оптимизация фитинга.	22
3.1 Постановка задачи.....	22
3.2 КЭ постановка задачи.	25
3.3 Получение оптимизированной модели.	27
3.3.1. Оптимизация без технологических ограничений	29
3.3.2. Оптимизация с технологическим ограничением Split Draw	33
3.3.3. Оптимизация с технологическим ограничением Extrusion ..	36
3.4 Анализ напряженно-деформируемого состояния	41
4 Заключение	45
5 Литература	46

Введение

Полеты в космос в наше время уже не считаются чем-то неординарным, как несколько столетий назад. Аэрокосмическая область шагает по пути развития большими шагами. Первый искусственный спутник (ИСЗ) Земли, Спутник-1, был пущен 4 октября 1957 года [1]. Массой он был всего 83.6 кг и находился на орбите 3 месяца. Это событие дало начало космической эры человечества.

В настоящее время существует большое количество космических аппаратов различных типов. Все они выполняют большой перечень задач. Начиная с осуществление телевидения на земле до исследования дальнего космоса. Стоимость ракет и их запуска варьируются в большом диапазоне. Одной из основных задач космических кораблей – это вывод грузов в открытый космос. Поэтому важнейшей тенденцией в области космической техники является оптимизация массы и размеров компонентов. Благодаря внедрению передовых технологий появилась возможность существенно уменьшить вес, объём космических аппаратов, что приводит к снижению общих затрат на производство и запуск ракет в космос. Это дает больше свободы действий ученым и способствует ускорению процесса освоения космоса.

В рамках данной работы будет рассмотрена модель кронштейна космического аппарата (рис. 1). Будет проведена топологическая оптимизация с применением граничных условий и условиями на обработку. Полученная модель будет доработана до вида, пригодного для производства.

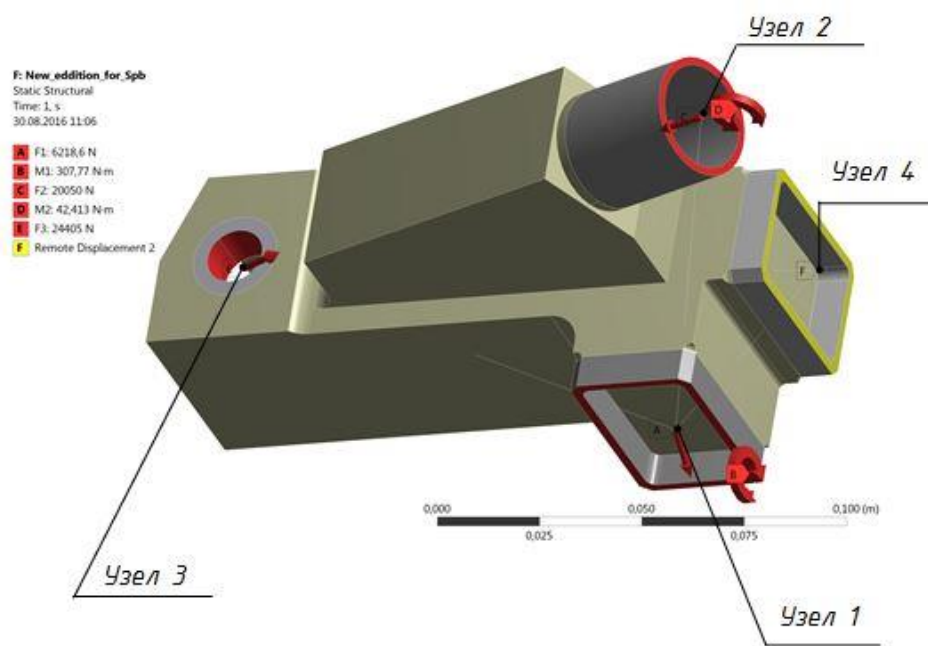


Рис. 1 Модель фитинга

1 Теория оптимизации

1.1 Определение

Оптимизация - есть процесс поиск и выбора оптимального варианта решения задачи из множества всех возможных вариантов при заданных условиях и ограничениях. На выходе процесса получается оптимальное решение для данной задачи. Для сравнения различных вариантов и выбора лучшего вводятся критерии оптимизации. Оптимизировать можно всё вокруг, главное чтобы имелось более одного варианта решения и критерий оптимизации. Мы будем рассматривать оптимизацию геометрии тела, его геометрической структуры. То есть те свойства тела, которые остаются неизменными при деформации. Этого можно добиться при требовании максимизации жесткости тела и уменьшение массы. В результате мы получим какую-то форму тела, с массой, меньше исходной, что является одним из главной задачей при производстве. Далее рассмотрим виды, основные понятия и методы оптимизации.

1.2 Виды оптимизации конструкции

Существует 3 основных вида оптимизации.

Оптимизация размера (Size optimization). Простейший из трех методов структурной оптимизации. Суть метода состоит в изменении размеров конструкции при сохранении ее формы и топологии. Отсюда, оптимизация состоит в определении значений конструктивных параметров, дающих оптимальное структурное поведение конструкции. В первых реализациях данного метода использовались простейшие фигуры, как фермы, рамы или пластины. Для их оптимизации пользовались методами параметризации геометрии детали. Также можно варьировать материал стержней фермы или изменять их конфигурацию (координаты конечных точек составляющих фермы). Обычно рассматривается комбинация всех трех типов размерных переменных.

Оптимизация формы (Shape optimization). Как и при оптимизации размера, топология (количество отверстий, балок и т. д.) структуры остается прежней, постоянной. Оптимизация формы не приводит к созданию новых отверстий или тел. Переменные оптимизации в этом случае задают форму конструкции. Переменные оптимизации могут быть параметрами, определяющими какие-либо особенности формы или ее важнейшие размеры. Например, переменной оптимизации может быть радиус круглого отверстия или длина стороны квадратного отверстия в детали. Очевидно, что изменение этих параметров может значительно изменить геометрию.

Оптимизация топологии (Topology optimization). Это такие изменения, которые включают создание новых границ и удаление существующих с учетом заданных нагрузок и связей. Переменные данной оптимизации должны определять конкретную топологию детали. В процессе оптимизации лишние элементы базовой структуры удаляются автоматически, когда площадь их поперечного сечения оказывается равной нулю. Получившаяся в результате структура имеет оптимальную топологию. Возможно несколько вариантов

оптимальной структуры, хотя оптимальное значение веса структуры единственно.

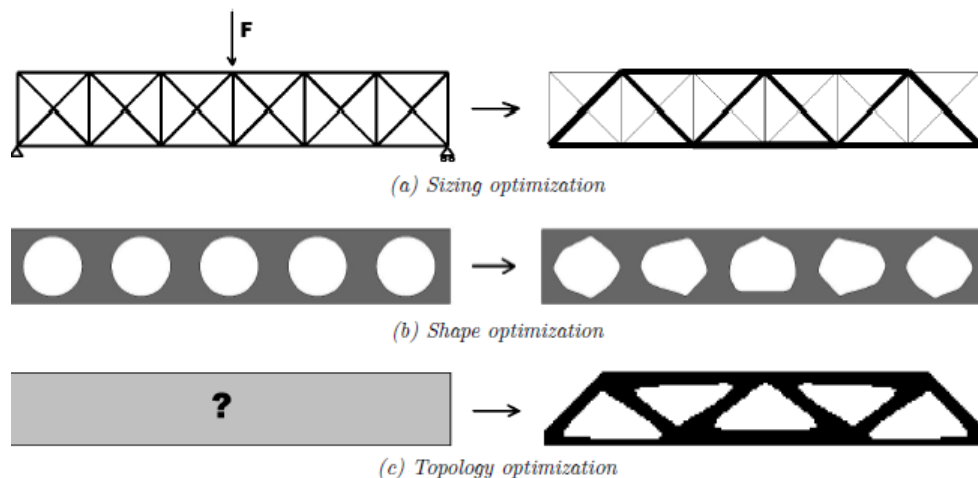


Рис. 1.2.1 (a) Оптимизация размера, (b) Оптимизация формы, (c) Топологическая оптимизация

1.2 Постановка задачи

Для того чтобы можно было оптимизировать какую-либо конструкцию нужно провести её параметризацию. Это дает нам возможность создать альтернативные формы конструкции, изменяя те самые параметры. К примеру, при разработке кронштейна, параметрами будут свойства материала, толщина кронштейна, высота. Иногда, некоторые параметры должны быть постоянны, вследствие каких-либо ограничений.

Мерой качества процесса оптимизация может служить масса или жесткость всей конструкции. Тогда наши оптимизируемые параметры называются параметрами проектирования, а мера качества – целевой функцией.

Оптимизацию конструкции можно и описать математическим языком следующим образом:

$$X^* \in R^n : F(X^*) = \min F(X)$$

при условии, что

$$X_l \leq X^* \leq X_u;$$

$$G_i(X^*) \geq 0, i = \overline{1, m};$$

$$H_j(X^*) = 0, j = \overline{1, q};$$

Где:

F- целевая функция (objective),

X- вектор параметров,

R^n -пространство размерности n,

X^* -оптимальное решение,

X_l, X_u -нижний и верхний предел для параметров проектирования соответственно,

m- количество ограничений-неравенств,

q- количество ограничений-равенств.

В качестве целевой функции могут выступать различные величины, например: масса, перемещение, напряжение и другие. Также этими величинами могут быть выражены и ограничения. В примере, приведенном выше, задача оптимизации будет записана следующим образом:

Толщина кронштейна(h), высота(b), материал постоянный. Требуем минимизацию массы(m). При этом возникающие в конструкции напряжения должны не превышать предел текучести материала.

$$m(b, h) = \min m(b^*, h^*)$$

$$\text{Высота: } b_l \leq b \leq b_u$$

$$\text{Толщина: } h_l \leq h \leq h_u$$

$$\sigma(b, h) \leq \sigma_{max}$$

$$\tau(b, h) \leq \tau_{max}$$

1.3 Методы топологической оптимизации

1.4.1 Развитие подходов

Исследования в области оптимизации началось с 1700-х годов, а именно с Эйлера и Лагранжа [2]. Объектом их исследования была площадь поперечного сечения колонны или стержня. Далее была оптимизация простейших деталей, таких как фермаподобные структуры. Успехов в этой области достиг Топпинг [3]. Применялся подход базовой структуры [4]. Суть подхода в том, что вся конструкция покрывалась решеткой узлов. К узлам прикладывались нагрузки и задаются ограничения. При соединении каждого узла с остальными получалась основная структура. С помощью алгоритмов линейного программирования ненужные элементы удаляются путем зануления площади поперечного сечения элемента. Размеры соединений оптимизируются методом нелинейного программирования. Проблемами этого метода было резкое увеличение напряжений в элементе при стремлении его поперечной площади сечения к нулю, а также вырождение матрицы жесткости при удалении некоторых элементов.

Также анализ совершался методом конечных элементов. Со временем при помощи этого метода ученые смогли автоматизировать решение уравнений состояния, что позволило им добиться больших достижений в области оптимизации конструкций. Существует несколько основных подходов к описанию материала: Homogenization method, SIMP (Solid Isotropic Material with

Penalisation) method, ESO (Evolutionary Structural Optimization) method. Далее рассмотрим эти методы поподробнее.

1.4.2 Homogenization method

В 1988 году Кикучи и Бендсо в работе [5] предложили считать, что объект, подвергающийся топологической оптимизации, можно рассмотреть как композит, тело является пористым. Вся оптимизируемая область делится на ячейки. Ячейка в свою очередь состоит из двух частей – вещество и полость. Предполагается, что материал состоит из бесконечного числа ячеек. Поведение этого материала описывается уравнениями линейно упругой среды. Анализ происходит в два этапа. Сначала прикидывается примерная форма детали, а потом методом конечных элементов варьируется граница области. В результате получается оптимальная геометрия детали.

В 1991 году Кикучи и Сузуки развили дальше этот метод [6]. Они предположили, что полость в ячейке можно считать прямоугольной, со стороной a и b (рис. 1.2.1.). Тем самым упростив задачу до двух параметров.

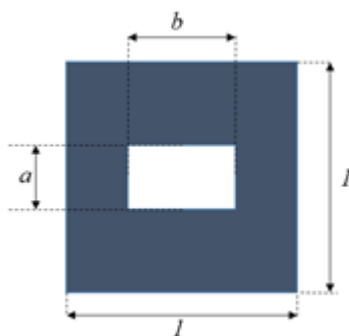


Рис. 1.2.2. Ячейка, описывающая микроструктуру с прямоугольной полостью

Получается, что при $a=b=l$ ячейка вырождается и в этом месте материал не добавляется, а при $a=b=0$ ячейка полностью заполнена материалом. В случае, когда параметры a и b не принимают экстремальных значений, создается пористая среда. Данный подход имеет недостатки. А именно в трудности вычисления результатов и частичной реализации на практике [7].

1.4.3 SIMP method

SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) является на сегодняшний день одним из самых развитых и изучаемых методов. В 1990 году данный метод был представлен Бендсо [8].

Суть метода заключается в разделении объекта оптимизации на сетку из N элементов. Свойства материала внутри каждого элемента считаются постоянными. В качестве параметра проектирования берется относительная плотность. В качестве целевой функции выступает энергия деформации SE (Strain Energy). Важным условием метода является задание коэффициента Пуассона, иначе метод не будет достаточно достоверен. Ограничения накладываются на объём. Математически метод можно записать следующим образом:

$$\min_{\rho_i} : SE(\rho_i) = \sum_{i=1}^N (\rho_i)^p u_i^T k_i u_i$$

$$\frac{V(\rho_i)}{V_0} = f$$

$$KU = F$$

$$0 \leq \rho_{min} \leq \rho \leq 1$$

Где:

- F и U глобальные вектора сил и перемещения соответственно
- K глобальная матрица жесткости
- k_i матрица жесткости элемента
- u_i вектор перемещения элемента
- ρ_i вектор параметров проектирования

- ρ_{min} вектор минимума относительной плотности (ненулевой во избежание сингулярности)
- количество элементов в модели
- $V(\rho_i)$ текущий объём конструкции
- V_0 начальный объём конструкции
- f изначально заданный коэффициент изменения объёма (какую долю нужно удалить от начального количества)
- p штрафной коэффициент

В методе могут быть наложены ограничения на производство, например под производство литьем. Тогда всем элементам, параллельном направлению литья, необходимо присвоить возрастающее значение плотностей [9].

Ограничения на напряжение нелинейно зависят от характера распределения материала. На уровень напряжений чрезмерно влияет изменение относительной плотности материала ρ_e в соседних областях, и это явление усиливается в критических областях с большими градиентами напряжений (концентрациями напряжений), например в острых углах. Для корректной постановки задачи топологической оптимизации используется метод фильтрации плотности [10]. С помощью метода решаются сразу две проблемы: влияние грубой сетки КЭ и избежание эффекта шахматной доски (только элементы с единичной и нулевой плотностью) (рис. 1.2.3.).

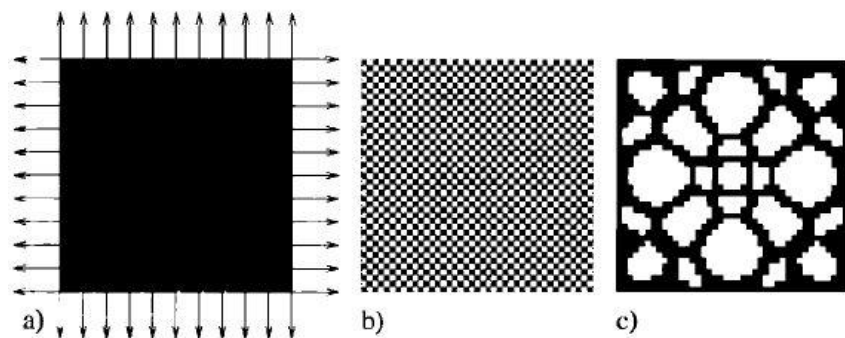


Рис. 1.2.3. (а) Постановка задачи топологической оптимизации, (б) решение без применения фильтрующей техники, (в) решение с применением фильтрующей техники

Новые, отфильтрованные переменные плотности ρ_e создаются путем взятия среднего взвешенного от соседних переменных проектирования x_j . Фильтр записывается так:

$$\rho_i(\vec{x}) = \frac{\sum_{j \in \omega} w_j x_j}{\sum_{j \in \omega} w_j}$$

Где ω - множество, содержащее все элементы j , лежащие внутри круга радиусом r , измеренного между центрами притяжения соседних элементов i и j . w_j средневзвешенный коэффициент (Рис. 1.2.4.).

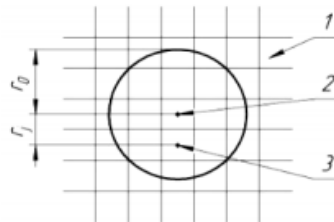


Рис. 1.2.4. Визуализация переменных проектирования (1 - конечно-элементная сетка; 2 - переменная проектирования e ; 3 - переменная проектирования j)

$$w_j = \frac{r_0 - r_j}{r_0}$$

Вес всех переменных проектирования, находящийся вне множества ω , равен нулю.

$$\rho_i(\vec{x}) = \sum_{j=1}^{n_i} w_{ij} x_j$$

1.4.4 ESO method

ESO (Evolutionary Structural Optimization) является одним из основных методов топологической оптимизации. Был представлен в [11]. Суть метода состоит в том, что пространство оптимизации несколько больше самой модели. Оптимизация происходит за счет удаления материала из пространства. Материал выбирается по коэффициентам, линейно зависящих от эквивалентных напряжений по Мизесу. Позже был разработан двухсторонний

метод ESO, суть которого была в возможности добавлять материал обратно. ESO не опирается на математическое программирование в методах оптимизации как SIMP метод. Поэтому на данный момент SIMP метод более распространен.

2 Численные эксперименты

Теперь перейдем к решению практических задач с помощью топологической оптимизации. Нами была выбрана программа HyperMesh с решателем OptiStruct.

OptiStruct – современный анализатор структурного анализа для линейных и нелинейных задач при статических и динамических нагрузках. Он точно обрабатывает нелинейность материалов, геометрии и контакт для приложений, включая анализ прокладок, предварительное натяжение болта, ротординамику и термоструктурный анализ [12]. Данный решатель справляется с большим спектром задач, начиная от анализа жесткость и прочности до анализов теплопередачи и излучения звука.

Но нам нужно убедиться, что данное программное обеспечение дает нам правильное, достоверное решение задач по распределению материала в оптимизируемой детали. Чтобы в этом убедиться, рассмотрим несколько простых задач и сравним их решения с решениями, полученные в работе[13].

2.1 Модельные задачи

2.1.1 Консольная балка с круглым отверстием

Рассмотрим задачу топологической оптимизации. Консольная балка с круглым отверстием. Размеры прямоугольной балки 3 x 2 метра. Отверстие располагается симметрично относительно верхней и нижней границы, на расстояние 1 метра от левой границы. Радиус отверстия 1.3 метра. Левая граница закреплена. Область представлена на Рис. 2.1.1.

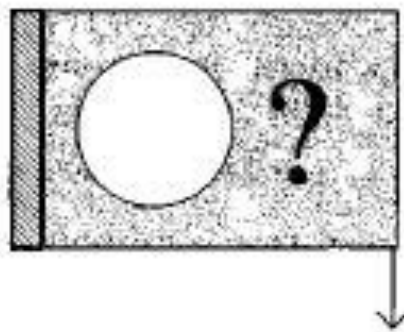


Рис. 2.1.1. Рассматриваемая область

Имеются следующие характеристики материала:

- Модуль Юнга $E = 1,18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
- Коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$

Целевая функция: минимизация податливости конструкции

Условия оптимизации: удаление 60% объёма.

Условия нагружения: перерезывающая сила величиной 1000 Н приложена в правом нижнем углу.

На Рис. 2.1.2. представлена постановка задачи в системе HyperMesh.

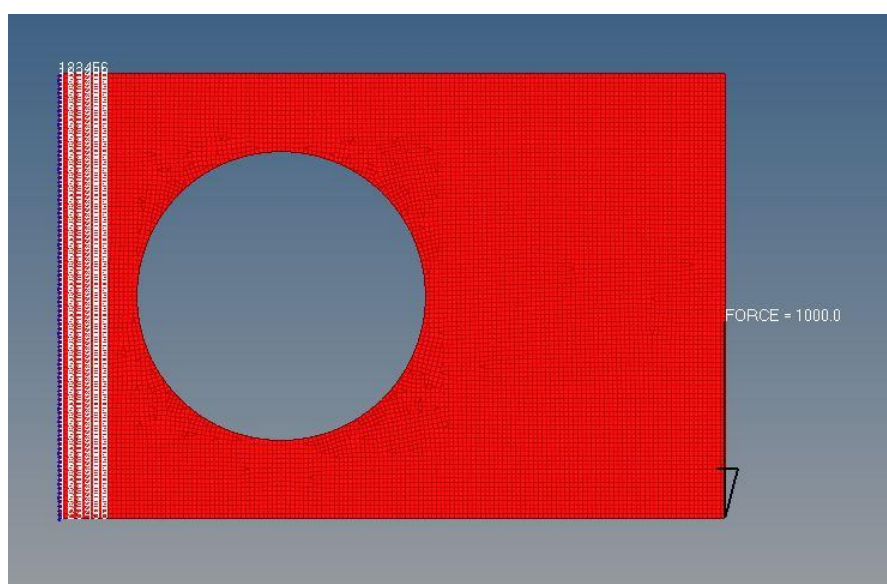


Рис. 2.1.2 Постановка задачи в HyperMesh

Итоги оптимизации и ключевые этапы топологической оптимизации (распределение плотностей по конструкции) приведены ниже:

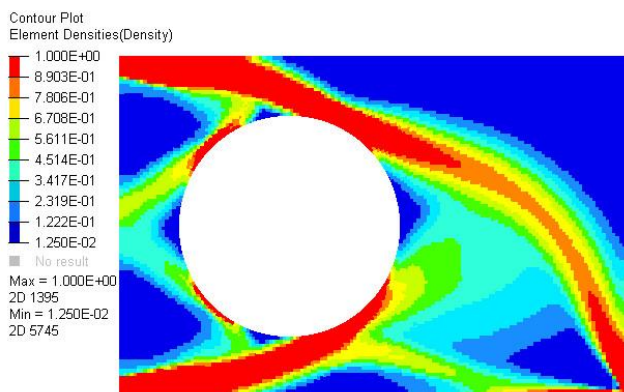


Рис. 2.1.3. Итерация 5

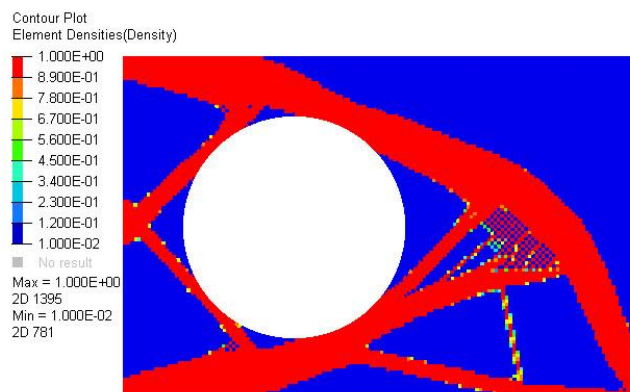


Рис. 2.1.4. Итерация 50

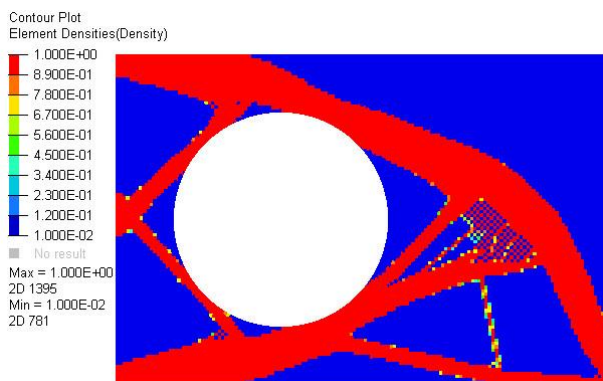


Рис. 2.1.5. Итерация 100

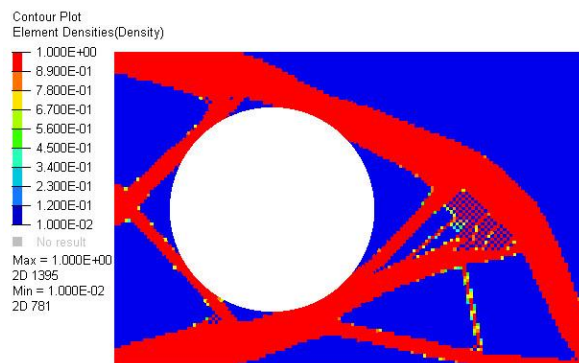


Рис. 2.1.6. Итерация 118

Далее приведем сравнение результатов оптимизации в OptiStruct с эталонным решением из [13].

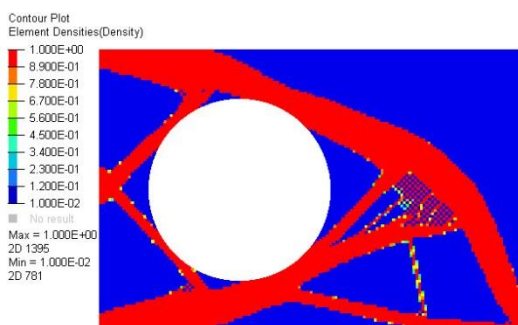


Рис. 2.1.7. Итоговое решение



Рис. 2.1.8. Эталонное решение

Общий вид полученной конструкции совпадает с проведённым ранее расчетом. Основные элементы конструкции совпадают с эталоном, имеются небольшие различия в толщинах элементов, но не критические.

2.1.2 Консольная балка с двумя условиями нагружения.

Будем рассматривать квадратную область размерами 2 x 2 метра. Левый конец жестко закреплён. В задаче имеются две перерезывающие силы, которые поочередно прикладываются в правом верхнем и в правом нижнем углах конструкции в одном случае и одновременно в другом. Они равны по модулю и противоположны по направлению, величиной 1000 Н. Область представлена на Рис. 2.1.9.

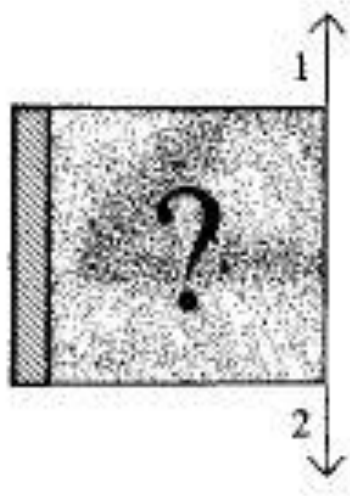


Рис. 2.1.9. Рассматриваемая область

Имеются следующие характеристики материала :

- Модуль Юнга $E = 1,18 \cdot 10^5 \text{ Мпа}$
- Коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$

Целевая функция: минимизация податливости конструкции

Условия оптимизации: удаление 70% объёма.

На Рис. 2.1.10. представлена постановка задачи в системе HyperMesh.

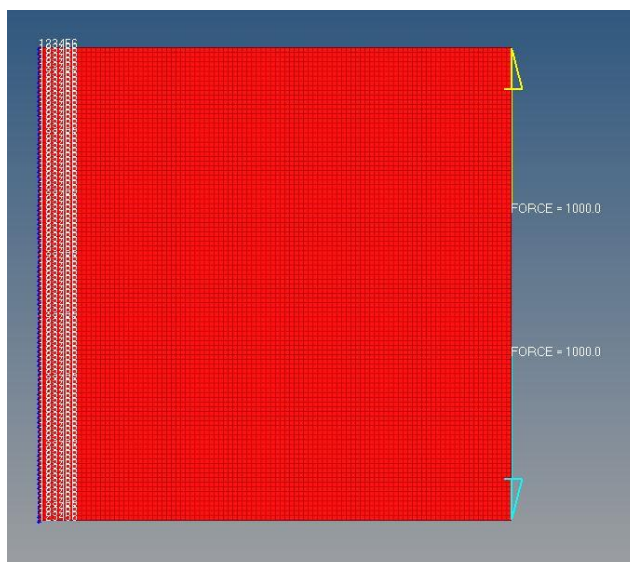


Рис. 2.1.10. Постановка задачи в HyperMesh

Итоги оптимизации и ключевые этапы топологической оптимизации (распределение плотностей по конструкции) приведены ниже:

Одновременное прикладывание сил

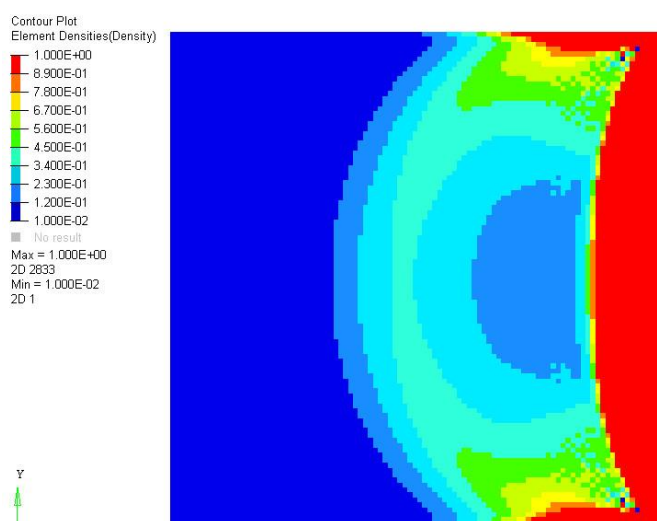


Рис. 2.1.11 Итерация 3

Поочередное прикладывание сил

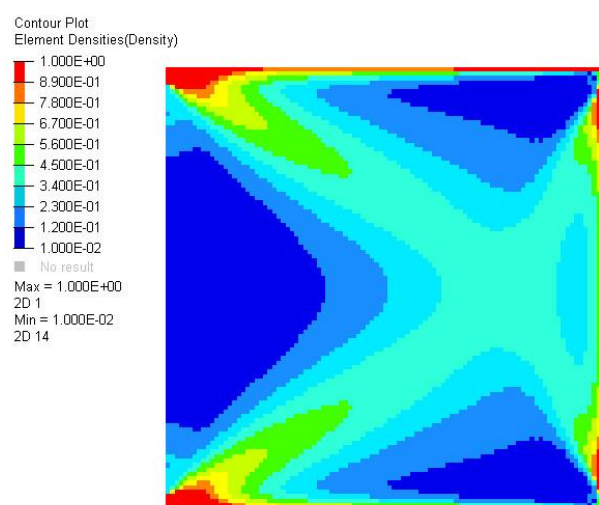


Рис. 2.1.14 Итерация 5

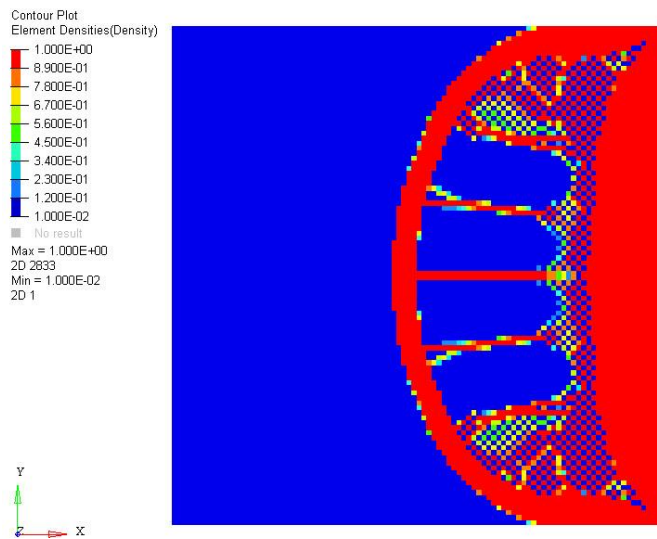


Рис. 2.1.12. Итерация 40

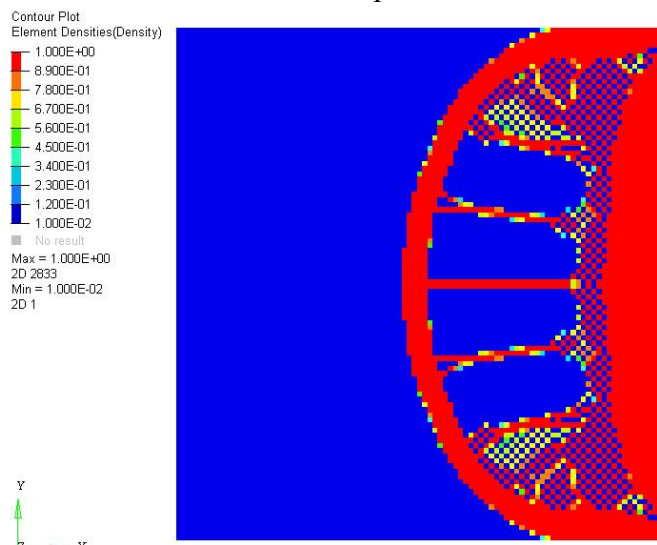


Рис. 2.1.13. Итерация 76

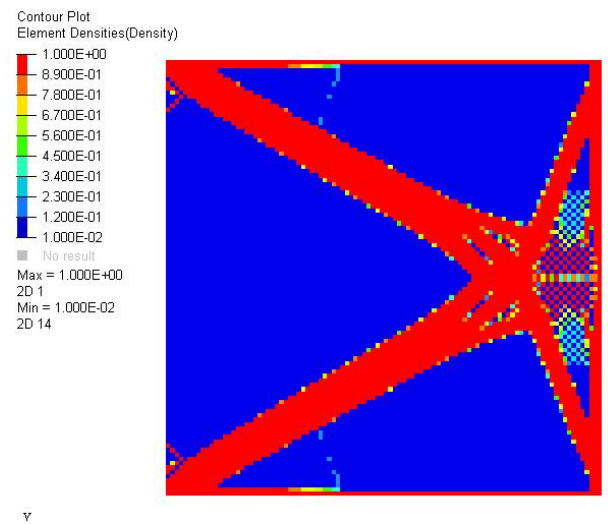


Рис. 2.1.15 Итерация 50

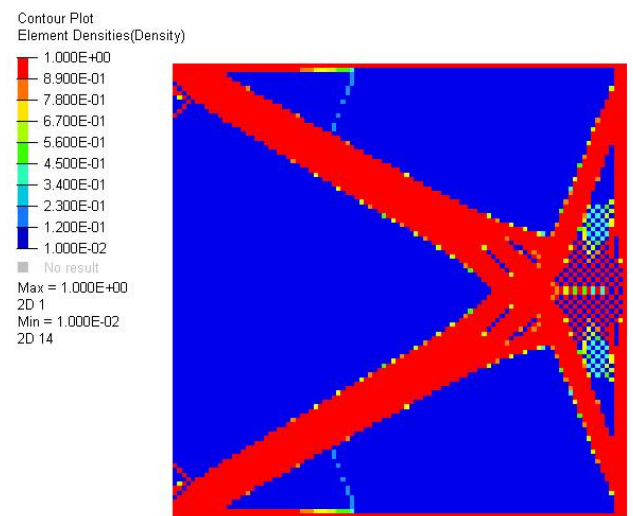


Рис. 2.1.16. Итерация 99

Далее приведем сравнение результатов оптимизации в OptiStruct с эталонным решением из [13].

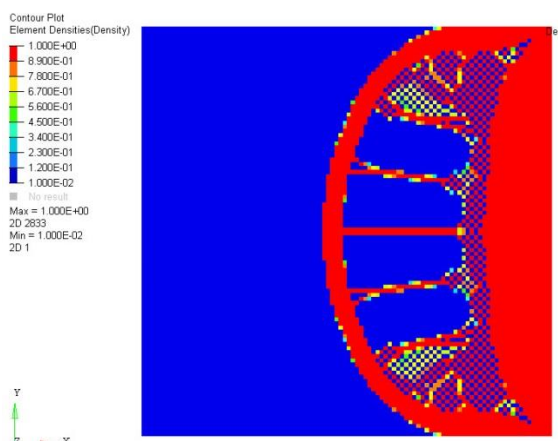


Рис. 2.1.18. Итоговое решение

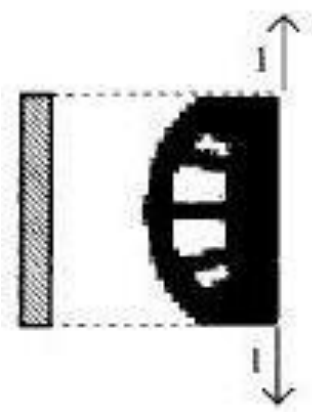


Рис. 2.1.19. Эталонное решение

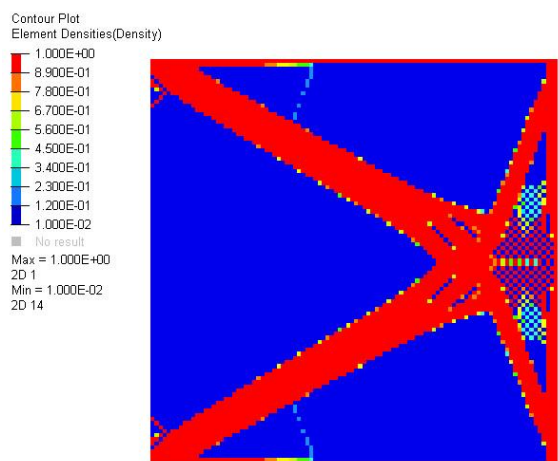


Рис. 2.1.20. Итоговое решение

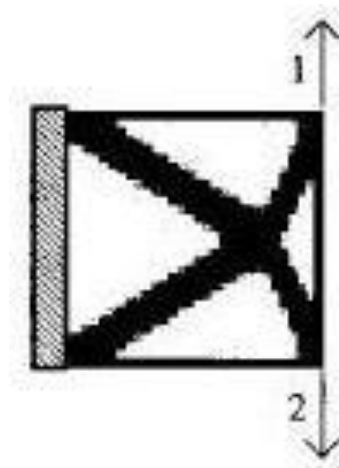


Рис. 2.1.21. Эталонное решение

По картинкам видно, что первый случай схож по форме геометрии, конструкция симметрична, что следует от симметрии приложенных сил. Имеется малые не критичные расхождения.

Во втором случае результат практически полностью совпадает с эталонным. Конструкция также симметрична. Имеется небольшие отличия в правой части области, присутствует материал. Данное различие возможно связано с алгоритмами оптимизации решателя. Однако видно, что форма

геометрии конструкций совпадают. Отсюда можно сделать вывод, что результатам программы можно доверять.

2.1.3. Консольная балка с неоптимизируемой областью и двумя условиями нагружения.

Теперь рассмотрим прямоугольную область размером 3 x 1 метра (рис. 2.1.22.). Левая и правая граница закреплены. В левой части имеется область размера 0,4 x 1 метр (выделена черным цветом), которая не должна быть оптимизирована.

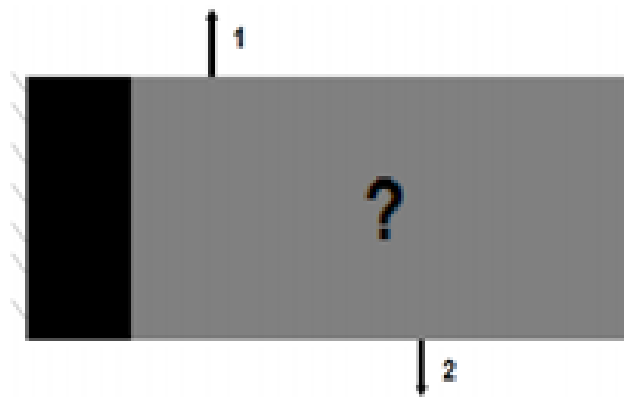


Рис. 2.1.22. Рассматриваемая область

Имеются следующие характеристики материала:

- Модуль Юнга $E = 1,18 \cdot 10^5 \text{ Мпа}$
- Коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$

Целевая функция: минимизация податливости конструкции

Условия оптимизации: удаление 50% объёма.

Условия нагружения: две перерезывающие силы величиной 1000 Н. Первая на верхней границе на расстояние 1 метр от левого края. Вторая на нижней границе на расстояние 2 метра от левого края.

На Рис 2.1.23. представлена постановка задачи в системе HyperMesh.

Синим цветом - область, запрещающая оптимизацию.

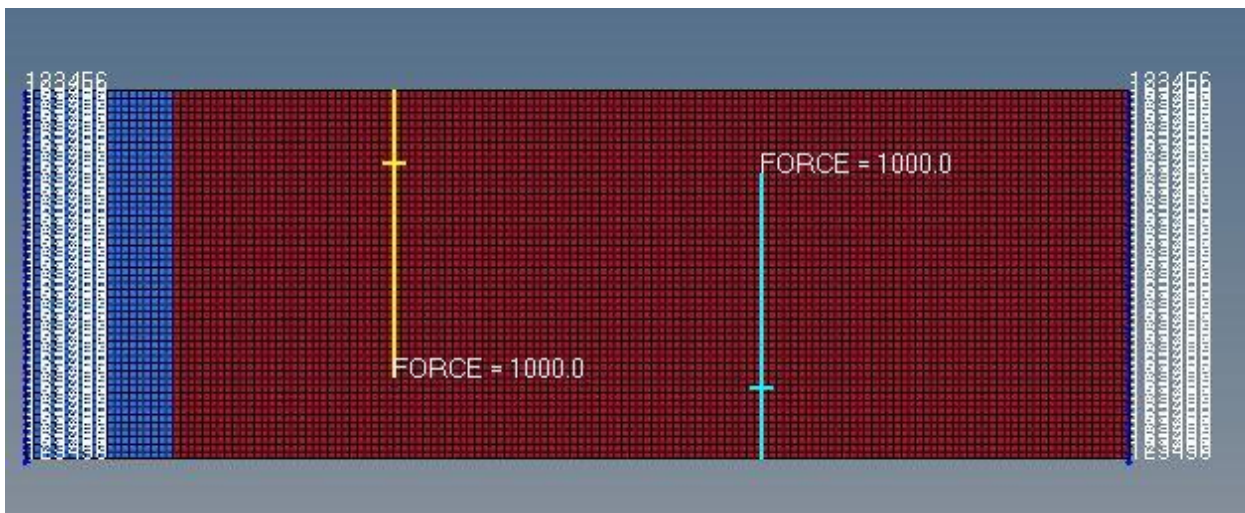


Рис. 2.1.23 Постановка задачи в HyperMesh.

Итоги оптимизации и ключевые этапы топологической оптимизации (распределение плотностей по конструкции) приведены ниже:

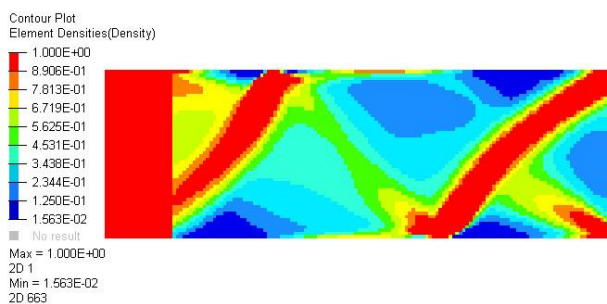


Рис. 2.1.24. Итерация 5

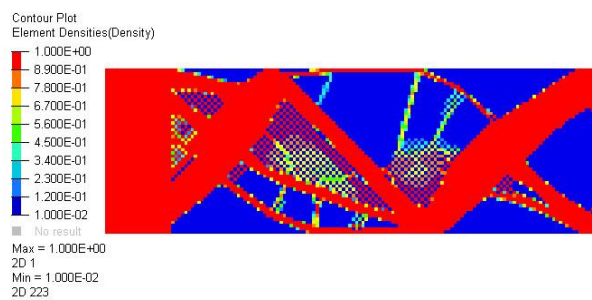


Рис. 2.1.25. Итерация 50

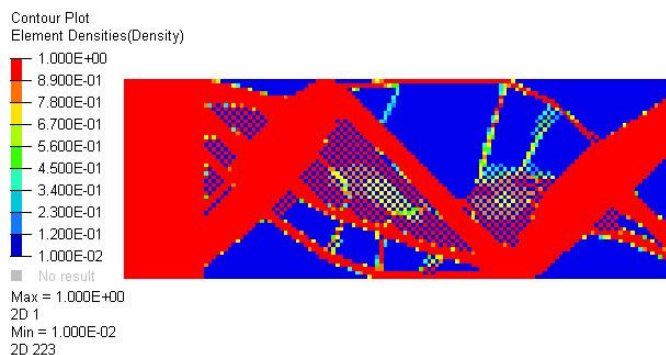


Рис. 2.1.26. Итерация 85

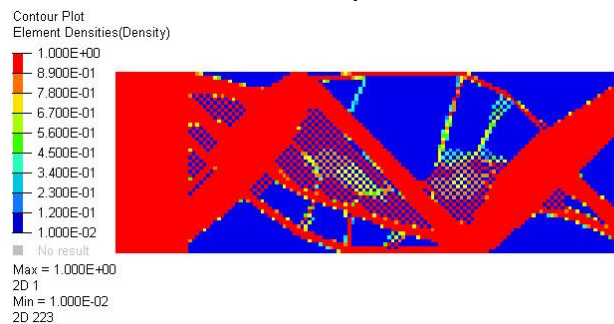


Рис. 2.1.27. Итерация 103

Далее приведем сравнение результатов оптимизации в OptiStruct с эталонным решением из [13].

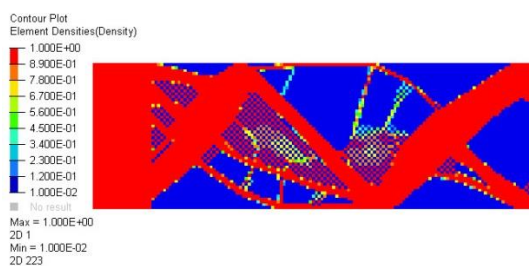


Рис. 2.1.28 Итоговое решение



Рис. 2.1.29 Эталонное решение

Как можем наблюдать имеются некоторые различия, но общий характер оптимизированной области приближен к эталонному.

На основании данных модельных задач, можем сделать вывод о том, что с помощью системы HyperMesh с решателем OptiStruct можно получить достоверные результаты в области решения задач топологической оптимизации.

3 Оптимизация фитинга.

3.1 Постановка задачи

Объектом исследования в моей работе является фитинг, который служит для соединения элементов конструкции космического аппарата.

Фитинг сделан из сплава алюминия. Его свойства приведены ниже:

Таблица 3.1.1 - Свойства материала.

Материал	Характеристика	Значение
Сплав алюминия	Е, Модуль Юнга	70 ГПа
	$\sigma_{0,2}$, Предел текучести	160 МПа
	σ_B , Предел прочности	320 МПа
	ν , Коэффициент Пуассона	0,3
	ρ , Плотность	2700 кг/м^3

Имеются два варианта нагружения фитинга. Варианты приведены ниже:

Таблица 3.1.2. - Варианты нагружения фитинга

Вариант нагружения	Узел	F_x , Н	F_y , Н	F_z , Н	M_x , Н м	M_y , Н м	M_z , Н м
1	1	-5553,0	-2587,7	1067,2	-42,5	-118,6	280,8
	2	-6853,7	-7206,0	17410,0	4,0	-40,3	-12,6
	3	11689,0	7724,8	-19983,0	---	---	---
2	1	-4694,8	-8377,2	-7365,5	98,0	-78,3	185,3
	2	-5515,3	-5413,3	13687,0	35,6	-21,0	-5,0
	3	11741,0	3451,9	5671,7	---	---	---

Расчетная схема представлена на Рис. 3.1.1. Модель закрепляется жестко по торцу прямоугольной балки (выделена желтым цветом) и нагружается сосредоточенными усилиями и моментами по трем площадкам (выделены красным цветом). Варианты нагружения приведены в Таблице 3.1.2. (усилия и моменты приведены в глобальной системе координат фитинга)

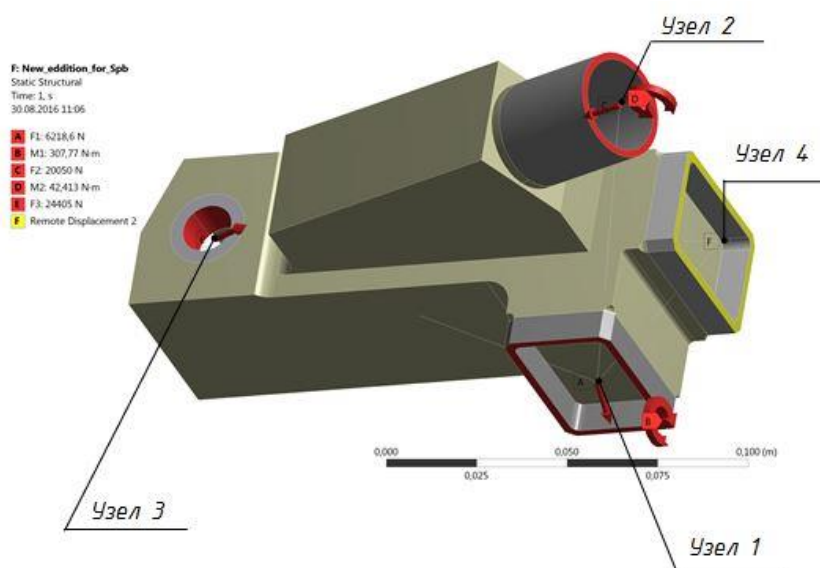


Рис. 3.1.1 Модель

Требуется оптимизировать силовую схему фитинга. Контактные площадки (области серого цвета) оставить неизменными. Все элементы расчетной модели выполнены из материала с характеристиками, представленными в Таблице 3.1.1.

Критерием оптимизации фитинга является минимальная масса.

Ограничениями на оптимизацию являются:

- отсутствие в конструкции внутренних замкнутых полостей;
- минимальная толщина стенки фитинга— 1,5 мм;
- максимальные напряжения в фитинге для всех вариантов нагружения не более σ_B материала.

Технологические ограничения, связанные с особенностями фрезерования, накладывают следующие ограничения на размеры пазов в конструкции (в соответствии с Рис. 3.1.2.):

- минимальная ширина паза B – 6 мм;
- максимальная глубина $H \leq 4 \cdot B$ (но не более 60 мм);
- минимальный радиус бокового скругления R – 3 мм;
- минимальный радиус скругления дна выборки r – 1 мм.

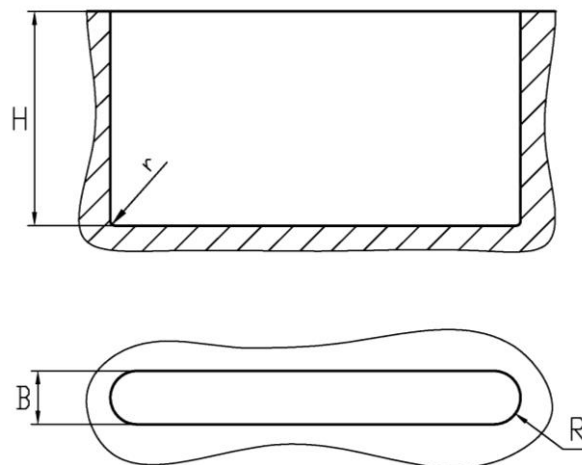


Рис. 3.1.2. Технологические ограничения

3.2 КЭ постановка задачи.

Для решения задачи оптимизации строится КЭ модель фитинга в программе BETA CAE System, ANSA. Вид модели приведен на Рис. 3.2.1.

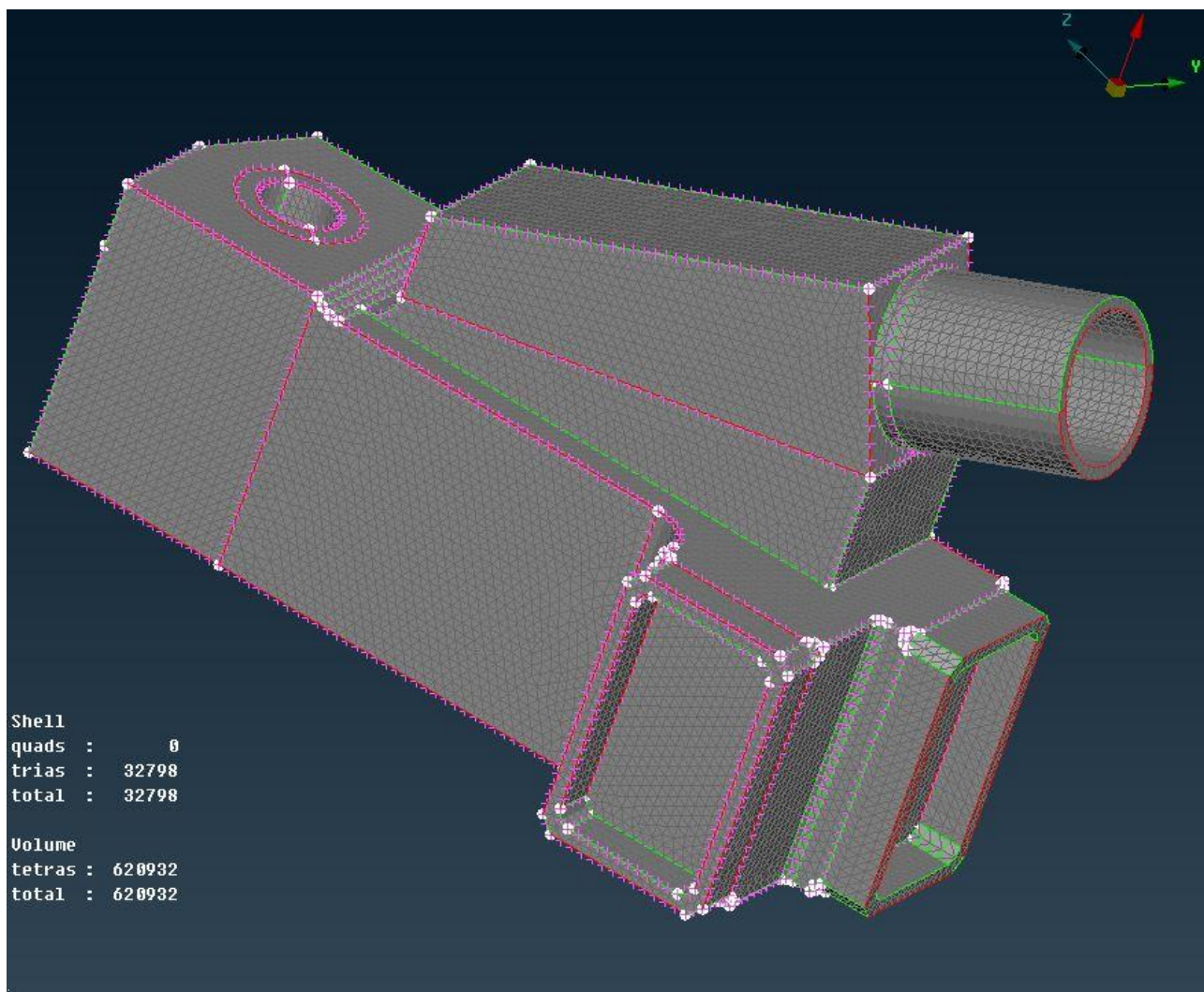


Рис. 3.2.1 КЭ модель фитинга

Модель содержит 32798 trias Shell элементов. По ним построена Tetra КЭ модель, содержащая 620932 элемента.

Также в программе были построены сетки, содержащие узлы, к которым прикладываются силы и моменты, и торцы граней.

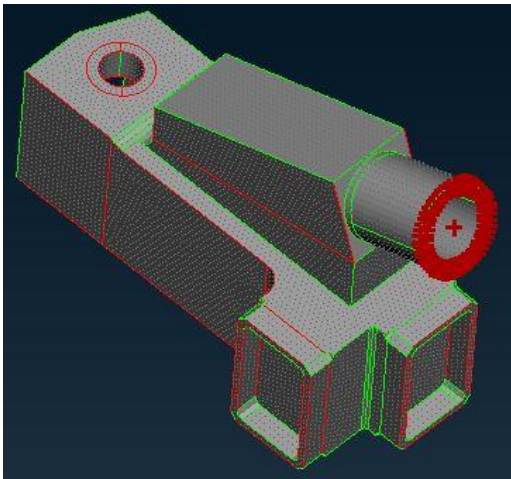


Рис. 3.2.2. Сет 1

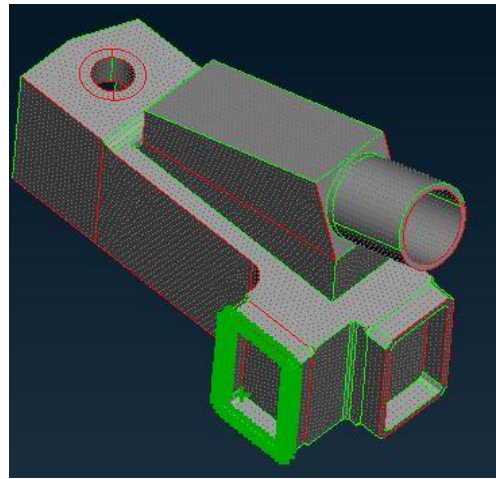


Рис. 3.2.3 Сет 2

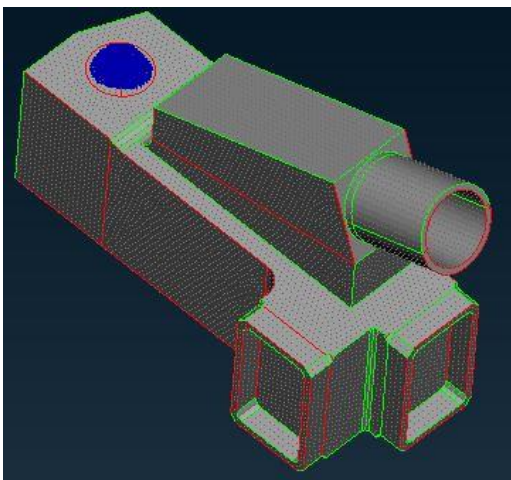


Рис. 3.2.4. Сет 3

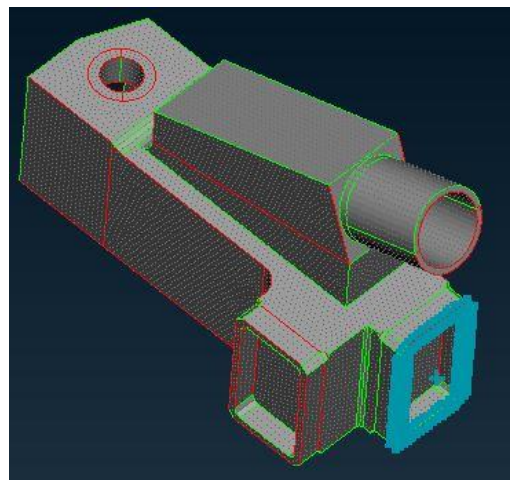


Рис. 3.2.5. Сет 4

3.3 Получение оптимизированной модели.

С помощью программы Ansys созданы элементы точечной массы в узлах, куда прикладываются силы и моменты. Также создана связь узла и граней фитинга Рис.3.3.1. с помощью команды Dist F/M at Mstr.

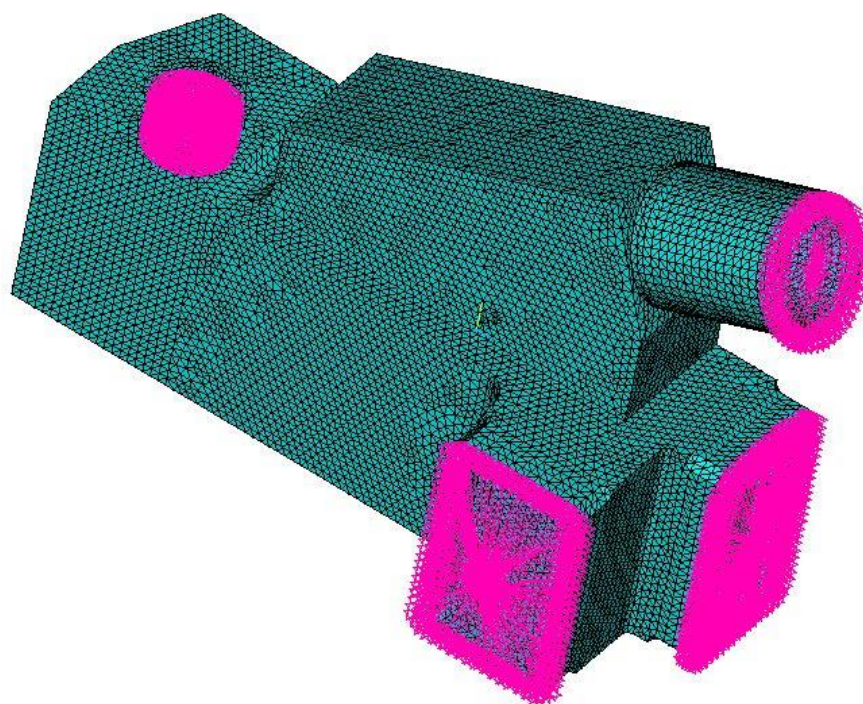


Рис. 3.3.1. Модель фитинга в Ansys

Далее модель конвертируется в систему HyperMesh. Задаются силы, моменты, заделка. Нагрузки обозначаются стрелками, закрепления – белыми конусами. Создаются два варианта нагружения (Loadstep), представленные в Таблица 3.1.2. Вид модели представлен ниже Рис. 3.3.2.

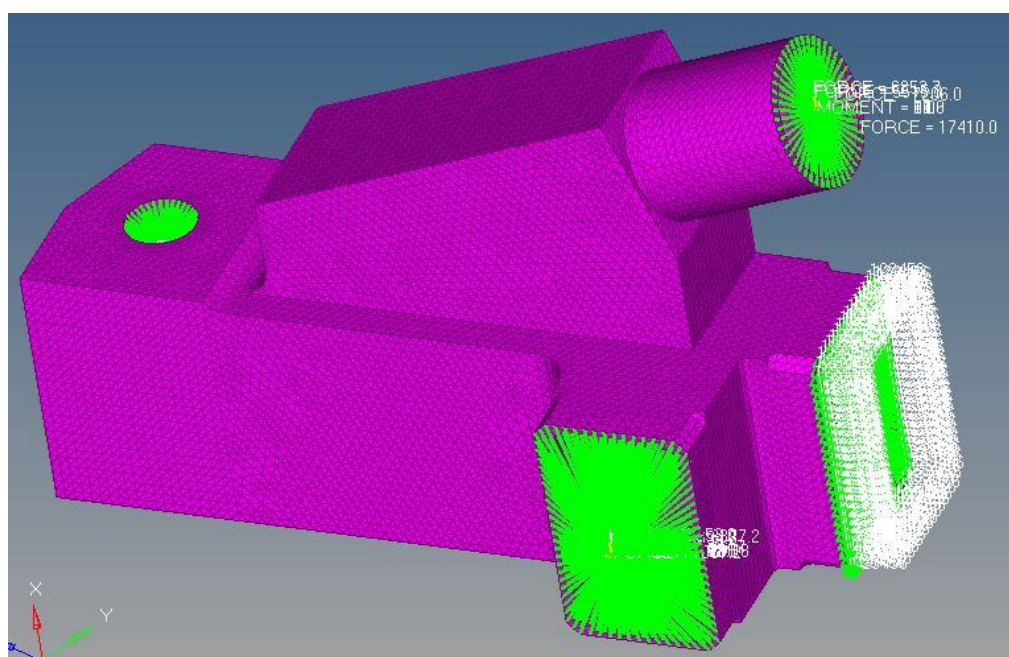


Рис. 3.3.2 Модель фитинга в HyperMesh

После выделяются тетра элементы, которые участвуют в оптимизации (выделены синим), а также те элементы, которые оптимизировать нельзя (красные) Рис 3.3.3.

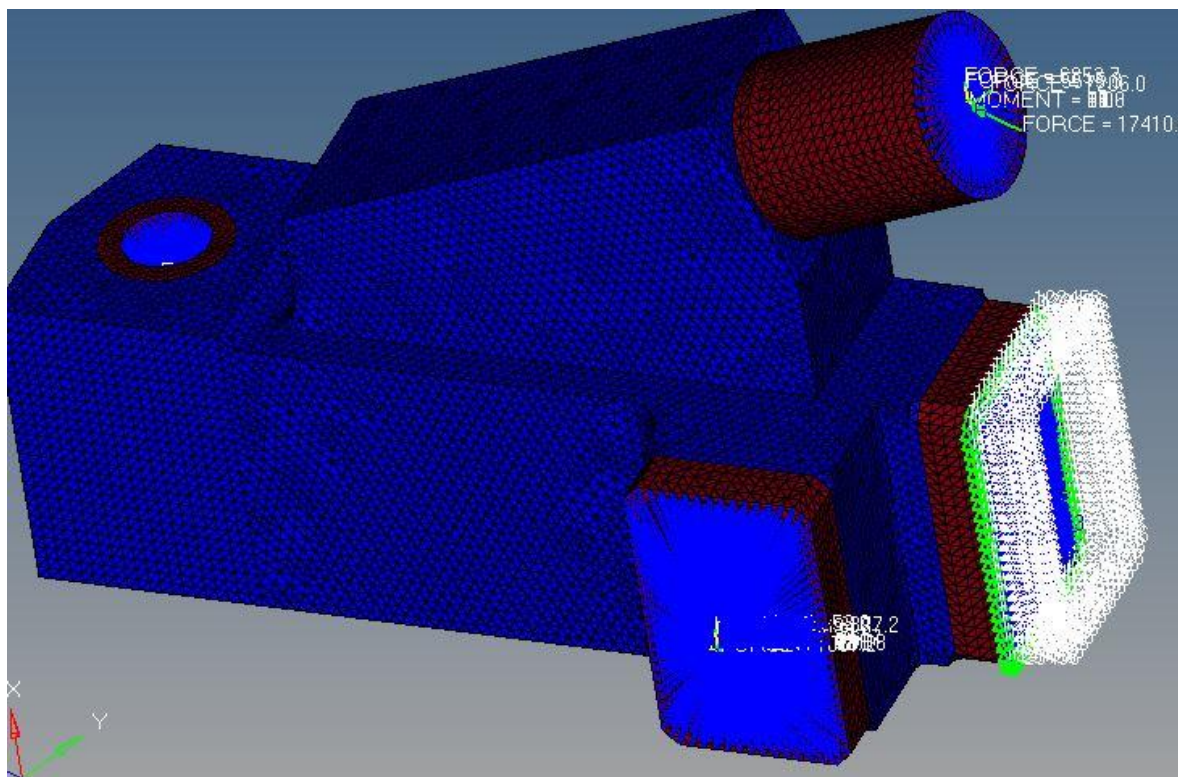


Рис 3.3.3. Зоны оптимизации

В данной модели целевой функция является минимизация массы объекта. Стоят ограничения:

- Ограничение на максимальное напряжение в элементе. Оно не должно превышать предела прочности, а именно 320Мпа.
- Ограничение на минимальную толщину стенки, 1.5мм

3.3.1. Оптимизация без технологических ограничений

Первый расчет производится без ограничений на производство. Итоги оптимизации и ключевые этапы топологической оптимизации (распределение плотностей по конструкции) приведены ниже:

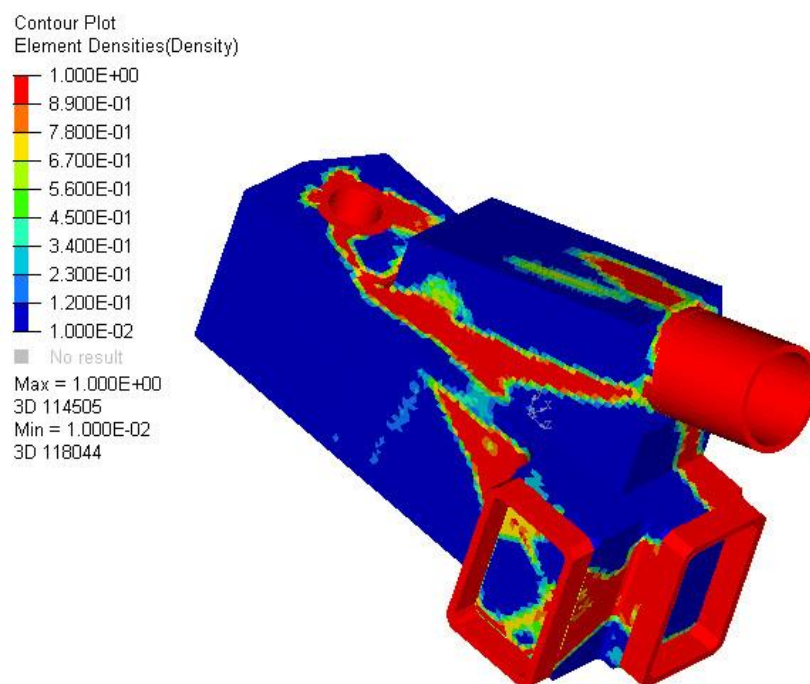


Рис. 3.3.4. Итерация 100

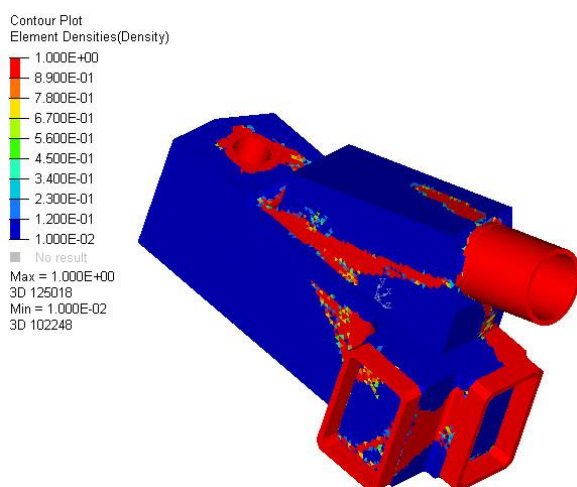


Рис. 3.3.5. Итерация 308

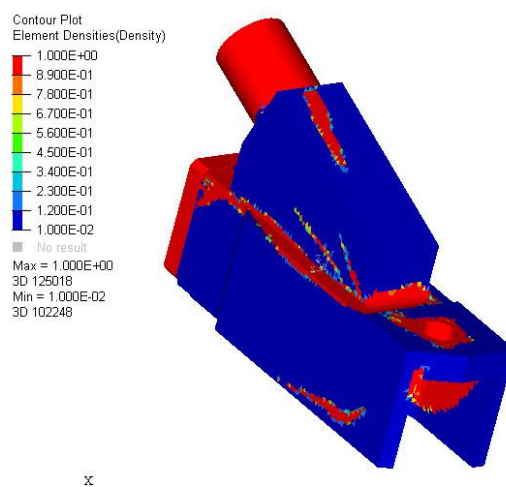


Рис. 3.3.6. Итерация 308

Далее рассмотрим как будет выглядеть модель после оптимизации
Рис. 3.3.7. Значение плотности стоит 0.5.

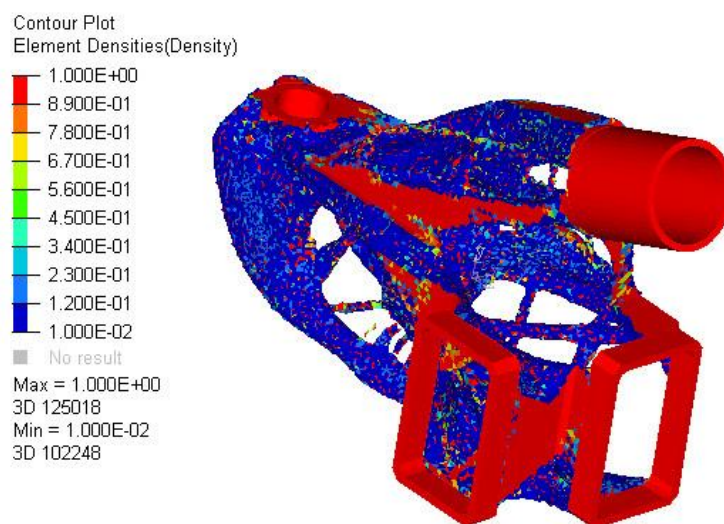


Рис. 3.3.7. Оптимизированная модель

Также приведем Stress-анализ полученных моделей и изображение элементов, в которых есть превышение предела прочности. Как можем наблюдать Рис. 3.3.8-3.3.9., в первом случае есть локальные превышения. Это возможно вызвано погрешностью программы. Во втором случае также есть локальные превышения. Расчет был прекращен программой, не удовлетворив все ограничения.

Первый случай

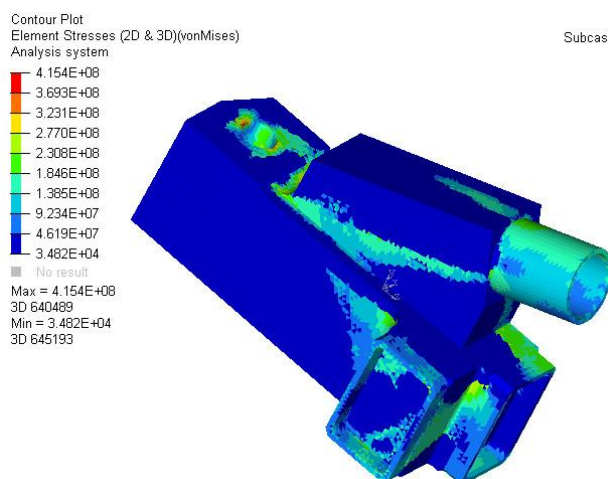


Рис. 3.3.8. Stress vonMises 1 случай
нагружения

Второй случай

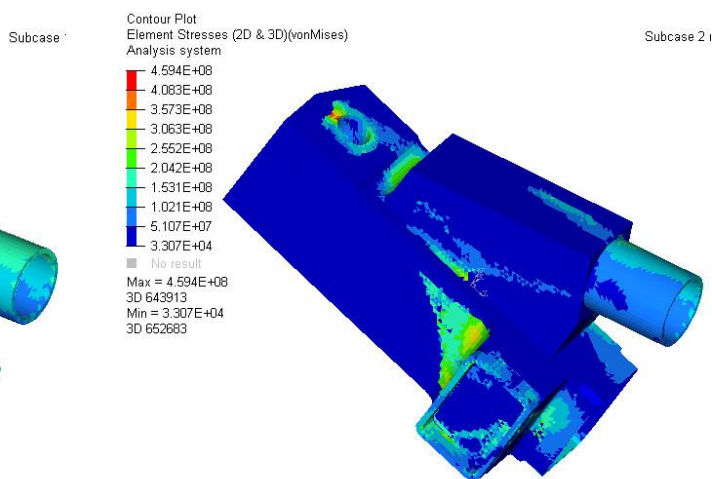


Рис. 3.3.10. Stress vonMises 2 случай
нагружения

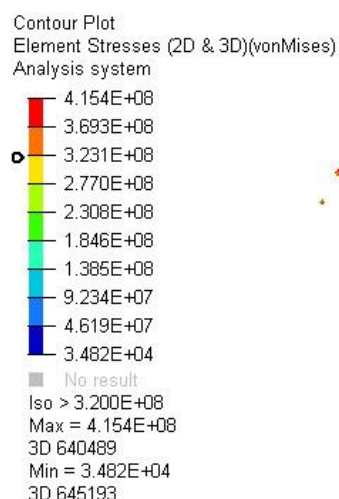


Рис. 3.3.9. Превышение предела прочности 1
случай нагружения

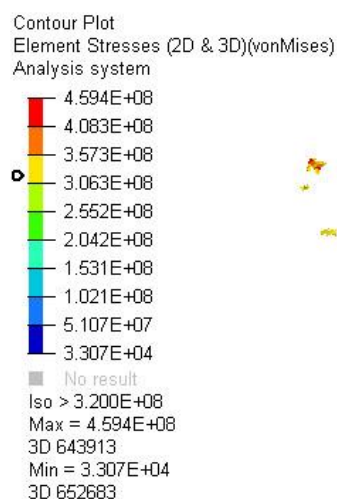


Рис. 3.3.10. Превышение предела прочности 2
случай нагружения

Данную модель можно только изготовить аддитивными технология, 3-D печать. Наша цель была в том, чтобы оптимизировать фитинг под фрезеровку. Поэтому мы будем применять технологические ограничения. Двойная литейная форма(Split Draw) и вытяжку (Extrusion). Пример этих технологических процедур приведен на Рис. 3.3.11.

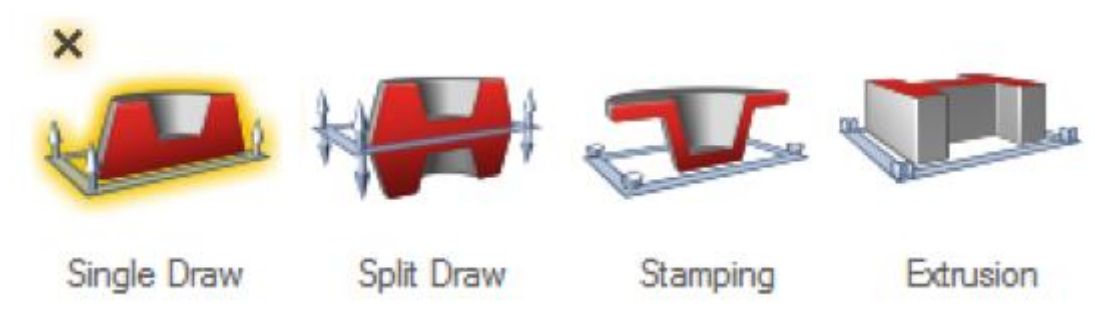


Рис. 3.3.11. Технологии производства

3.3.2. Оптимизация с технологическим ограничением Split Draw

В данной постановке ставим технологическое ограничение SplitDraw. Это изготовление с помощью процедуры литья и двух съемных форм. Было проведено два расчета с разными направлениями форм. Вдоль трубы и поперек, направления показаны черной стрелкой на Рис. 3.3.12 - 3.3.13.

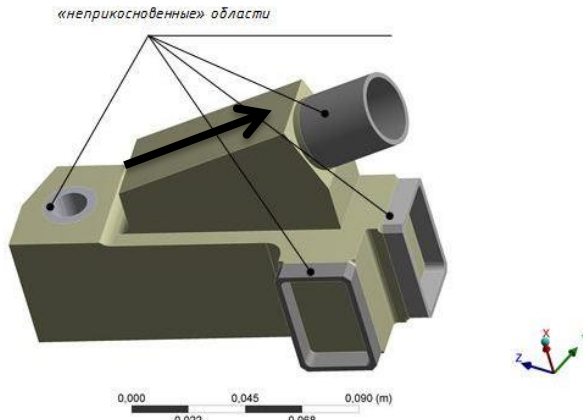


Рис. 3.3.12 Направление литья 1 вариант

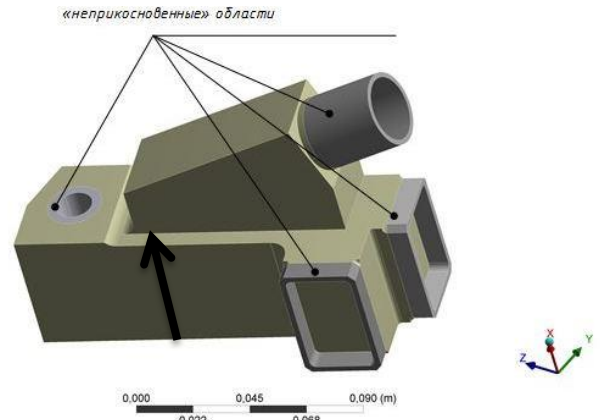


Рис 3.3.13. Направление литья 2 вариант

Итоги оптимизации и ключевые этапы топологической оптимизации (распределение плотностей по конструкции) приведены ниже:

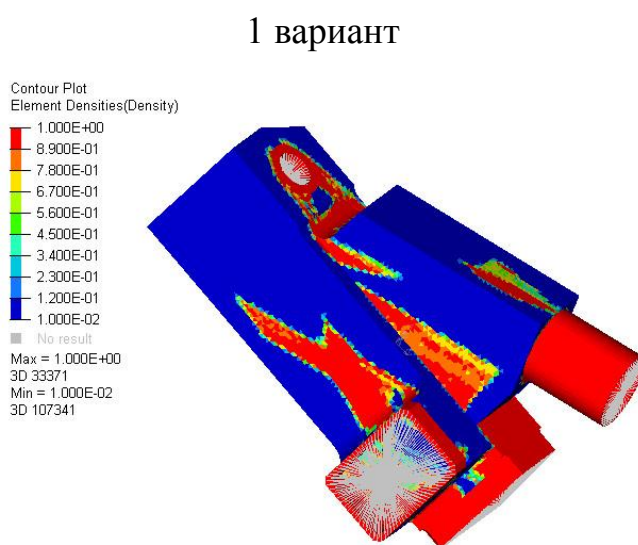


Рис. 3.3.14 Итерация финальная

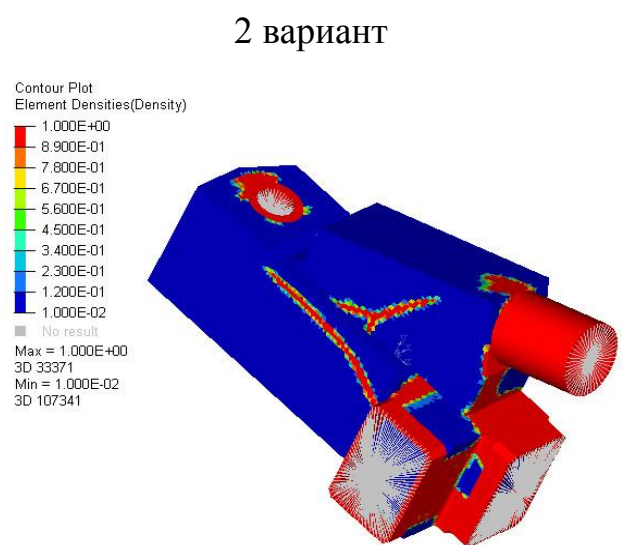


Рис. 3.3.17 Итерация финальная

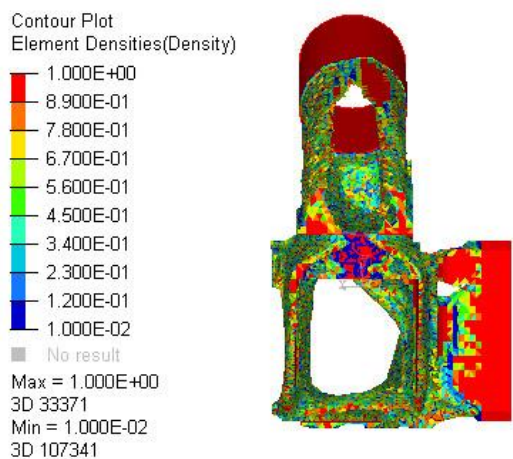


Рис. 3.3.15 Плотность 0.5

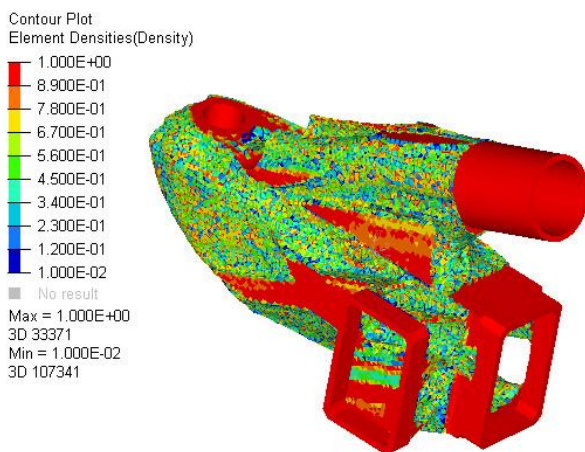


Рис. 3.3.16 Плотность 0.5

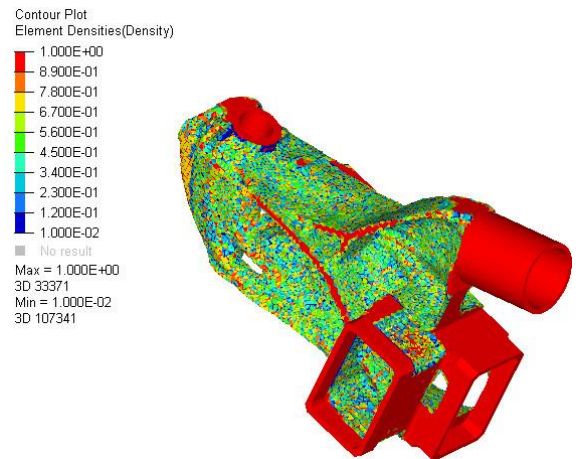


Рис. 3.3.18 Плотность 0.5

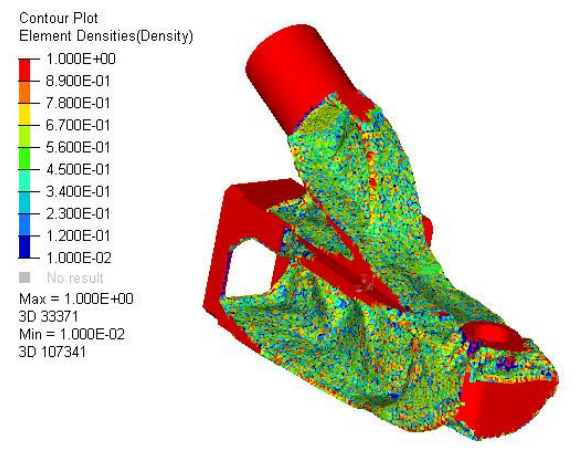


Рис. 3.3.19 Плотность 0.5

Также приведем Streess-анализ полученных моделей и изображение элементов, в которых есть превышение предела прочности.

1 вариант

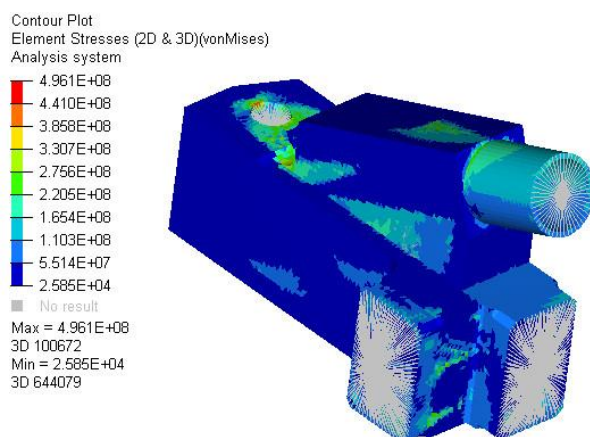


Рис. 3.3.20. Stress vonMises 1 случай нагружения

2 вариант

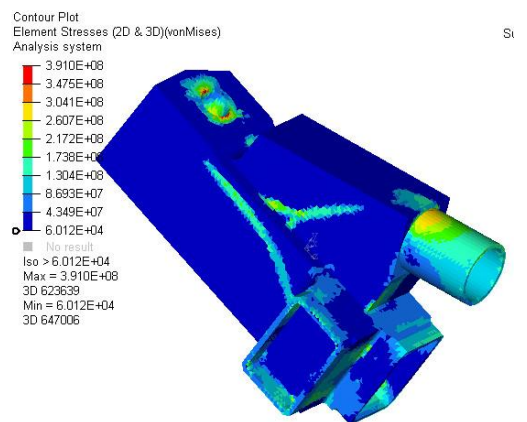


Рис. 3.3.21. Stress vonMises 1 случай нагружения

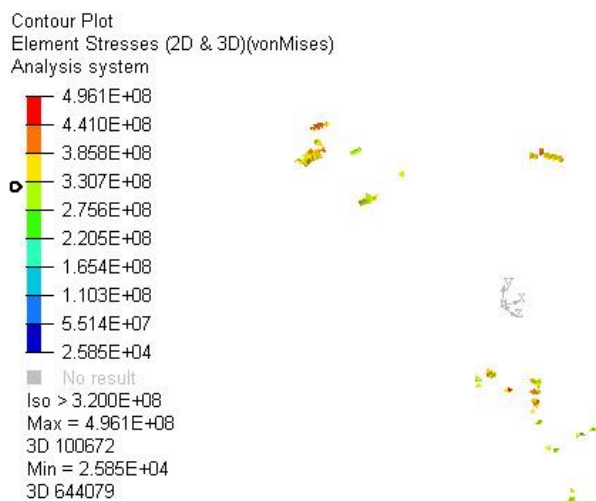


Рис. 3.3.22 Превышение предела прочности 1 случай нагружения

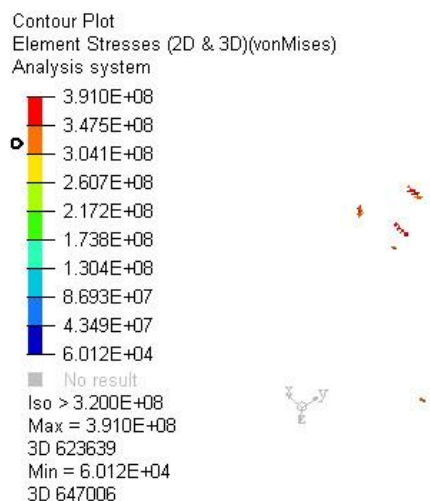


Рис. 3.3.23 Превышение предела прочности 1 случай нагружения

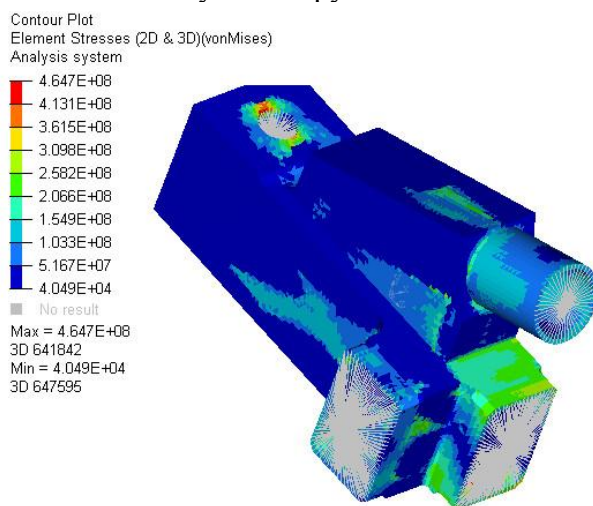


Рис. 3.3.24 Stress vonMises 2 случай нагружения

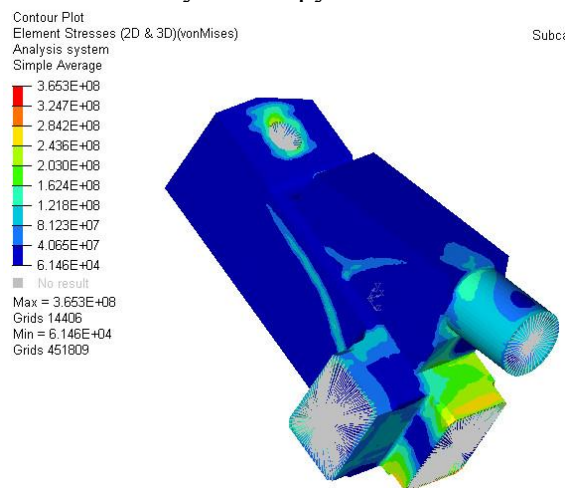


Рис. 3.3.25 Stress vonMises 2 случай нагружения

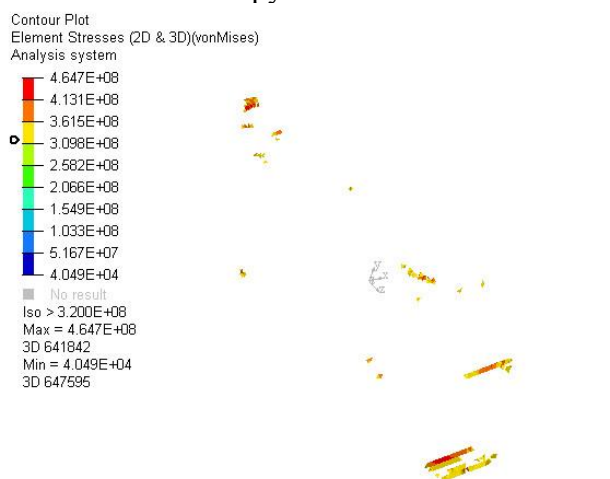


Рис. 3.3.26 Превышение предела прочности 2 случай нагружения

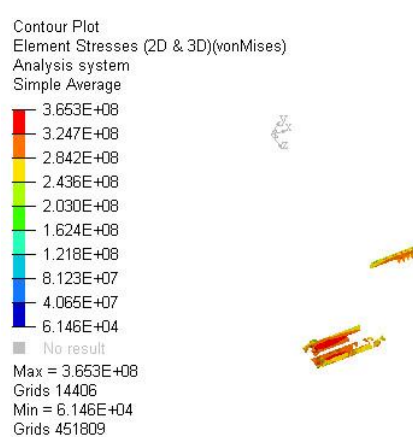


Рис. 3.3.27 Превышение предела прочности 2 случай нагружения

Как можем наблюдать Рис. 3.3.20-3.3.27., в обоих случаях есть локальные превышения. Это возможно вызвано погрешностью программы. Также можем видеть, что при втором варианте литейного изготовления, элементов, превышающих предел прочности, становится меньше. Расчет был прекращен программой, не удовлетворив все ограничения. Полученные оптимизированные модели более пригодны к фрезерованию, но также вызывают затруднения в данном виде производства. Далее приведем ещё один способ изготовления.

3.3.3. Оптимизация с технологическим ограничением Extrusion

В данной постановке ставим технологическое ограничение Extrusion. Это изготовление с помощью процедуры вытяжки материала. Было проведено два расчета с разными направлениями форм. Вдоль трубы и поперек, направления показаны черной стрелкой на Рис. 3.3.28 - 3.3.29.

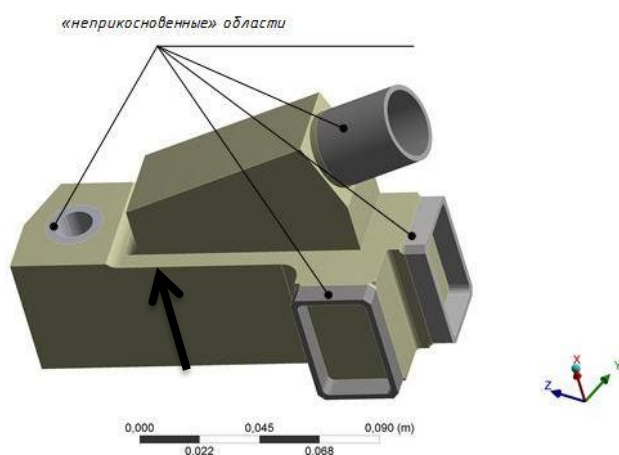


Рис. 3.3.28. Направление вытяжки 1 вариант

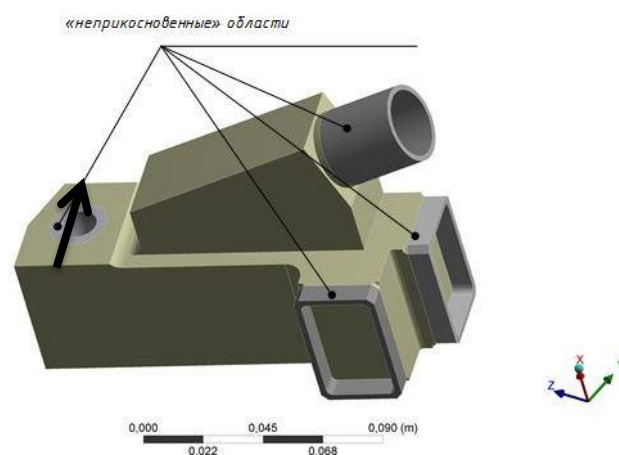


Рис. 3.3.29 Направление вытяжки 2 вариант

Итоги оптимизации и ключевые этапы топологической оптимизации (распределение плотностей по конструкции) приведены ниже:

1 вариант

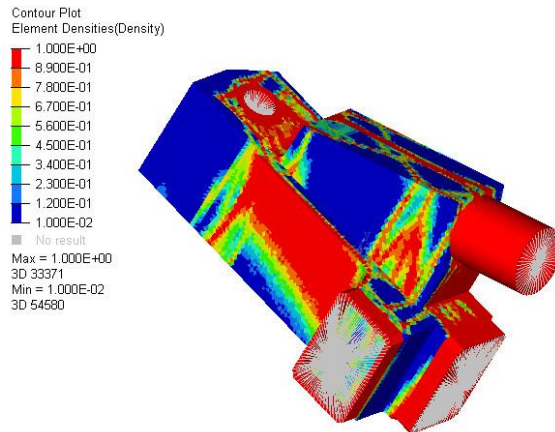


Рис. 3.3.30 Итерация финальная

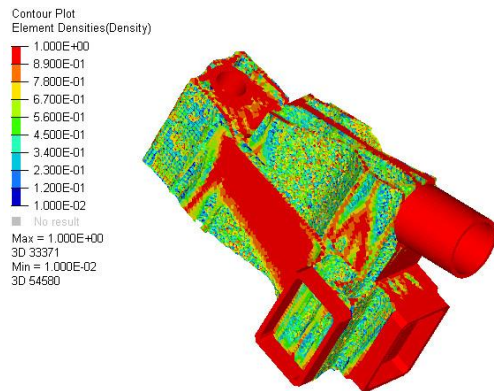


Рис. 3.3.31. Плотность 0.5

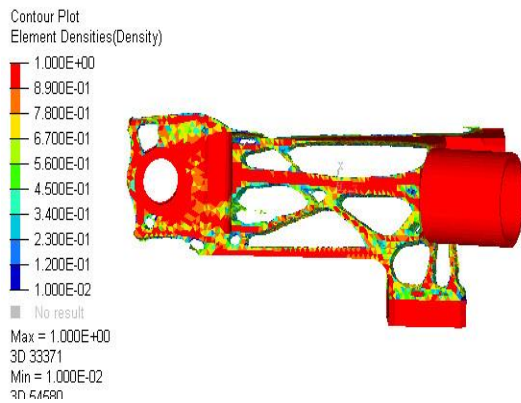


Рис. 3.3.32. Плотность 0.5

2 вариант

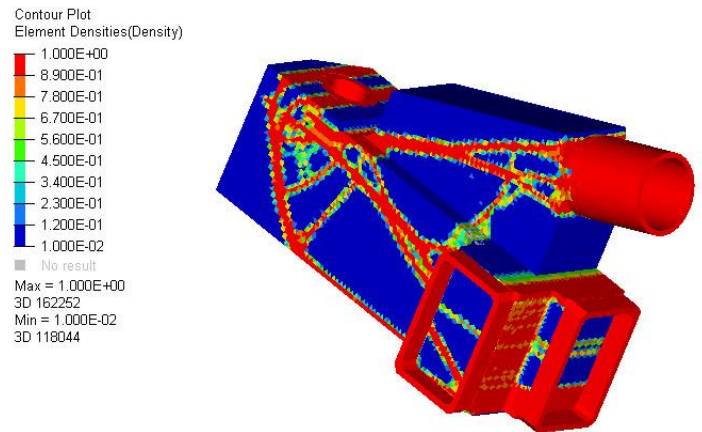


Рис. 3.3.33. Итерация финальная

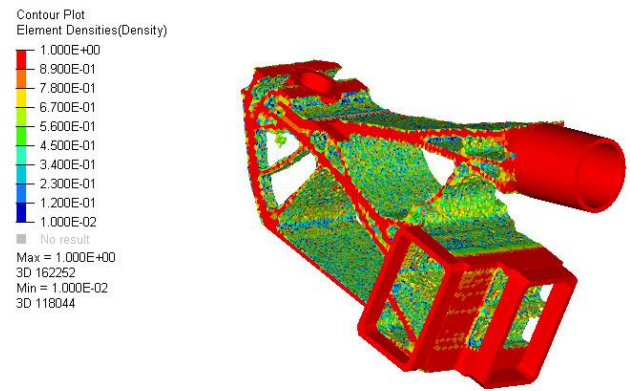


Рис. 3.3.34. Плотность 0.5

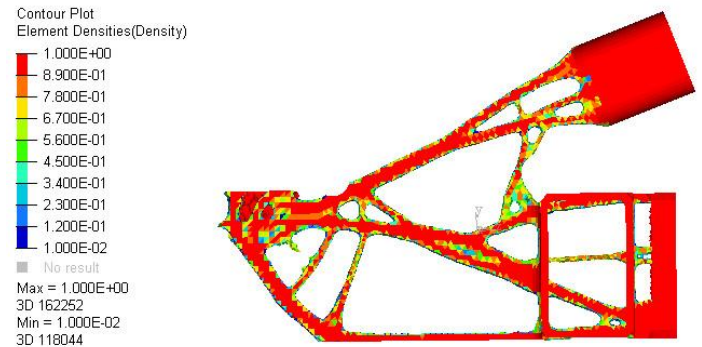


Рис. 3.3.35. Плотность 0.5

Также приведем Streess-анализ полученных моделей и изображение элементов, в которых есть превышение предела прочности.

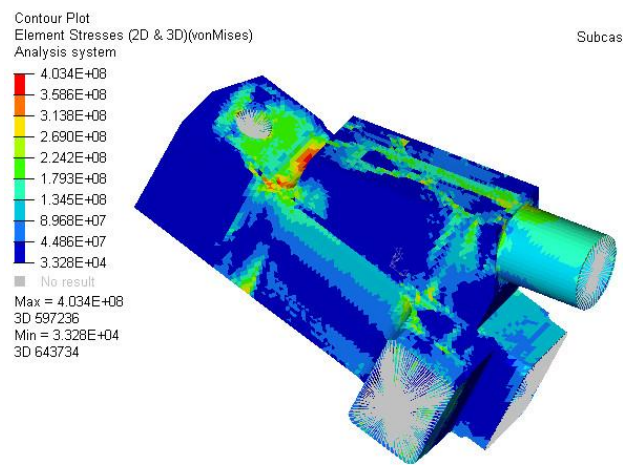


Рис. 3.3.36. Stress vonMises 1 случай нагружения

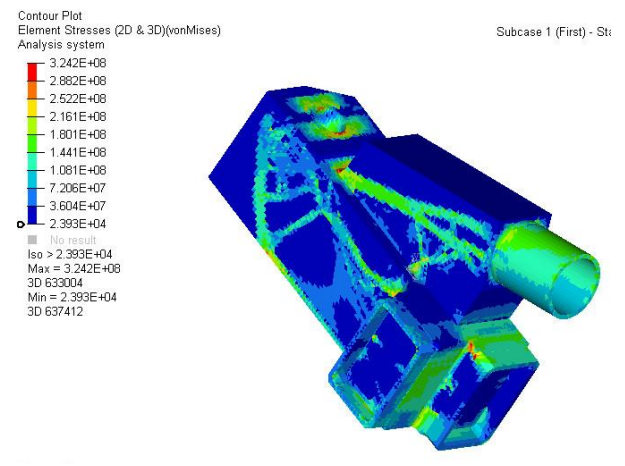


Рис. 3.3.40. Stress vonMises 1 случай нагружения

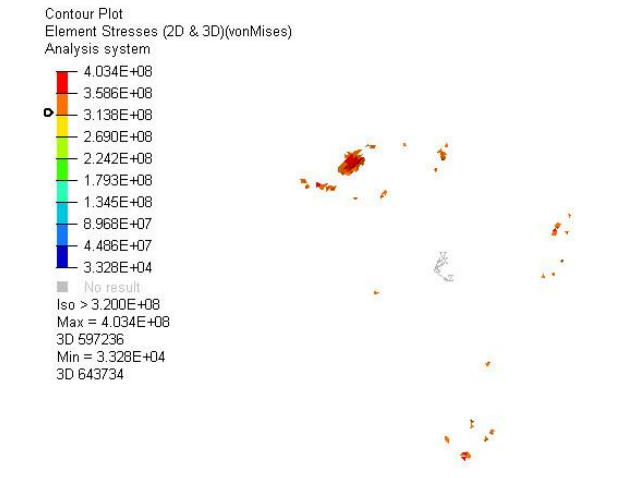


Рис. 3.3.37. Превышение предела прочности 1 случай нагружения

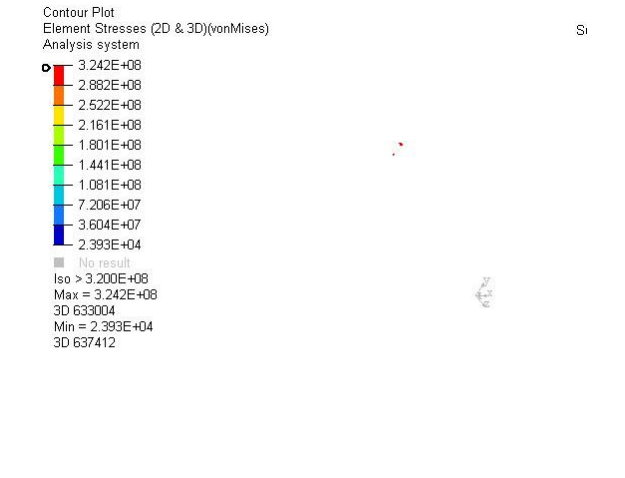


Рис. 3.3.41. Превышение предела прочности 1 случай нагружения

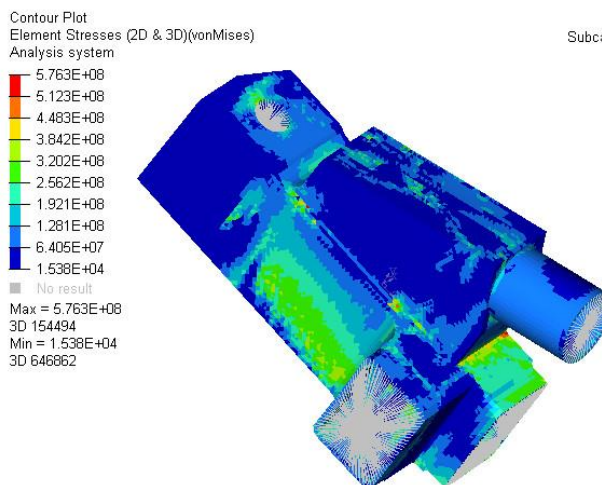


Рис. 3.3.38. Stress vonMises 2 случай нагружения

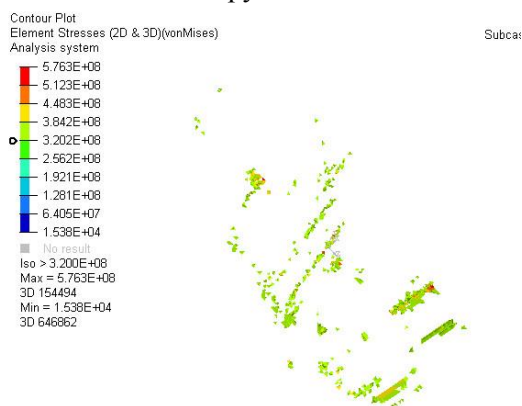


Рис. 3.3.39. Превышение предела прочности 2 случай нагружения

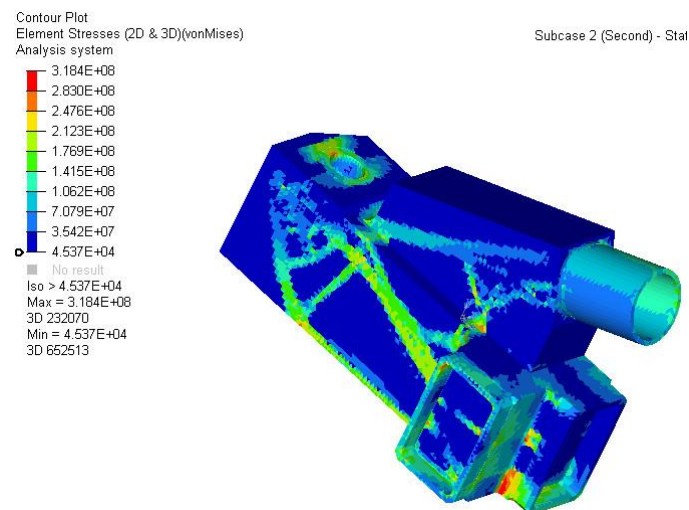


Рис. 3.3.42. Stress vonMises 2 случай нагружения



Рис. 3.3.43. Превышение предела прочности 2 случай нагружения

Как можем наблюдать Рис. 3.3.36-3.3.43., в обоих случаях есть локальные превышения. Это возможно вызвано погрешностью программы. Также можем видеть, что при втором варианте изготовления, элементов, превышающих предел прочности, становится гораздо меньше. Во втором варианте расчет удовлетворяет все ограничения. Данная погрешность в несколько элементов допустима. Полученные оптимизированные модели самые легкие в изготовление из всех рассмотренных. Второй случай вытяжке самый оптимальный из всех, поэтому его и примем за окончательный вариант.

Изначальный вес детали был 1.245кг. После оптимизации вес вышел 0.465кг. Как можем видеть, вес снизился почти в 3 раза, что является отличным результатом.

Вид окончательной модели показан на Рис. 3.3.44.

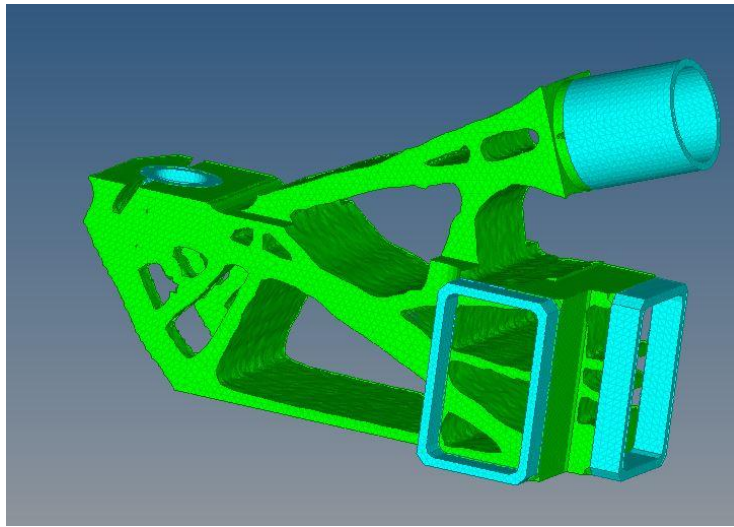


Рис. 3.3.44. Окончательная модель оптимизированного фитинга

Также сделаем reanalysis конструкции на напряжения, результаты ниже:

1 вариант нагружения

2 вариант нагружения

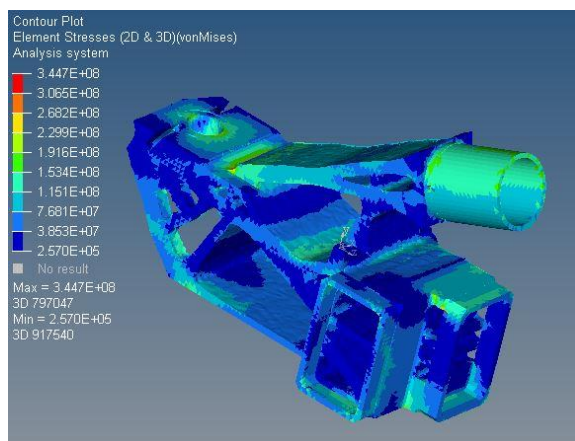


Рис. 3.3.45 Stress vonMises

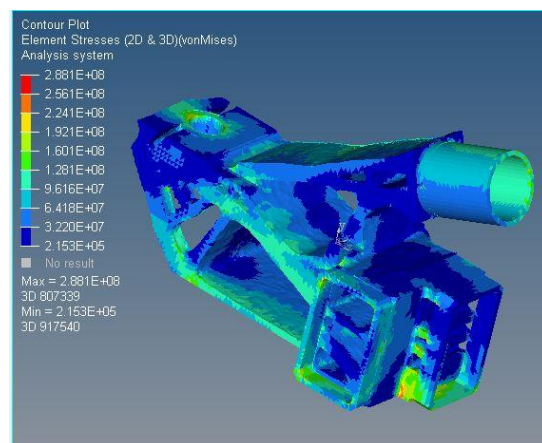


Рис. 3.3.47. Stress vonMises



Рис. 3.3.46 Превышение предела прочности

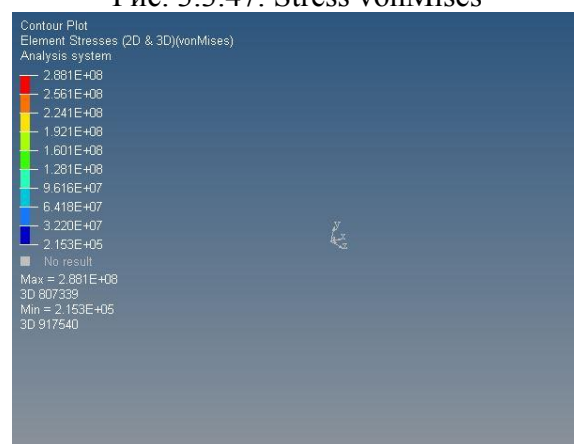


Рис. 3.3.48 Превышение предела прочности

Можем видеть, что всего лишь один элемент выходит за пределы прочности, что допустимо при расчетах.

3.4 Анализ напряженно-деформируемого состояния

Для достоверности результатов Stress анализа проведем дополнительный расчет в программе Ansys на измерение напряжений. Результаты можно видеть ниже.

Вариант нагружения № 1:

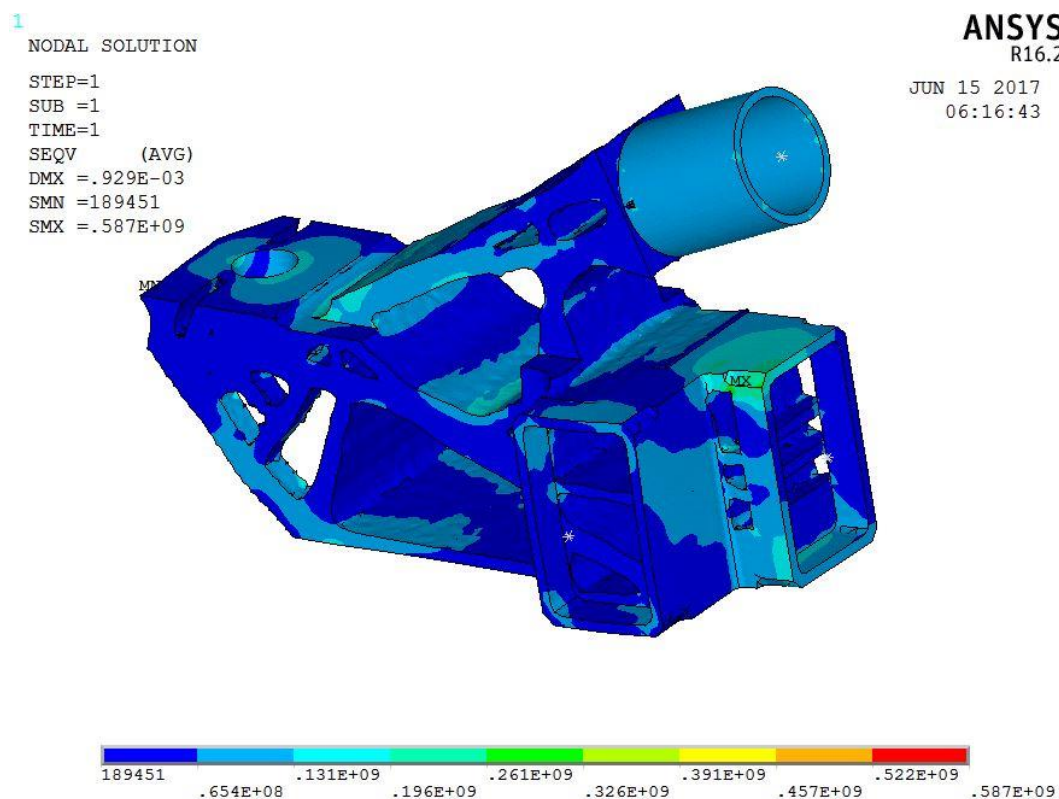


Рис. 3.4.1. Stress vonMises для первого варианта нагружения

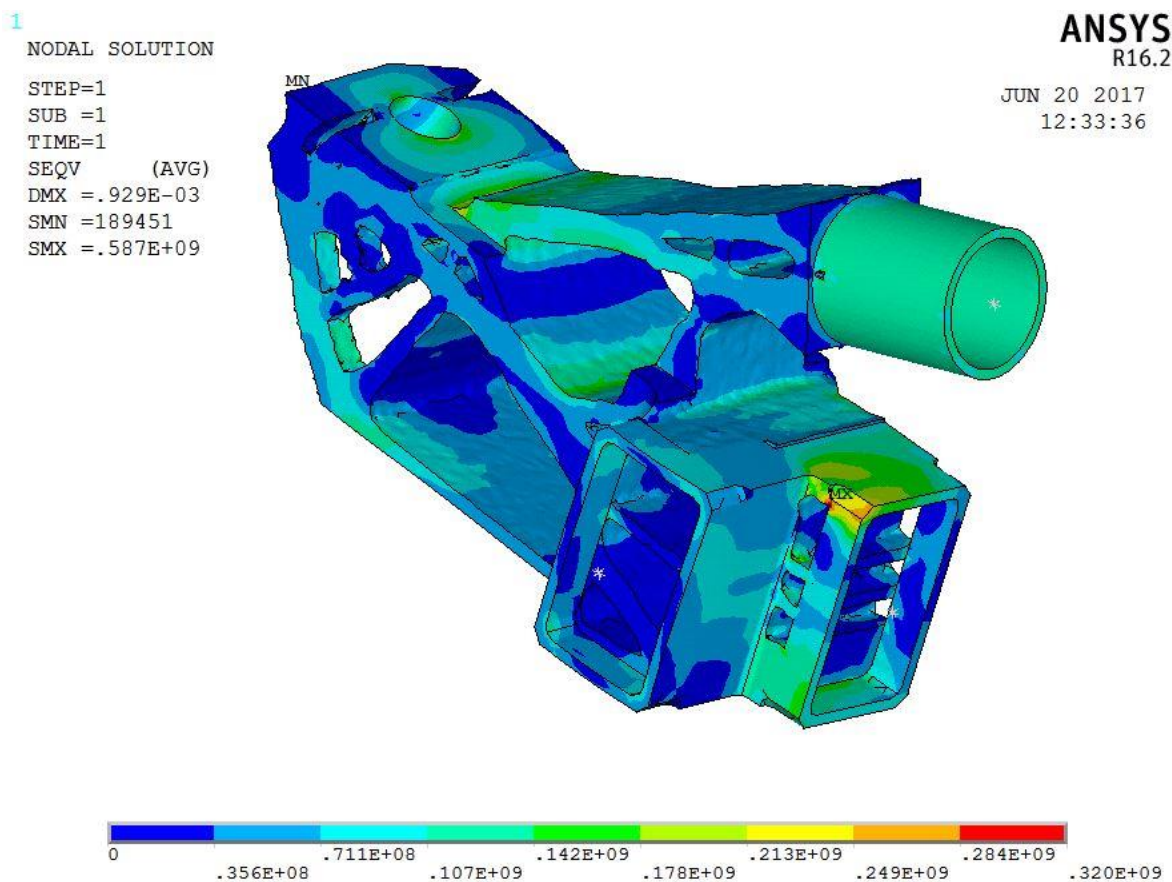


Рис. 3.4.2. Места превышений предела прочности для первого варианта нагружения

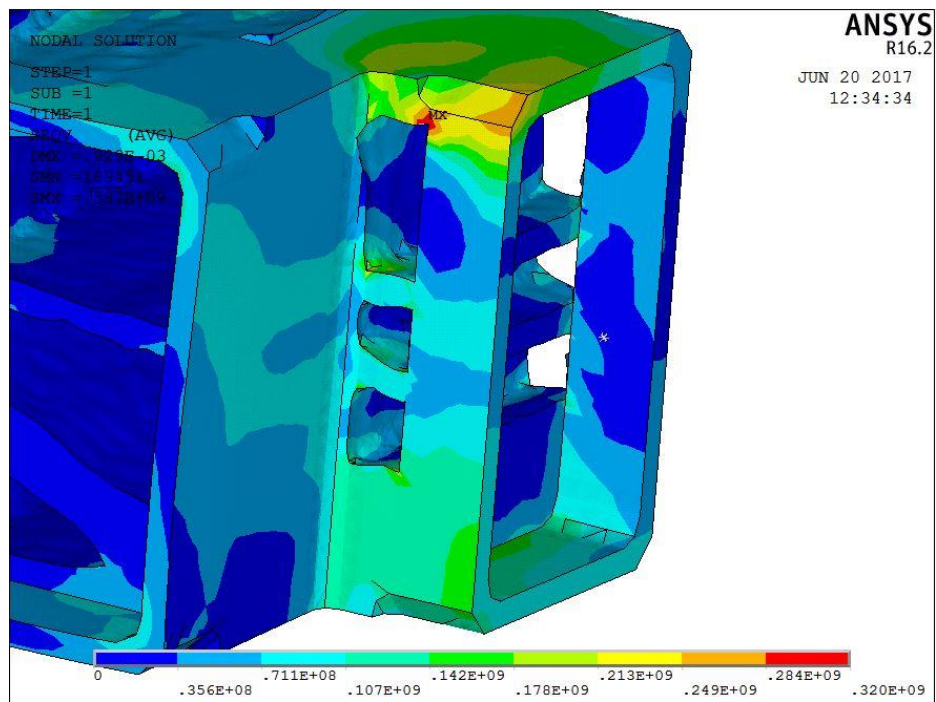


Рис. 3.4.3. Концентратор напряжения для первого варианта нагружения

Вариант нагружения № 2:

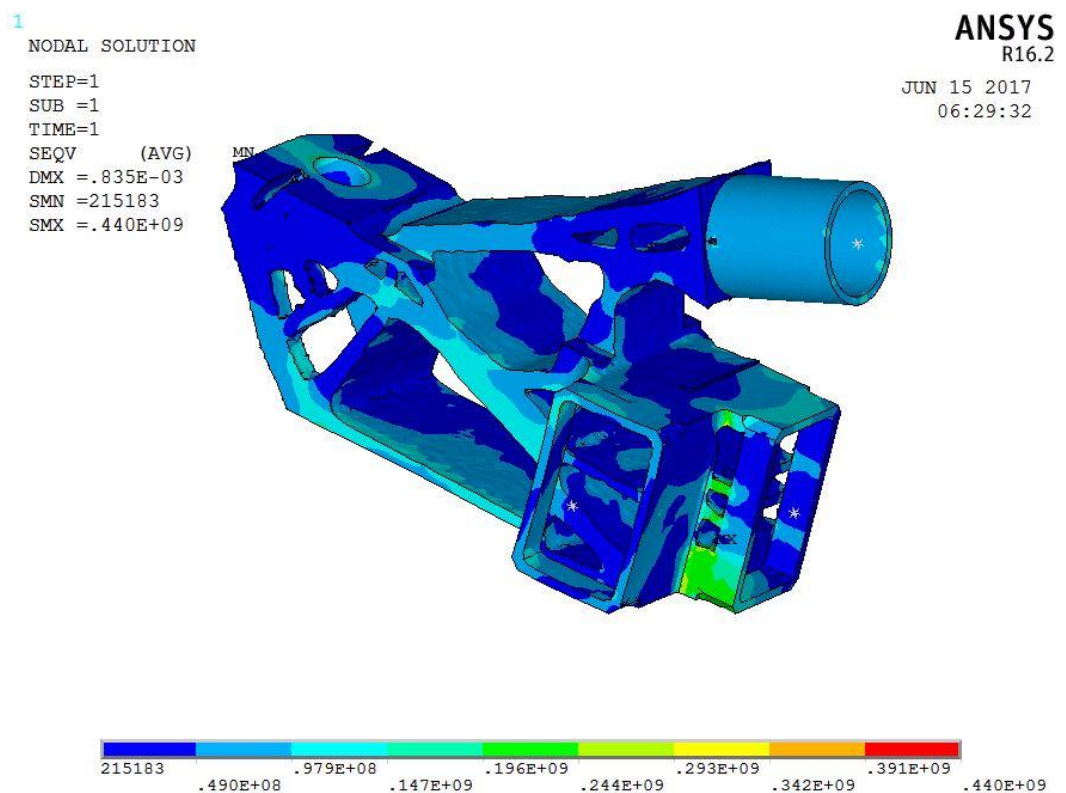


Рис. 3.4.4. Stress vonMises для второго варианта нагружения

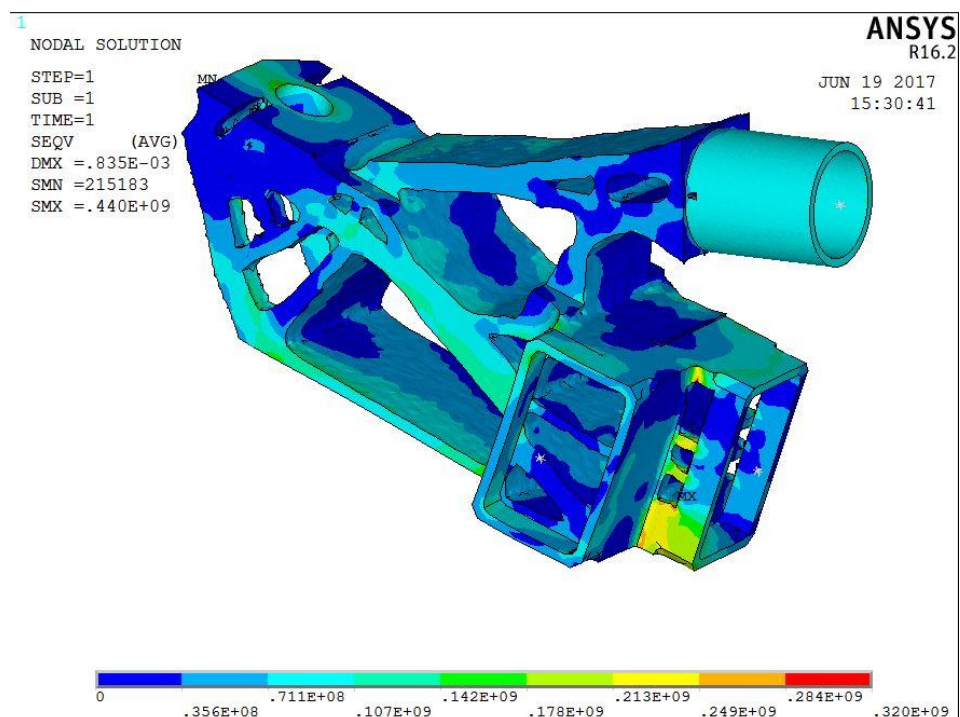


Рис. 3.4.5. Места превышений предела прочности для второго варианта нагружения

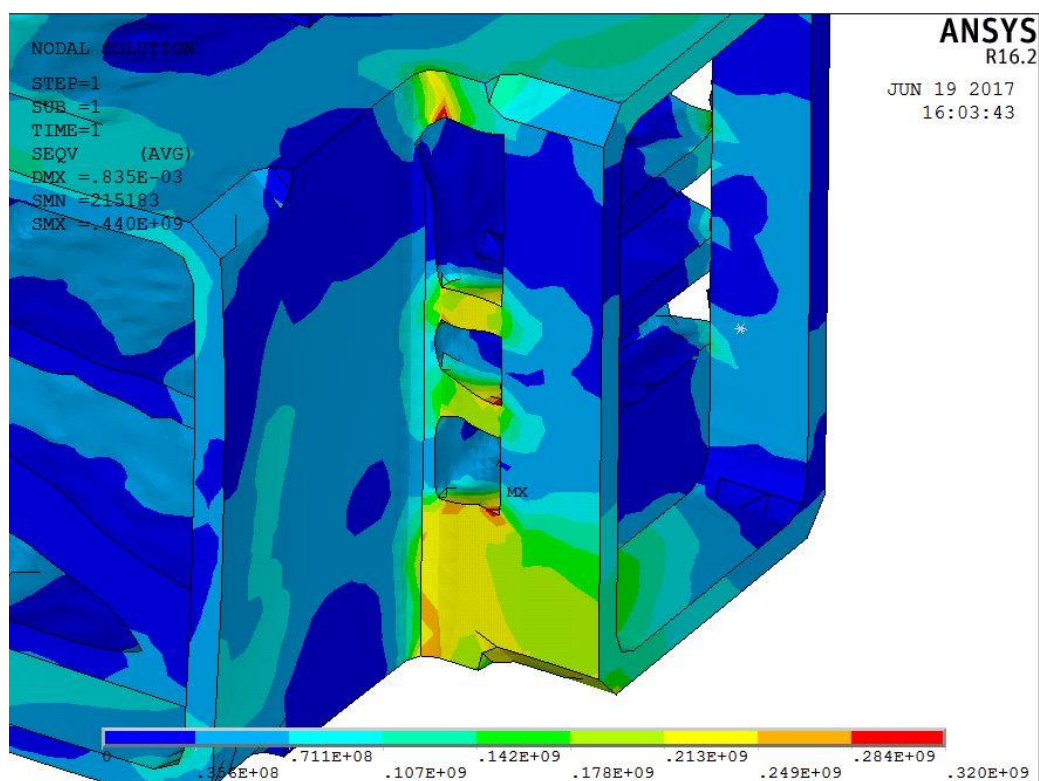


Рис. 3.4.6. Концентратор напряжения для первого варианта нагружения

По рисункам можно сказать, что имеются превышения предела прочности, но они локальны и допустим. Избавиться от них можно в процессе

постобработки детали, а именно добавление скруглений. Из всего можем сделать вывод, что наша модель удовлетворяет всем условиям и пригодна для изготовления и использования.

4 Заключение

В данной работе мы проводили топологическую оптимизацию силового кронштейна космического аппарата.

Было проведено несколько прессов оптимизации с разными технологическими ограничениями. В итоге был выбран оптимальный вариант фитинга, который удовлетворяет всем условиям. По итогам оптимизации масса фитинга снизилась в 3 раза, что является достаточно хорошим результатом.

Также был проведен анализ напряженно-деформированного состояния в случае разных вариантов нагружения. По результатам которого, можем наблюдать, что напряжения не превосходят предела прочности. Таким образом, можно говорить о надежности полученной оптимизированной конструкции. Также полученная модель легка в изготовление процессом фрезерования, что и требовалось в техническом задании.

5 Литература

- [1]Спутник-1 –Википедия [Электронный ресурс]. —
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Спутник-1>
- [2] L. Euler. Sur la force des colonnes. Mem. Acad., Berlin, 13, 1759.
- [3] Topping, B. Shape Optimization of Skeletal Structures: A Review, Journal of Structural Engineering, Volume 109, Issue 8, 1983.
- [4] T. Sukol. On the adaptive ground structure approach for multi-load truss topology optimization. 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, 19-24, 2013.
- [5] Martin Philip Bendsoe and Noboru Kikuchi. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 197–224, November 1988.
- [6] Katsuyuki Suzuki and Noboru Kikuchi. A homogenization method for shape and topology optimization. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 291–318, 1991.
- [7] O. Sigmund. A 99 line topology optimization code written in Matlab. Structural and Multidisciplinary Optimization, 120–127, 2001.
- [8] M.P. Bendsoe, Optimal shape design as a material distribution problem, Structural optimization, vol. 1, no. 4, pp. 193-202, 1989.
- [9] R. Cazacu, L. Grama. Overview of structural topology optimization methods for plane and solid structures. Annals of the university of Oradea, Fascicle of Management and Technological Engineering, Issue №3, 2014.

[10] Bruns, T. Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms / T. Bruns, D. Tortorelli // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2001. – № 190 (26–27). – P. 3443–3459.

[11] Y.M. Xie, G.P. Steven, "A simple evolutionary procedure for structural optimization", Computers & Structures, vol. 49, no. 5, pp. 885-896, 1993.

[12] Optistruct - AltairHyperWorks [Электронный ресурс]
<http://www.altairhyperworks.com/product/OptiStruct>.

[13] Martin Philip Bendsoe, Ole Sigmund, "Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications", p.264-267.