

Абузаров Артём Вадимович
Сибирский федеральный университет
Абузаров Артур Вадимович
Сибирский федеральный университет
Сафуса Кирилл Олегович
Сибирский федеральный университет

Экономия ресурсов в машиностроении: применение топологической оптимизации для снижения затрат

Аннотация. В статье исследуется влияние топологической оптимизации на снижение производственных затрат при изготовлении деталей в машиностроении. Данная тема рассмотрена на примере топологической оптимизации рычага в составе установки для проверки зубчатых колёс на прочность. Результатом исследования является численное значение уменьшения массы детали, которое напрямую и пропорционально влияет на экономическую составляющую производства деталей в машиностроении. Экономия затрат и ресурсов на производство каких-либо деталей, влияет на экономику производственных процессов. Так же издержки сокращаются за счёт устранения ошибок на этапе первичного проектирования с использованием прототипирования. Результаты косвенно показывают, как применение данных технологий отражается на отрасли и снижает издержки. Топологическая оптимизация может сократить расход материалов до 40%, что снижает общую стоимость изделия

Ключевые слова: экономия затрат, экономия ресурсов, топологическая оптимизация, снижение массовых характеристик, технологии в производстве, аддитивные технологии.

Abuzarov Artem Vadimovich
Siberian Federal University
Abuzarov Artur Vadimovich
Siberian Federal University
Safusa Kirill Olegovich
Siberian Federal University

Saving resources in mechanical engineering: applying topological optimization to reduce costs

Annotation. The article examines the impact of topological optimization on reducing production costs in the manufacture of parts in mechanical engineering. This topic is considered using the example of topological optimization of a lever as part of an installation for testing gears for strength. The result of the study is a numerical value of reducing the mass of a part, which directly and proportionally affects the economic component of the production of parts in mechanical engineering. Saving costs and resources for the production of any parts affects the economics of production processes. Costs are also reduced by eliminating errors at the initial design stage using prototyping. The results indirectly show how the use of these technologies affects the industry and reduces costs. Topological optimization can reduce material consumption by up to 40%, which reduces the overall cost of the product.

Keywords: cost savings, resource savings, topological optimization, reduction of mass characteristics, manufacturing technologies, additive technologies.

Введение. Экономические затраты на изготовление каких-либо деталей крайне важны, и задумываться об этом стоит уже на начальном этапе проектирования. В этой статье представлено уменьшение массовых характеристик детали за счёт топологической оптимизации на примере рычага.

В кривошипно-шатунных механизмах в качестве выходного звена, или в качестве промежуточного звена применяются рычаги, коромысла или кулисы, которые в отличие от ползуна, движущегося поступательно, совершают качательное движение относительно оси, соединяющей их со станиной. Однако при выполнении одинакового вида движения рычаги, коромысла и кулисы могут иметь совершенно различную конструкцию, которая зависит, прежде всего, от назначения и области применения, а точнее области техники, в которой используется рычажный или кривошипно-шатунный механизм, в состав которого входят эти звенья.

Требования к исследованию. Для выполнения специфических требований, предъявляемых к рычажным механизмам, в состав которых входят рычаги и зависящих главным образом от области техники, в которой они используются, причем, независимо от того, являются они выходным или промежуточным звеном, в них могут встраиваться различные дополнительные устройства, позволяющие:

- предохранять механизм от перегрузок,
- регулировать длину плеч рычага,
- регулировать угловое положение рычага.

Существует несколько ключевых факторов, которые влияют на характеристики и эффективность рычага:

1. Тип

2. Жесткость конструкции рычага: жесткость конструкции влияет на его устойчивость. Более жесткая конструкция позволяет уменьшить деформации при перемещении.

Учитывая эти ключевые факторы и проводя соответствующие исследования и оптимизации, можно значительно улучшить характеристики и эффективность рычага.

Современные тенденции и перспективы развития рычажных механизмов включают в себя несколько ключевых направлений:

1. Использование более жестких и легких материалов.
2. Применение топологической оптимизации.

Топологическая оптимизация — это метод, который используется для оптимизации геометрии детали. Обычно он сводится к минимизации массы детали при сохранении ее структурной целостности.

Данный процесс включает в себя анализ нагрузок, которые испытывает деталь во время работы, позволяющий определить места, в которых возможно удаление массы. Оптимизация часто используется в качестве ориентировочного или концептуального инструмента для создания детали на основе объемной конструкции или же для улучшения работоспособности существующей конструкции.

Параметры топологической оптимизации

До применения к конструкции топологической оптимизации необходимо определить следующую информацию:

Имеющаяся конструкция: методом топологической оптимизации возможно удаление массы только в тех областях, в которых она была смоделирована пользователем. Именно поэтому существует необходимость в предопределенной «рабочей области» или первоначальной объемной конструкции.

Нагрузки и требования: до выполнения оптимизации деталь необходимо подвергнуть механическим нагрузкам. Должны быть известны такие параметры нагрузок, действующих на деталь, как направление, величина и расположение точек воздействия. Материал детали также определяется на этом этапе

Требования к оптимизации: пределы оптимизации устанавливаются набором требований. Например, сохранение определенной жесткости или прочности детали, при уменьшении ее массы.

Технологичность: важно учитывать и то, как будет производиться эта деталь и связанные с этим производственные ограничения (например, поднутрения для обработки с ЧПУ или опора для 3D-печати). Некоторые пакеты программ могут накладывать требования для обеспечения возможности изготовления оптимизированной конструкции конкретным методом производства.

Цель оптимизации: простое определение цели, например «минимизировать массу» или «максимизировать жесткость».

Особенно эффективной топологическая оптимизация может быть при использовании в сочетании с 3D-печатью. Органические геометрии, получаемые после топологической оптимизации, идеально подходят для 3D-печати и часто затруднительны для производства традиционными методами, такими как обработка с ЧПУ.

Топологическая оптимизация наилучшим образом подходит для использования в отраслях, где детали подвергаются большим нагрузкам и должны иметь небольшую массу, например, в автомобильной или аэрокосмической промышленности. Использование топологической оптимизации на ранних этапах процесса конструирования может способствовать разработке наилучшего решения.

Топологическая оптимизация также может быть использована для итерационного уточнения конструкции. Оно начинается с громоздкой конструкции, которая будет выдерживать все нагрузки, к которой затем применяется оптимизация, позволяющая получить грубую, приближенную исходную форму. Затем эта форма может быть оптимизирована, что позволяет получить уже более детализированную конструкцию. Эти действия могут повторяться снова и снова, ускоряя процесс конструирования.

Одним из ограничений топологической оптимизации является то, что программное обеспечение, используемое для выполнения симуляций, не позволяет получать решения «в один клик». На первых этапах настройки необходимо иметь начальный уровень знаний анализа методом конечных элементов. Необходимо правильно применять все нагрузки и требования, создать сетку и настроить средство проверки. Чувствительность этих параметров очень высока. Изменение воздействия нагрузки или требования к детали может иметь большое влияние на результирующее решение.

Нормативная База. ГОСТ Р 57911—2017 2.1.17 топологическая оптимизация: Процесс при проектировании изделий, заключающийся во внесении изменений в конструкцию или деталь с созданием новых границ объема тела и удалением существующих, с целью ее оптимизации по критериям минимизации массы, максимальной жесткости и спектру собственных частот, при сохранении предоставляемых к нему прочностных требований.

ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 - Настоящий стандарт устанавливает термины и определения, используемые в технологиях аддитивного производства (АП), которые основаны на аддитивном принципе изготовления деталей, т.е. на создании физических пространственных изделий путем последовательного добавления материала.

Аналитический расчёт

Дано:

Тип балки:

Заделка слева

Размеры:

$L = 0.25 \text{ м};$

Нагрузки:

$F1 = 0.81 \text{ кН}, z = 0.25 \text{ м};$

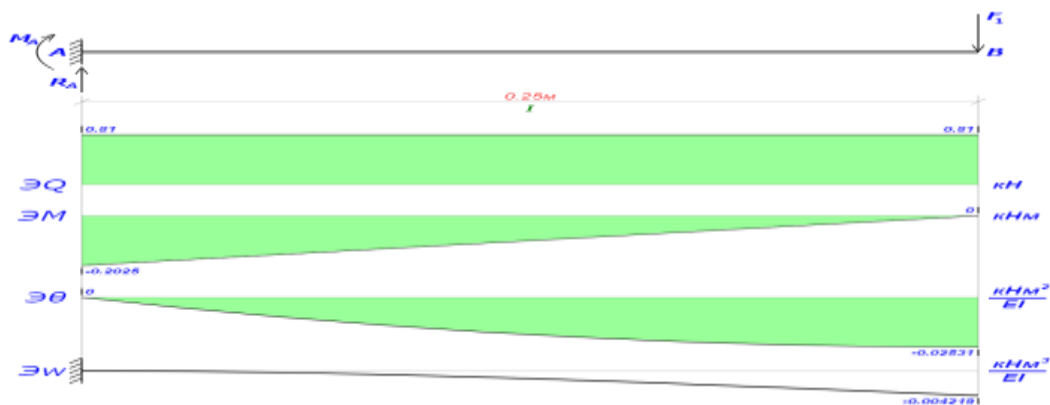


Рисунок 1 - Эпюры

Реакции опор

Сумма моментов всех сил относительно точки А должна равняться нулю:

$$\begin{aligned}\sum M^A &= -M_A - \sum q_i(b_i - a_i)(a_i + b_i)/2 - \sum F_i c_i - \sum M_i = \\ &= -M_A - F_1 c_1 = -M_A - 0.81 \cdot 0.25 = \\ &= -M_A - 0.2025 = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow M_A = -0.2025 \text{ кНм};\end{aligned}$$

Сумма проекций всех сил на вертикальную ось должна равняться нулю:

$$\begin{aligned}\sum Y &= R_A - \sum q_i(b_i - a_i) - \sum F_i = \\ &= R_A - F_1 = R_A - 0.81 = \\ &= R_A - 0.81 = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_A = 0.81 \text{ кН};\end{aligned}$$

Для проверки вычислим сумму моментов всех сил относительно точки В:

$$\begin{aligned}\sum M^B &= -M_A - R_A L + \sum q_i(b_i - a_i)(2L - a_i - b_i)/2 + \sum F_i(L - c_i) - \sum M_i = \\ &= -M_A - R_A L + F_1(L - c_1) = 0.2025 - 0.81 \cdot 0.25 + 0.81 \cdot (0.25 - 0.25) = \\ &= 0.2025 - 0.2025 + 0 = 0;\end{aligned}$$

Методика построения эпюр, начальные параметры:

Прогиб и поворот в заделке равны нулю: $w_0 = 0$; $\theta_0 = 0$.

Построение эпюр:

Составим аналитические выражения $Q(z)$, $M(z)$, $EI\theta(z)$ и $EIw(z)$ для каждого участка и вычислим их значения в характерных точках.

Поперечная сила Q :

$$\begin{aligned}Q_1(z) &= R_A = \\ &= 0.81;\end{aligned}$$

Значения Q на краях отрезка:

$$\begin{aligned}Q_1(0) &= 0.81 \text{ кН}; \\ Q_1(0.25) &= 0.81 \text{ кН};\end{aligned}$$

Изгибающий момент M :

$$\begin{aligned}M_1(z) &= M_A + R_A z = -0.2025 + 0.81z = \\ &= 0.81z - 0.2025;\end{aligned}$$

Значения M на краях отрезка:

$$\begin{aligned}M_1(0) &= 0.81 \cdot 0 - 0.2025 = -0.2025 \text{ кНм}; \\ M_1(0.25) &= 0.81 \cdot 0.25 - 0.2025 = 0;\end{aligned}$$

Угол поворота сечения θ :

$$\begin{aligned}EI\theta_1(z) &= M_A z + R_A z^2/2 = -0.2025z + 0.81z^2/2 = \\ &= 0.405z^2 - 0.2025z;\end{aligned}$$

Значения $EI\theta$ на краях отрезка:

$$\begin{aligned}EI\theta_1(0) &= 0.405 \cdot 0^2 - 0.2025 \cdot 0 = 0; \\ EI\theta_1(0.25) &= 0.405 \cdot 0.25^2 - 0.2025 \cdot 0.25 = -0.025313 \text{ кНм}^2;\end{aligned}$$

Прогиб w :

$$EI_{wI}(z) = M_A z^2/2 + R_A z^3/6 = -0.2025z^2/2 + 0.81z^3/6 = 0.135z^3 - 0.10125z^2;$$

Значения EI_{wI} на краях отрезка:

$$EI_{wI}(0) = 0.135 \cdot 0^3 - 0.10125 \cdot 0^2 = 0;$$

$$EI_{wI}(0.25) = 0.135 \cdot 0.25^3 - 0.10125 \cdot 0.25^2 = -0.0042188 \text{ кНм}^3;$$

Ответ:

Реакции опор:

$$R_A = 0.81 \text{ кН};$$

$$M_A = -0.2025 \text{ кНм};$$

Внутренние усилия:

$$Q_{\max} = 0.81 \text{ кН};$$

$$M_{\max} = 0.2025 \text{ кНм};$$

Перемещения:

$$\theta_{\max} = 0.02531 \text{ кНм}^2/EI;$$

$$w_{\max} = 0.004219 \text{ кНм}^3/EI;$$

Подготовка геометрии

В качестве основы был определен рычаг установки проверки зубчатых колёс на прочность. (Рисунок 2)

Сам рычаг представлен на рисунке 3

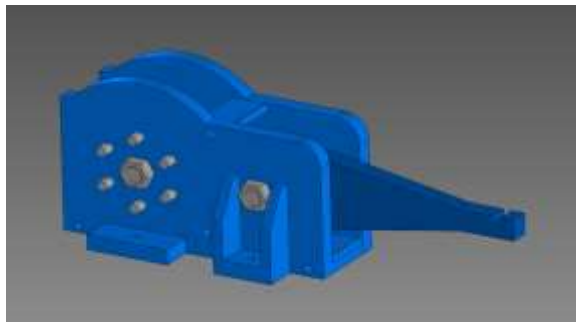


Рисунок 2 – Сборка установки

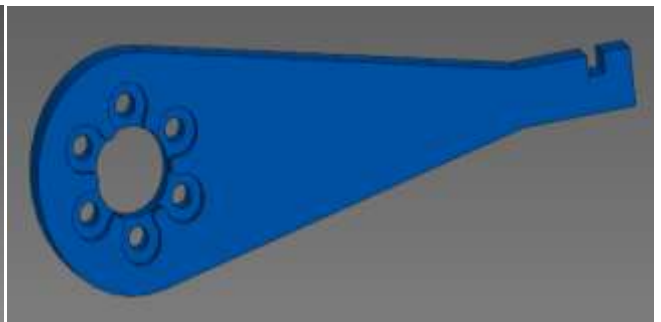


Рисунок 3- Рычаг

Создание упрощённой геометрии началось с главного эскиза, представленного на рисунке 4

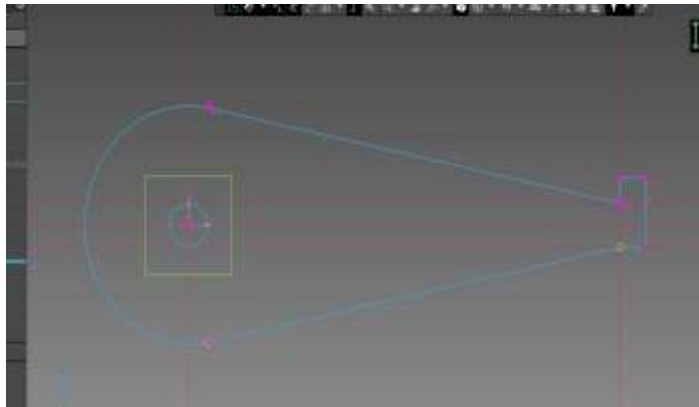


Рисунок 4 - Эскиз

После чего было произведено выдавливание детали и выполнение технических отверстий. Для упрощения конструкции, была изменена геометрия углубления под шляпки крепёжных болтов. (Рисунки 5-6)

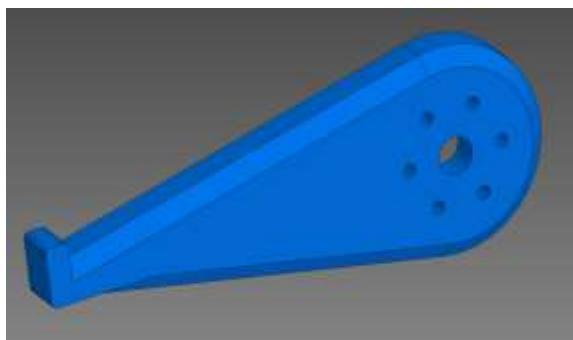


Рисунок 5 – Рычаг

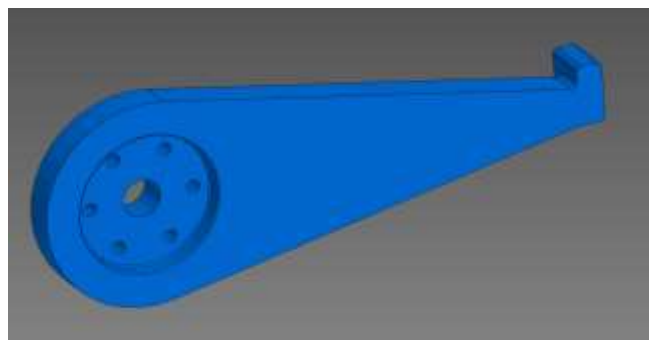


Рисунок 6 – Рычаг 1

После создания геометрии необходимо было сохранить деталь в формате Step, для экспортирования в Workbench. (Рисунок 718)

6. План эксперимента по исследованию различных зависимостей

План эксперимента:

1. Топологическая оптимизация детали с использованием встроенных инструментов Ansys Mechanical.
2. Составление двух расчётных моделей, с первоначальной геометрией и претерпевшей топологическую оптимизацию.
3. Расчёт нагрузок, действующих на детали
4. Сравнение результатов расчётов

7. Составление расчётной модели

Первым шагом является создание в Workbench расчёта Static Structural и добавление созданной геометрии в формате step (Рисунок 8)

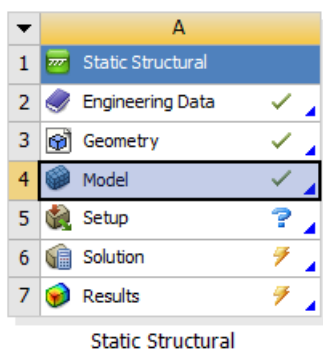


Рисунок 8 – Static Structural

Следующим пунктом была сгенерирована первичная сетка (Рисунок 9)

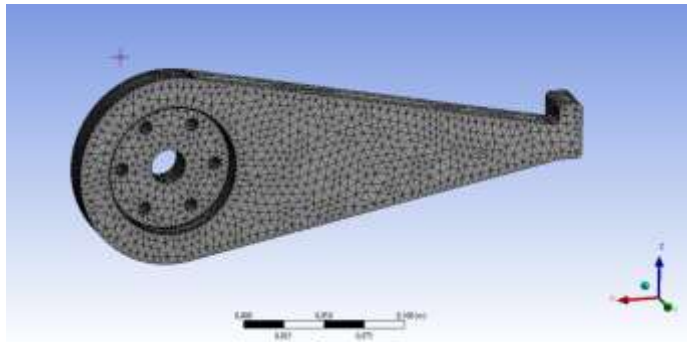


Рисунок 9 - Mesh

Установим граничные условия (ГУ): Fixed Support - жесткая заделка, Force -Сила. (Рисунки 10-11). Значение силы можно определить из таблицы опытов разрушения зубчатых колёс, установке, частью которой является наш рычаг представленной на рисунке 23. Максимальное значение нагрузки при разрушении = 810 Н.

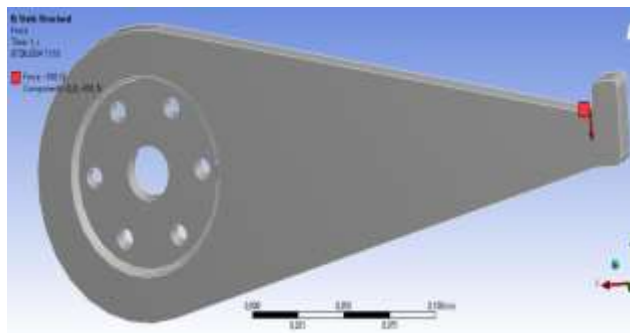


Рисунок 10 - Force

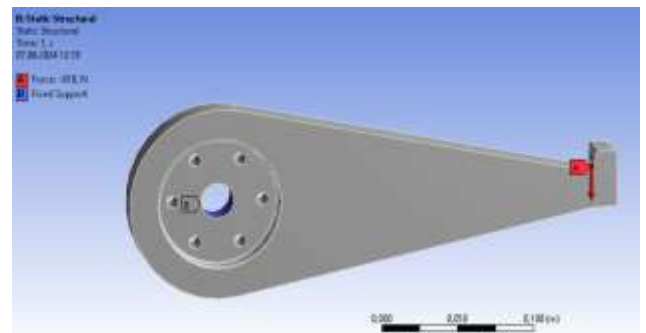


Рисунок 11– Fixed Support + Force

Опыт	ABS	PLA	PETG	PETG+CF	Nylon	Polyurethane
1	260 Н	291,6 Н	267,6Н	264,8 Н	-	-
2	300 Н	404,6 Н	360 Н	270,4 Н	-	-
Среднее знач.	280 Н	348 Н	313,8 Н	267,6 Н	-	-
Усадка	54,7 мм	-	54,82 мм	54,6мм	53,83мм	54,3мм

Рисунок 12 – Результаты опытов

Задали материал – ABS Plastic на рисунке 13 и добавили модули Total deformation и Equivalent Stress, на рисунке 14

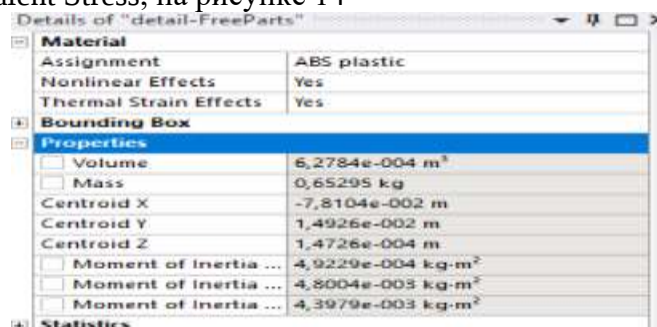


Рисунок 13– Свойства детали

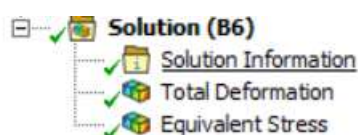


Рисунок 14 - Solution

Подготовка расчетной КЭ сетки: к базовой сетке необходимо добавить некоторые инструменты для более точного расчёта результатов

Вставка инструмента для создания структурированной сетки по грани в актуальной версии ANSYS он называется «Face Sizing» (Рисунок 15).

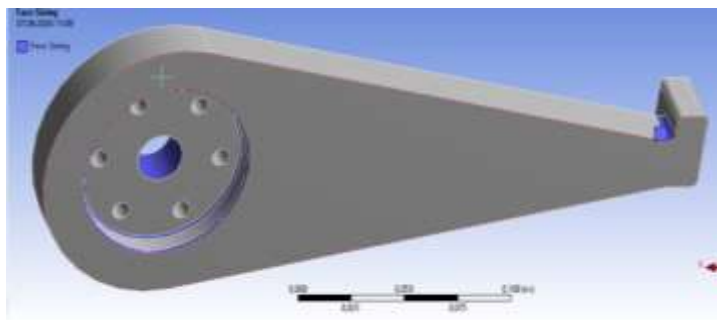


Рисунок 15 – Face Sizing

Также в параметрах сетки необходимо задать некоторые настройки, такие как Element Size, Transition, Smoothing (Рисунок 16).

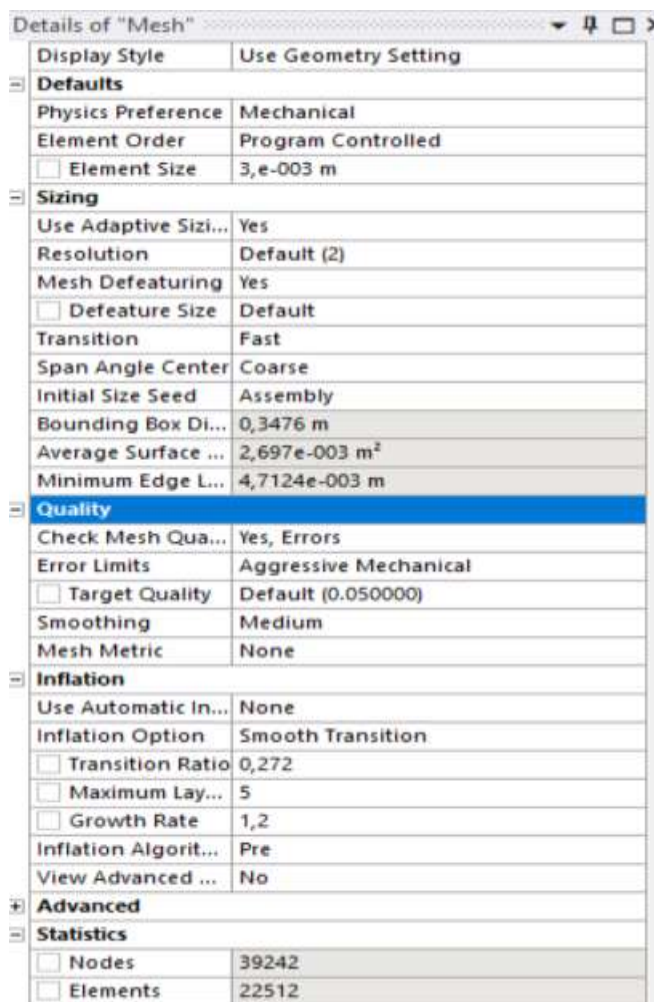


Рисунок 16 – Details of mesh

8 Топологическая оптимизация детали

Добавим модуль Topology Optimization, вновь зададим такие же материал, параметры сетки и ГУ на новую модель конструкции. (Рисунок 17)

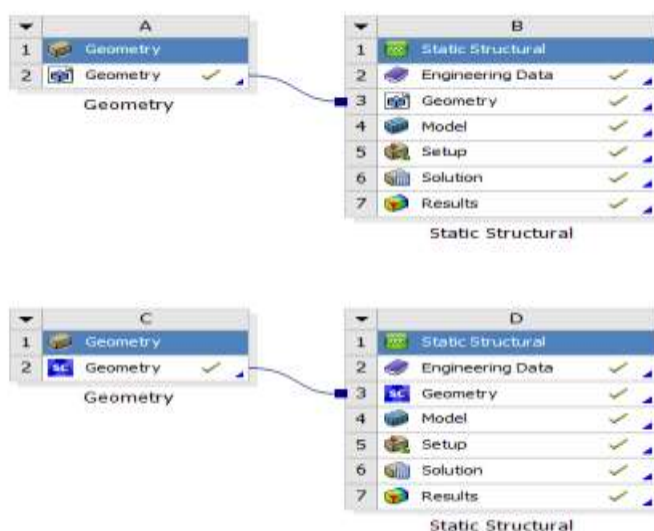


Рисунок 17– Структура расчётов

Разбиваем модель на простые элементы в Space Claim, для упрощения параметров топологической оптимизации. Сделать это можно с помощью инструмента Split Body (Рисунок 18-19)

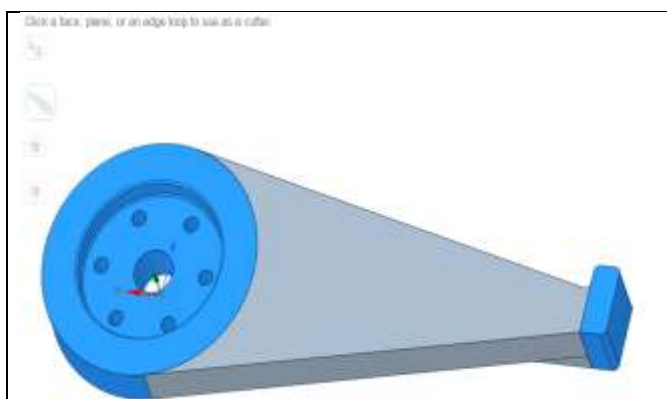


Рисунок 18 – Элементы модели

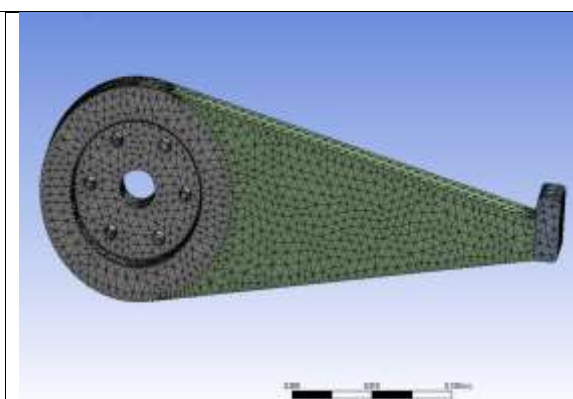


Рисунок 19 – Новое отображение модели

Topology Optimization включает в себя следующие пункты:

1) Analysis Settings (параметры анализа) — здесь представлены привычные настройки, касающиеся сходимости решения задачи ТО, максимальное количество итераций и т. д.

2) Optimization Region (область оптимизации) — задание областей, попадающих под оптимизацию, и областей, которых оптимизация не должна коснуться. Будем считать все тело за область проектирования, но внутри этой области определим тела, которые не будут подвержены оптимизации. По умолчанию исключениями являются те геометрические объекты, к которым приложены ГУ. Поменяем исключения Exclusion Region с Boundary Condition на

Geometry Selection и вручную выберем те тела, которые оптимизировать не нужно (рис. 4). Рис. 4. Optimization Region

3) Objective (целевая функция) — по умолчанию стоит Compliance → Minimize (снижение податливости — максимизация жесткости). Можно добавить дополнительные целевые функции (Mass, Volume). Оставим по умолчанию.

4) Response Constraint (ГУ) — по умолчанию стоит Mass — некий процент массы, который должен остаться в оптимизированной конструкции. Кроме того, есть варианты Volume, Global Von-Mises Stress, Local Von-Mises Stress, Displacement, Reaction Force, Natural Frequency. Также здесь можно задать производственные ограничения, например, чтобы конструкция была симметричной, или чтобы представляла собой некоторое сечение, вытягиваемое в заданном направлении и др. Это применяется для приспособливания результата к тому, или иному способу производства. Воспользуемся ограничением по массе, равным 40 %. (Рис.20-21)

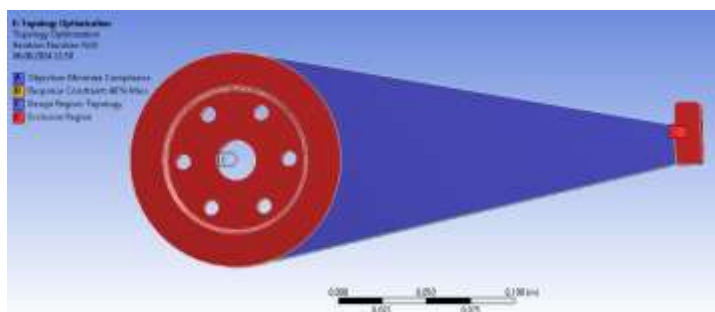


Рисунок 20 – Параметры Topology Optimization

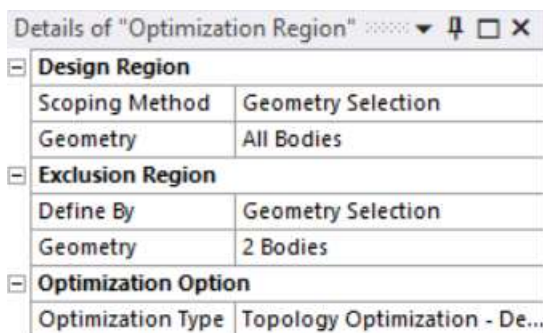


Рисунок 21 – Optimization Region

Выполним решение задачи ТО (Рис. 22). В процессе решения в режиме реального времени можно видеть номер итерации, график сходимости, а также в ветке Solution Information объект — Topology Density Tracker, показывающий обчитываемую конструкцию.

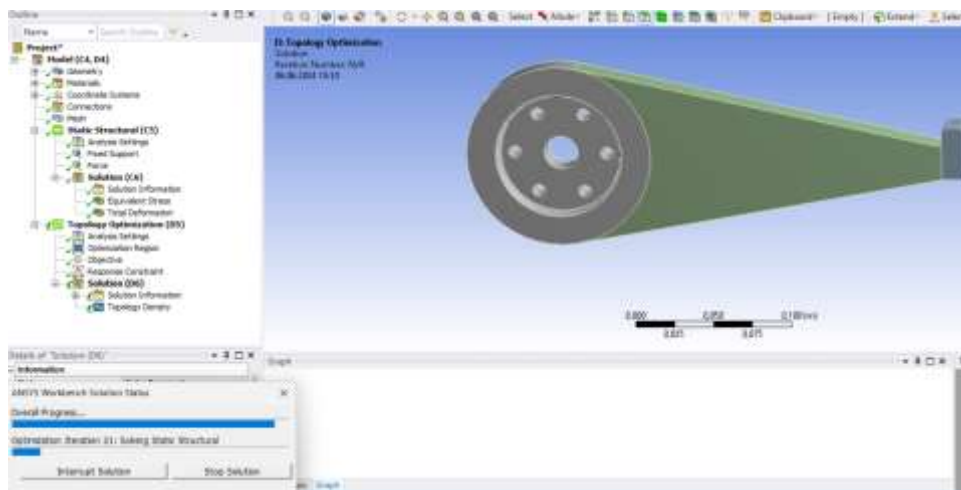


Рисунок 22 – Запуск Оптимизации

Выполним решение задачи ТО. В процессе решения в режиме реального времени можно видеть номер итерации, график сходимости, а также в ветке Solution Information объект — Topology Density Tracker, показывающий обесчитываемую конструкцию. В результате решения задачи получен график (рис. 34), построенный в единицах псевдоплотности — величина, отвечающая за наличие/отсутствие материала в расчетной области; находится в диапазоне от 0 до 1, где 0 — полное отсутствие материала, 1 — место, где материал быть обязан. Все, что между 0 и 1 — эффект, касающийся решения задачи, который желательно устремить к минимуму. График выполнен в 3 областях псевдоплотностей, имеющих свои цвета и подписи. Программный комплекс рекомендует следующее выполнение:

- 1) Remove (красный цвет) — значения псевдоплотностей от 0 до 0,4; тот материал, который крайне рекомендуется удалить;
- 2) Marginal (бежевый цвет) значения псевдоплотностей от 0 до 0,4 до 0,6; материал, который можно как удалить, так и оставить;
- 3) Keep (серый цвет) — значения псевдоплотностей от 0.6 до 1,0; тот материал, который необходимо оставить.

На рисунке 24 можно увидеть более детализированный График псевдоплотностей с отображением более чем 3 цветов

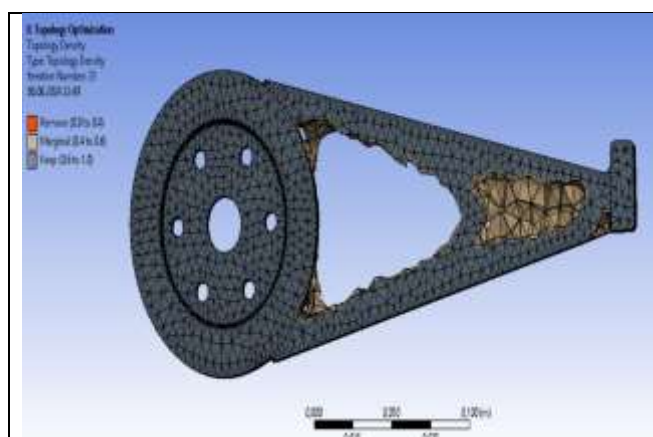


Рисунок 23 График Псевдоплотностей

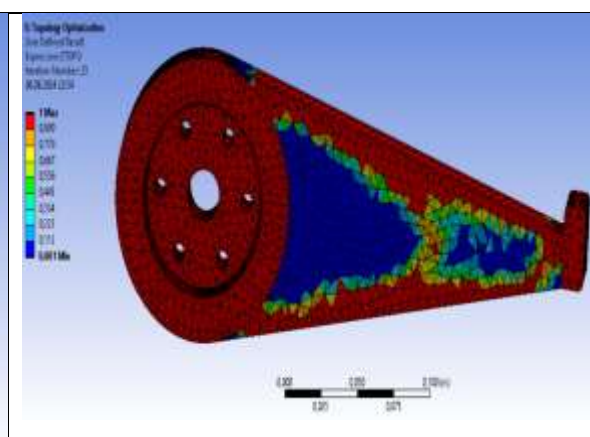


Рисунок 24 - Детализированный график псевдоплотностей

Экстремальные варианты оптимизированной конструкции можно оценить с помощью инструмента Topology Density, передвигая ползунок Retained Threshold, показывающий какую часть материала удаляем, в крайние положения (0,01 — слева; 0,99 — справа) (рис. 25).

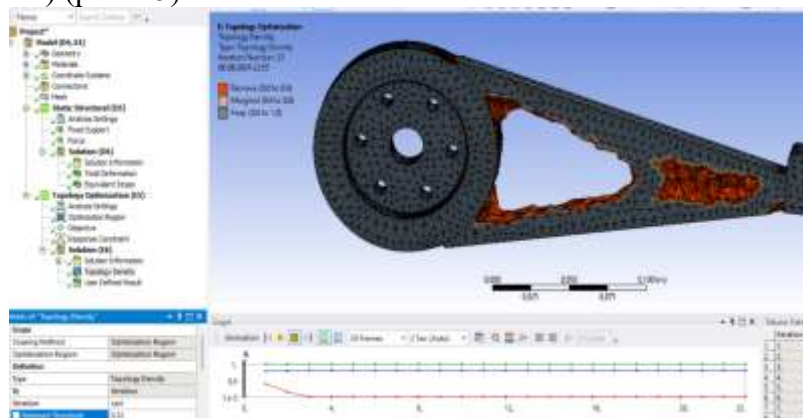


Рисунок 25– Topology Density

На следующем этапе необходимо доработать геометрию с помощью инструментов Space Claim, на рисунке 26 можно наблюдать геометрию изначальной детали и оптимизированной одновременно.

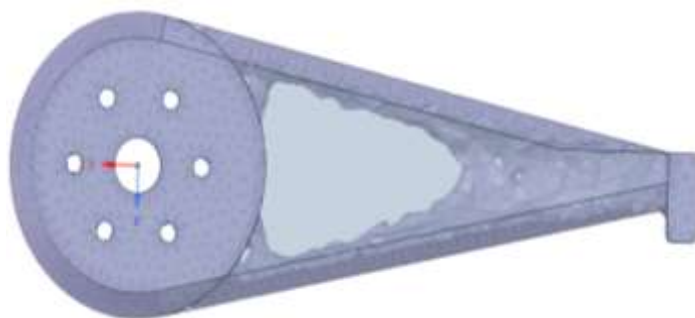


Рисунок 26

Данную конструкцию необходимо отредактировать для проведения верификационного расчета. Выполняем редактирование в SpaceClaim. Исправляем грубые ошибки STL геометрии командой Auto Fix. Более мелкие ошибки исправляем инструментом Shrinkwrap, «накрывающим» STL геометрию новым слоем STL сетки. Улучшаем гладкость объекта с помощью двух операций: Smooth (сглаживающей) и Reduce (существенно уменьшающей количество фасеток на STL геометрии при сохранении ее формы). Несколько раз повторим комбинацию трех последних команд для получения удовлетворительной гладкости. Данные итерации представлены на рисунках 27– 31.

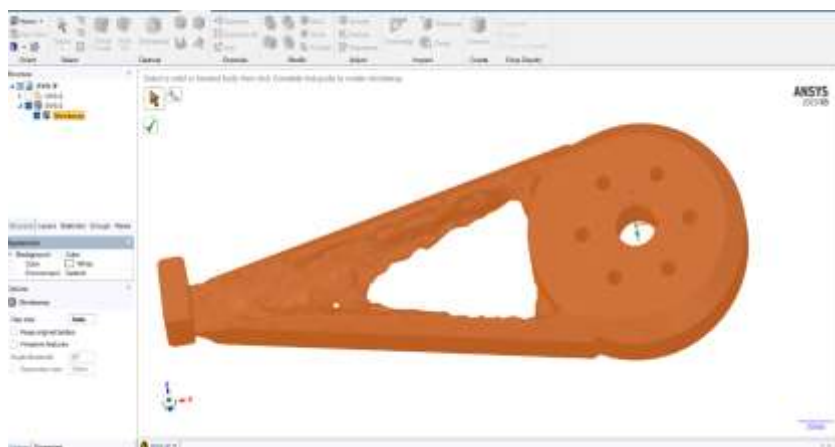


Рисунок 27 – Итерация 1

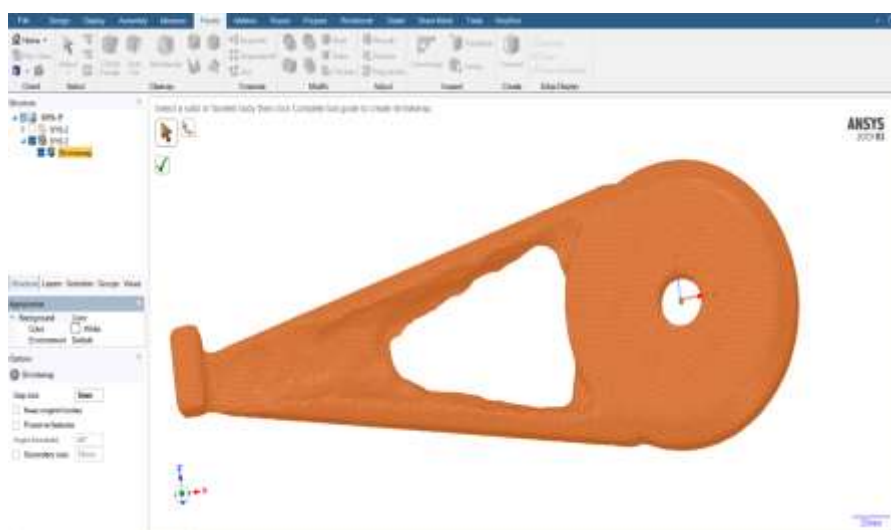


Рисунок 28 - Итерация 1



Рисунок 29 – Итерация 2



Рисунок 30 – Итерация 3



Рисунок 31 - Итерация 4

Для того, чтобы восстановить геометрию функциональных поверхностей, необходимо выдавить тела (рис. 32), перевести эти тела из solid в stl, инструментом convert (рис. 33) и вычесть их из общего объёма (рис. 34).



Рисунок 32 - Выдавливание

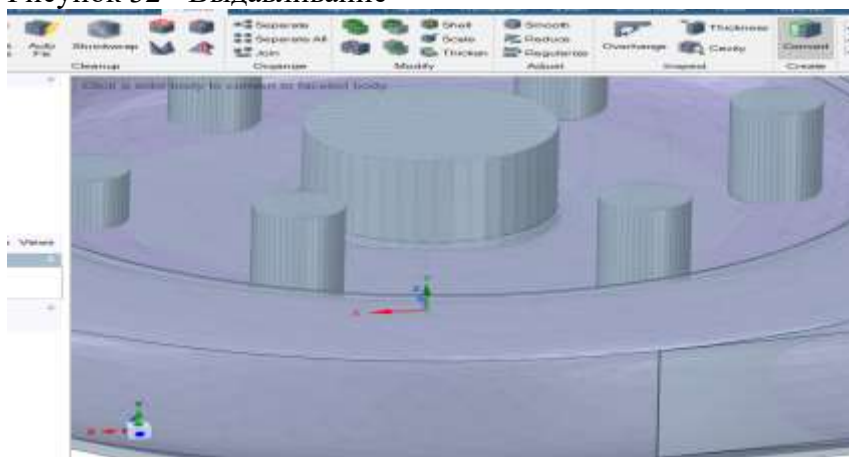


Рисунок 35 – Перевод в STL

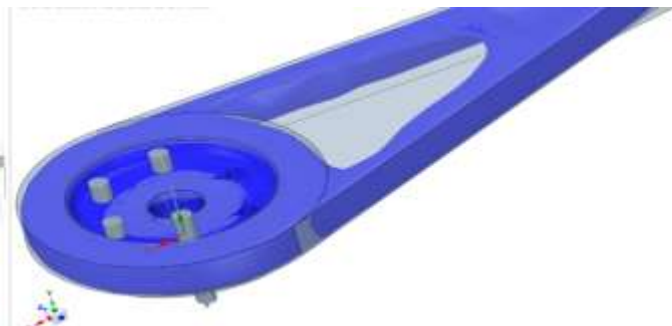


Рисунок 36 - Вычитание

Окончательную геометрию можно увидеть на рисунке 37. Её необходимо перевести в формат Solid для дальнейшего расчёта (Рис.38).

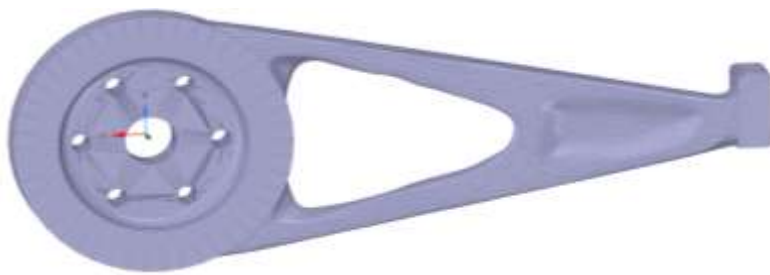


Рисунок 37 – Окончательная геометрия

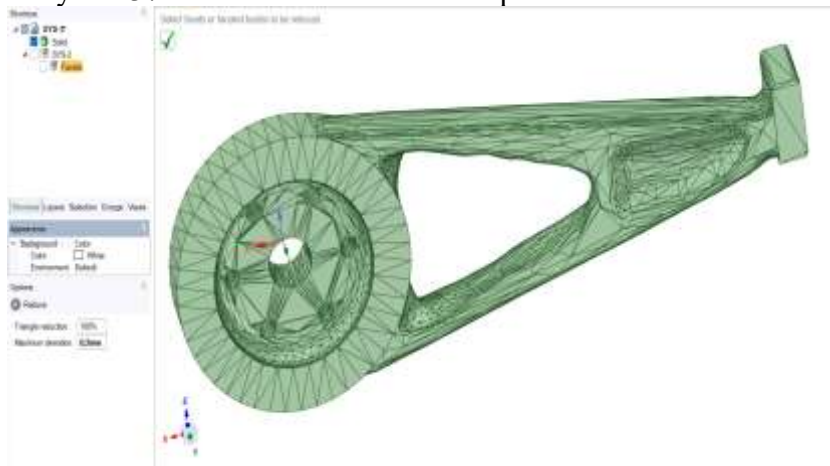


Рисунок 38 – Перевод в Solid

Переназначаем граничные условия. (Рис. 39)

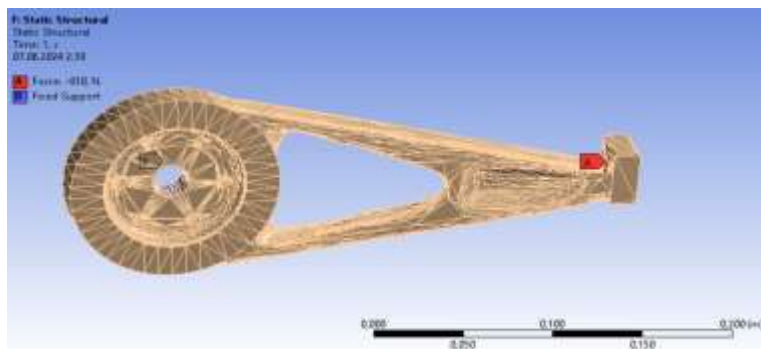


Рисунок 39 – Граничные условия

Генерируем сетку с назначением инструмента Path Independent, который поможет создать более равномерное распределение узлов. (Рис. 40)

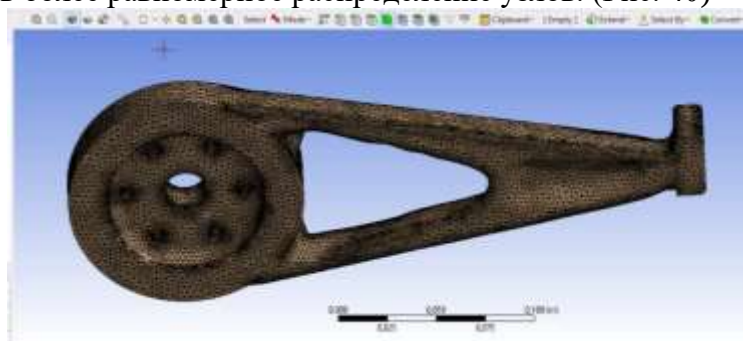


Рисунок 40 – Сетка

9 Сравнение результатов

Максимальные напряжения меньше предела текучести, и по данным правилам, конструкция вполне работоспособна.

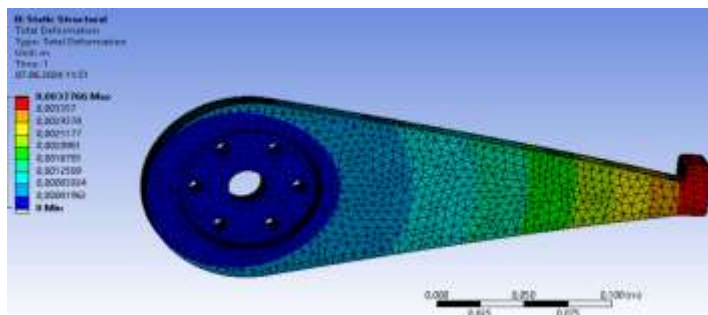


Рисунок 41 – Total Deformation

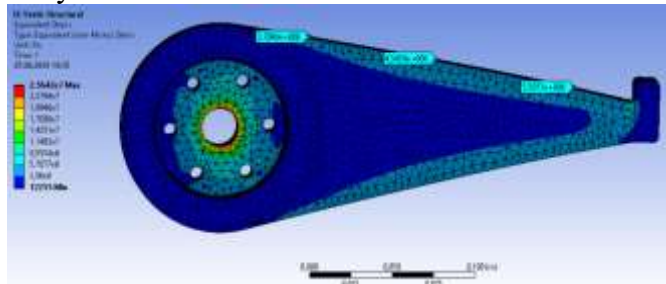


Рисунок 42 – Equivalent Stress

Details of "detail-FreeParts"	
Assignment	ABS plastic
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
☐ Volume	6,2784e-004 m ³
☐ Mass	0,65295 kg
Centroid X	-7,8104e-002 m
Centroid Y	1,4926e-002 m
Centroid Z	1,4726e-004 m
☐ Moment of Inertia ...	4,9229e-004 kg·m ²
☐ Moment of Inertia ...	4,8004e-003 kg·m ²
☐ Moment of Inertia ...	4,3979e-003 kg·m ²
Statistics	

Рисунок43 - Свойства

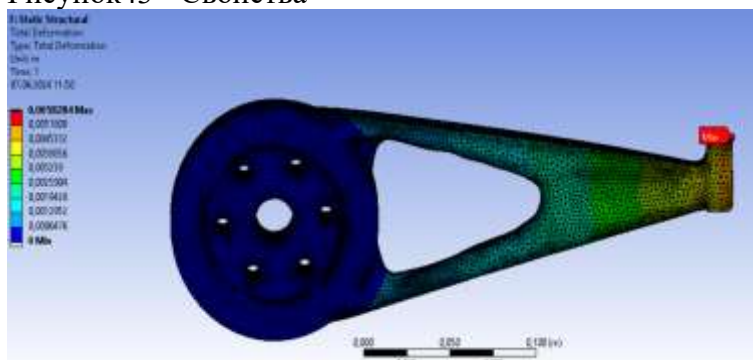


Рисунок 44 - Total Deformation 2

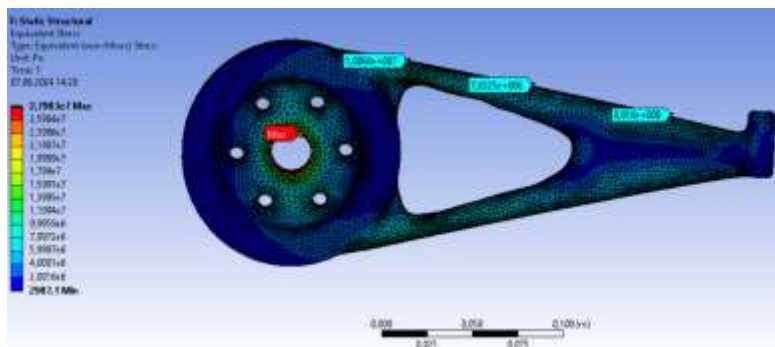


Рисунок 45 - Equivalent Stress 2

Details of "SYS-3\Solid"	
Treatment	None
Material	
Assignment	ABS plastic
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
☐ Volume	4,163e-004 m ³
☐ Mass	0,43295 kg
Centroid X	-5,6254e-002 m
Centroid Y	1,5631e-002 m
Centroid Z	1,8964e-004 m
☐ Moment of Inertia ...	4,0625e-004 kg·m ²
☐ Moment of Inertia ...	3,6754e-003 kg·m ²
☐ Moment of Inertia ...	3,32e-003 kg·m ²

Рисунок 46 – Свойства 2

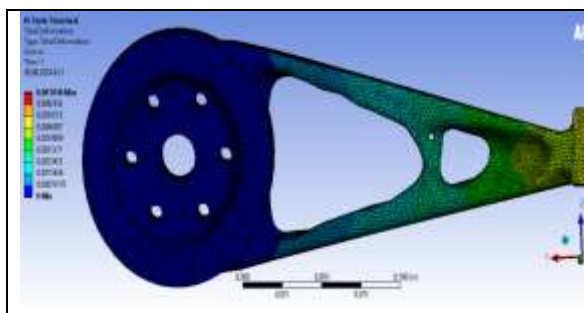
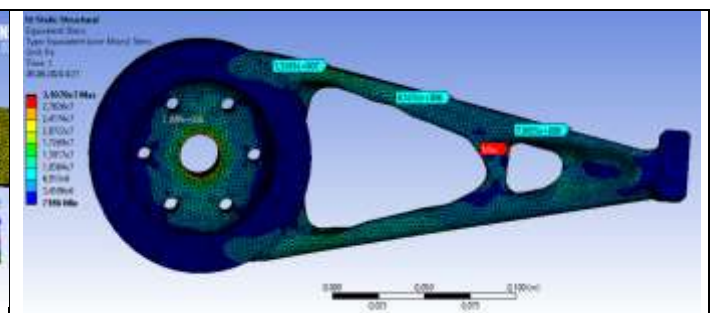


Рисунок 47 - Total Deformation 3



Рисунки48- Equivalent Stress 3

Details of "SYS-3\Solid"	
Treatment	None
Material	
Assignment	ABS plastic
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
☐ Volume	3,8881e-004 m ³
☐ Mass	0,40436 kg
Centroid X	-4,9366e-002 m
Centroid Y	1,5478e-002 m
Centroid Z	1,7595e-004 m
☐ Moment of Inertia ...	3,9499e-004 kg·m ²
☐ Moment of Inertia ...	3,312e-003 kg·m ²
☐ Moment of Inertia ...	2,9655e-003 kg·m ²

Рисунок 49 - Свойства 3

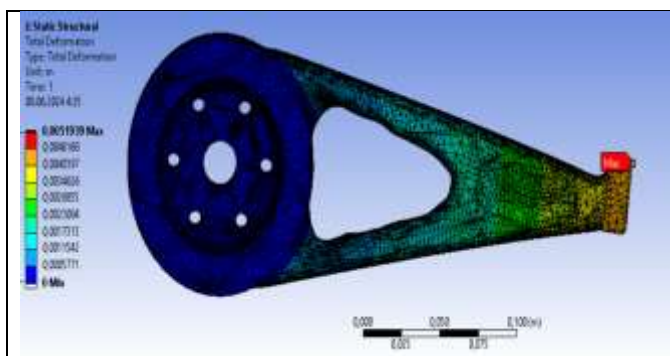


Рисунок 50 - Total Deformation 4

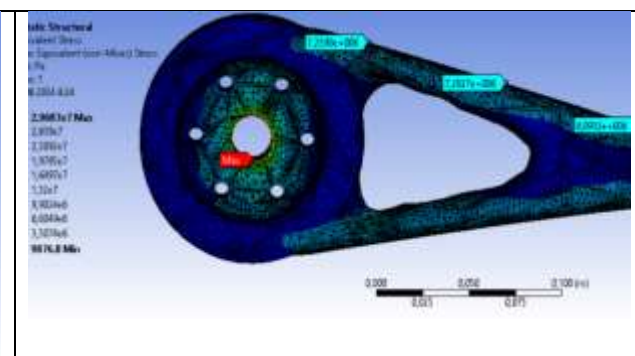


Рисунок 51 - Equivalent Stress 4

Details of "SYS-4\Solid"	
Bounding Box	
Properties	
Volume	4,5151e-004 m ³
Mass	0,46957 kg
Centroid X	-6,2492e-002 m
Centroid Y	1,5711e-002 m
Centroid Z	1,68e-004 m
Moment of Inertia ...	4,2986e-004 kg·m ²
Moment of Inertia ...	4,0312e-003 kg·m ²
Moment of Inertia ...	3,6568e-003 kg·m ²
Statistics	
CAD Attributes	
PartTolerance:	0,00000001
Color:143.175.143	

Рисунок 52 - Свойства 4

Таблица результатов:

Параметр	Рычаг 1	Рычаг 2	Рычаг 3	Рычаг 4
Max Total Deformation	0,00378 m	0,00583 m	0,00704 m	0,00519 m
Max Equivalent Stress	25,6 MPa	27,9 MPa	31,0 MPa	29,6 MPa
Equivalent Stress 1	3,7 MPa	10 MPa	13,2 MPa	7,2 MPa
Equivalent Stress 2	4,7 MPa	7,6 MPa	8,6 MPa	7,3 MPa
Equivalent Stress 3	5,5 MPa	8,9 MPa	12,9 MPa	8 MPa
Mass	0,652 kg	0,432 kg	0,404 kg	0,469 kg
Retained Threshold	-	0,5	0,7	0,3

Нагрузки в растянутой области оптимизированных деталей в целом больше нагрузок в аналогичной локации неоптимизированной детали, но не превышают 14 МПа, тогда как предел текучести для ABS Plastic составляет 32 МПа. Самым подходящим является топологически оптимизированный рычаг 2, так как имеет рациональное отношение величины нагрузок к массе (усреднённые значения) в отличие от других рычагов, у которых или большое значение массы или значение нагрузок.

Масса базовой детали составляет 0,65 кг, а оптимизированной рычаг 2 0,43кг, что даёт преимущество оптимизированной детали в массовых характеристиках в 0,22кг. При этом, полученную конструкцию можно производить преимущественно с помощью 3D принтеров. Так как аддитивные технологии позволяют свести потери материала при производстве к минимуму, можно считать, что затраты на материал пропорциональны массе детали.

Сходимость численного и аналитического решения.

Результатом численного решения являются Перемещения:

$$\theta_{\max} = 0.02531 \text{ кНм}^2/EI;$$

$$w_{\max} = 0.004219 \text{ кНм}^3/EI;$$

Результатом аналитического решения являются результаты расчёта Total Deformation.

Сложно оценить сходимость решений по той причине, что перемещения рассчитаны с единицей измерения $\text{кНм}^2/EI$, где (E) - модуль упругости материала балки и (I) - момент инерции сечения. Момент сечения (I) зависит от сечения балки, которой в нашем случае является рычаг, а так как наш рычаг не имеет равномерного сечения, момент инерции сечения сложно рассчитать.

Анализ результатов расчета перемещений балки как численным методом, так и аналитическим позволяет выявить закономерности в поведении конструкции под различными нагрузками. Например, изменения формы балки под различными нагрузками, что помогает оптимизировать её конструкцию для достижения требуемых характеристик прочности и устойчивости.

Закключение. Таким образом, получены 3 работоспособных варианта с уменьшенной массой, однако, последний вариант предпочтительнее из-за анализа расчётов.

Преимущества топологической оптимизации:

1. Снижение затрат. Топологическая оптимизация может сократить расход материалов до 40%, что снижает общую стоимость изделия.
2. Быстрое проектирование. Компьютерные алгоритмы могут очень быстро составлять и оценивать десятки тысяч комбинаций на основе заданных условий.
3. Быстрое прототипирование. Сгенерированный программой вариант можно после доработки распечатать на 3D-принтере и протестировать.
4. Устранение ошибок на этапе проектирования.

Топологическая оптимизация лучше всего подходит для приложений, в которых конструкции подвергаются большим нагрузкам и при этом должны стремиться к наименьшей массе.

В дальнейшем можно улучшить конструкцию и сделать возможным ее производство более классическим способом. Для этого необходимо изменить геометрию таким образом, чтобы её поверхности оказались плоскими.

Список источников

1. Махмутов, Р. Г. Топологическая оптимизация рычага в ANSYS Mechanical / Р. Г. Махмутов, Г. Г. Кутлугалимов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2019. — № 52 (290). — С. 49-54. — URL: <https://moluch.ru/archive/290/65944/> (дата обращения: 01.04.2025).
2. Федосеев, Н. В. Расчетное исследование влияния типа конечных элементов на коэффициент запаса топологически оптимизированной конструкции / Н. В. Федосеев, С. В. Семёнов. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2018. — № 21 (207). — С. 92-96. — URL: <https://moluch.ru/archive/207/50578/> (дата обращения: 07.06.2024).
3. 3D Today. Топологическая оптимизация в ANSYS. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/dagov/topological-optimization-in-ansys/> (дата обращения 22.10.2019г.)

Сведения об авторах

Абузаров Артём Вадимович, студент кафедры «Конструкторско – технологическое обеспечение машиностроительных производств» ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия

Абузаров Артур Вадимович, студент кафедры «Конструкторско – технологическое обеспечение машиностроительных производств» ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия

Сафуса Кирилл Олегович, студент кафедры «Конструкторско – технологическое обеспечение машиностроительных производств» ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия

Научный руководитель

Лукин Роман Сергеевич, старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия

Information about the authors

Abuzarov Artyom Vadimovich, student of the Department of Design and Technological Support of Machine–Building Industries, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abuzarov Artur Vadimovich, student of the Department of Design and Technological Support of Machine–Building Industries, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Safusa Kirill Olegovich, student of the Department of Design and Technological Support of Machine–Building Industries, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Scientific supervisor

Lukin Roman Sergeevich, Senior Lecturer, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia