

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Физико-механический институт  
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите  
Директор ВШТМиМФ,  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН  
\_\_\_\_\_ А. М. Кривцов  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**  
**Топологическая оптимизация конструкций инструментами ANSYS**

по направлению подготовки

01.03.03 «Механика и математическое моделирование»

направленность

01.03.03\_03 Математическое моделирование процессов  
нефтегазодобычи

Выполнил

студент гр. 5030103/00302

Д.М. Валиев

Руководитель

Старший преподаватель ВШТМиМФ

А.И. Орлов

Санкт-Петербург  
2024

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

**Физико-механический институт**

**Высшая школа теоретической механики и математической физики**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШТМиМФ

А. М. Кривцов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

студенту Валиеву Даниилу Михайловичу, гр. 5030103/00302

1. Тема работы: Топологическая оптимизация конструкций инструментами ANSYS
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 10.06.2024
3. Исходные данные по работе: актуальные научные публикации, связанные с темой исследования, справочная литература, модель силовой конструкции аэродинамического элемента.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
  - 4.1 Сравнение традиционных и аддитивных методов изготовления конструкций. Топологическая оптимизация конструкций применительно к аддитивным технологиям. Анализ литературных источников. Постановка задачи. Актуальность и новизна задачи;
  - 4.2 Сравнение свойств материалов, получаемых аддитивными технологиями с традиционными материалами;
  - 4.3 Расчет нагрузок на аэродинамический элемент с помощью Ansys Discovery. Демонстрация возможностей мультидисциплинарного расчета;
  - 4.4 Выполнение топологической оптимизации силовой конструкции аэродинамического элемента инструментами Ansys. Обработка результатов и построение на их основе моделей для изготовления традиционными и аддитивными методами.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрено
6. Консультанты по работе: не предусмотрено.
7. Дата выдачи задания: 28.02.2024

Руководитель ВКР: \_\_\_\_\_ А.И. Орлов, старший преподаватель ВШТМиМФ

Задание принял к исполнению: 28.02.2024

Студент \_\_\_\_\_ Валиев Д.М.

## РЕФЕРАТ

На 36 с., 33 рисунка, 8 таблиц.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** КРОНШТЕЙН СПОЙЛЕРА, ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

В данной работе проводятся расчеты на прочность и топологическая оптимизация силового элемента аэродинамической конструкции в конечно-элементном пакете Ansys. В роли силового элемента выбран кронштейн спойлера автомобиля. Рассматриваются традиционные и полученные аддитивными технологиями материалы, которые используются в расчетах.

Методология выполнения прочностного расчета включает в себя добавление рассматриваемых материалов в модуль анализа, получение действующих на модель нагрузок, построение конечно-элементной сетки, задание граничных условий и приложение полученных сил. После этого проводится топологическая оптимизация и последующие верификационные расчеты на прочность.

Проводится анализ напряженно-деформированных состояний моделей до оптимизации и после неё. анализ полученных результатов для различных материалов, таких как алюминиевые, стальные и титановые сплавы.

Результатом работы являются топологически оптимизированные модели кронштейна, сравнение полученных полей напряжений и перемещений.

## THE ABSTRACT

36 pages, 33 figures, 8 tables.

**KEYWORDS:** SPOILER BRACKET, TOPOLOGY OPTIMIZATION, STRESS-STRAIN STATE, FINITE ELEMENT MODELING, FINITE ELEMENT METHOD, MATHEMATICAL MODELING.

This work involves strength calculations and topological optimization of a load-bearing element in an aerodynamic structure using the finite element software package Ansys. The load-bearing element selected for this study is a car spoiler bracket. Both traditional and additively manufactured materials are considered in the calculations.

The methodology for performing the strength calculation includes adding the considered materials to the analysis module, obtaining the loads acting on the model, creating the finite element mesh, setting boundary conditions, and applying the obtained forces. Afterward, topological optimization is conducted followed by subsequent verification strength calculations.

The analysis of the stress-strain states of the models before and after optimization is carried out. The results for various materials, such as aluminum, steel, and titanium alloys, are analyzed.

The outcome of the work includes topologically optimized models of the bracket, along with a comparison of the resulting stress and displacement fields.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БЛОК.....	6
1.1. Топологическая оптимизация .....	6
1.2. Метод конечных элементов .....	7
1.3. Традиционные и аддитивные методы изготовления конструкций.....	9
1.4. Используемые материалы .....	11
ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	14
ГЛАВА 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ .....	16
3.1. Получение нагрузок с помощью Ansys Discovery .....	16
3.2. Топологическая оптимизация кронштейнов .....	17
3.2.1. Применение алюминиевых сплавов.....	17
3.2.2. Применение стальных сплавов.....	25
3.2.3. Применение титановых сплавов .....	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	38
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	41

## **ВВЕДЕНИЕ**

В современном промышленном производстве активно используются аддитивные технологии. Это технологии, которые создают объекты послойно, путем добавления материала. Благодаря им стало возможным создание уникальных по форме и свойствам деталей, конструкций и даже человеческих органов. Именно поэтому широкое применение данного вида технологического производства для изготовления сложных и мелкосерийных изделий нашлось в авто- и авиастроении, машиностроении и медицине.

Изготовление каждого объекта требует подготовку цифровой модели и ее проверку на соответствующие характеристики. В целях сохранения и в некоторых случаях улучшения целевых параметров и экономии материала используются методы топологической оптимизации.

Топологическая оптимизация становится все более популярной благодаря развитию вычислительных методов и программного обеспечения, способных эффективно обрабатывать большие объемы данных и выполнять сложные алгоритмы и операции. Одной из таких программ является конечно-элементный пакет Ansys, который позволяет производить расчет напряженно-деформированного состояния на основе метода конечных элементов и последующую оптимизацию модели.

Немаловажную роль в процессе изменения вида объекта играет материал, поскольку его физико-механические свойства определяют характер возникающих напряжений. В производстве, наряду с традиционными материалами, становятся востребованными их аддитивные аналоги.

В данной работе будет проводиться топологическая оптимизация модели силового элемента аэродинамической конструкции, выполненного из традиционных и аддитивных материалов, в конечно-элементном пакете Ansys.

## ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БЛОК

### 1.1. Топологическая оптимизация

Топологическая оптимизация – способ оптимизации, который заключается в распределении материала в заданном объеме с учетом воздействия приложенных нагрузок и примененных граничных условий. Этот метод применяется с целью определения рационального заполнения данного объема тела, которое будет удовлетворять заданным критериям оптимизации – целевым функциям.

Тип целевых функций зависит от проводимого до оптимизации расчета. Например, для прочностных задач в качестве критериев можно задать податливость системы, напряжения или перемещения, в температурном анализе – значение температуры. Доступными функциями для всех расчетов являются масса и объем. В зависимости от задачи задается один или несколько критериев одновременно, которые в процессе оптимизации проверяются на каждой итерации. К тому же на ход решения задачи влияет выбранный метод, с помощью которого рассчитывается оптимальная форма конструкции. В КЭ-пакете Ansys представлены методы оптимизации, основа которых предполагает вычисления с помощью псевдоплотностей.

Одним из них является метод *Density based*, который минимизирует податливость системы в соответствии с полученным напряженно-деформируемым состоянием. Аргументом этой функции является набор значений псевдоплотности, одно число которого соответствует отдельному элементу. Само число может быть либо 0 – элемент не заполняется материалом, либо 1 – элемент заполняется. Помимо этого, в выражении функции податливости участвует полная энергия деформации и общее перемещение тела. Формулы, лежащие в основе этого метода, и алгоритм, в котором описано условие остановки процесса, приводятся в [9].

Топологическая оптимизация моделей, для которых важны такие характеристики, как прочность и общий вес конструкции, проводится после

первичного прочностного расчета для минимизации массы и напряжений, податливости [6]. Данные, необходимые для запуска процесса оптимизации, вычисляются при моделировании физического процесса путем решения системы линейных алгебраических уравнений на основе метода конечных элементов.

## 1.2. Метод конечных элементов

Метод конечных элементов решает дифференциальные уравнения в частных производных. Основной идеей метода является разделение расчетной области на небольшие участки – конечные элементы. В них вид искомой переменной задается внутри каждого такого участка аппроксимирующей функцией – функцией форм [1]. Вне «своего» элемента она равна нулю.

Главная задача метода конечных элементов заключается в определении коэффициентов в этой функции, которые вычисляются через значения искомой переменной в некоторых точках, которые совпадают с узлами этих элементов и дают в итоге непрерывное решение.

Нужно воспользоваться вариационным принципом – определить минимум функционала потенциальной энергии. Функционал потенциальной энергии имеет следующий вид:

$$\Pi = \Lambda - \Omega \quad (1.2.1)$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия,  $\Lambda$  – кинетическая энергия,  $\Omega$  – работа внешних сил.

Энергия внутренних сил бесконечно малого объема выражается через произведение деформаций на напряжения этого объема:

$$d\Lambda = \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (1.2.2)$$

где  $\{\varepsilon\}$  – вектор-столбец деформаций,  $\{\sigma\}$  – вектор-столбец напряжений.

Для нахождения внутренней энергии конечного объема необходимо проинтегрировать выражение (1.2.2):

$$\Lambda = \int_V \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (1.2.3)$$

Геометрические и физические соотношения [1, С. 44–45] подставляются в (1.2.3):

$$\Lambda = \frac{1}{2} \int_V \{u^e\}^T [B]^T [D] [B] dV \{u^e\} \quad (1.2.4)$$

где  $\{u^e\}$  – вектор-столбец узловых перемещений,  $[D]$  – матрица упругих свойств,  $[B]$  – матрица градиентов.

Работа внешних сил состоит из работы сосредоточенных, поверхностных и объемных сил:

$$\Omega = \Omega_c + \Omega_l + \Omega_v \quad (1.2.5)$$

где  $\Omega_c$  – работа сосредоточенных сил,  $\Omega_l$  – работа поверхностных сил,  $\Omega_v$  – работа объемных сил.

Перемещения, отвечающие внешним нагрузкам, находятся с помощью минимизации функционала потенциальной энергии. Для этого первую вариацию этого функционала по перемещениям приравнивается к нулю:

$$\frac{\delta \Pi}{\delta \{u^e\}} = 0 \quad (1.2.6)$$

В итоге получается следующее выражение:

$$\int_V [B]^T [D] [B] dV \{u^e\} = \{f^e\}, \quad (1.2.7)$$

где  $\{f^e\}$  – вектор-столбец узловых усилий.

Локальная матрица жесткости:

$$[k^e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (1.2.8)$$

С учетом локальной матрицы жесткости уравнение примет вид:

$$[k^e]\{u^e\} = \{f^e\} \quad (1.2.9)$$

Глобальная матрица жесткости и вектор-столбец усилий:

$$[K] = \sum_e [k^e] \quad (1.2.10)$$

$$\{F\} = \sum_e \{f^e\} \quad (1.2.11)$$

В итоге основное уравнение МКЭ для системы конечных элементов имеет следующий вид:

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (1.2.12)$$

### 1.3. Традиционные и аддитивные методы изготовления конструкций

Процесс производства деталей и конструкций начинается с предварительного определения их эксплуатационных требований, используемого материала и геометрии. На данный момент методы изготовления изделий делятся на два типа – традиционные и аддитивные.

Чаще всего под традиционными методами производства понимаются такие технологические процессы, как литейное производство, сварка и механическая обработка [15]. Эти примеры широко применяются в промышленности, так как с помощью них изготавливается продукция в больших объемах с высокой скоростью.

Литейное производство, или же литьё является одним из старейших и все ещё востребованным способом получения металлических деталей. Метод заключается в плавлении металла и его заливке в подготовленную форму. Спустя определенное время материал застывает, после чего готовое изделие извлекается. В [4] говорится, что качество детали в значительной мере зависит от технологии литейного изготовления.

Сварка является методом соединения разных деталей друг с другом путем их плавления. В результате получают прочные и долговечные конструкции. В массовом производстве применяется роботизированная сварка, которая повышает скорость производства.

Механическая обработка подразумевает под собой удаление излишков материала из заготовки до получения нужной формы и качества поверхности детали. Метод обеспечивает высокую точность изготовления моделей, а также применим к разнообразным по структуре материалам, например металлам, пластикам и композитам [5].

Описанные выше методы используются в таких отраслях как автомобильная промышленность, машиностроение и авиастроение.

Аддитивные технологии, или же 3D-печать – обобщенное название методов послойного добавления материала, который может быть представлен в виде порошка, воска, фотополимерной смолы и т.д. Перед началом изготовления детали или целой конструкции строится цифровая модель желаемого объекта, которая передается на специальные принтеры или станки.

Аддитивные технологии разделяют по методам формирования на два вида: *Bed Deposition* и *Direct Deposition*. Принципиальное отличие этих видов заключается в том, что методы группы *Bed Deposition* сначала формируется слой из материала, после чего происходит выборочное воздействие лазером или другим способом. А в случае методов *Direct Deposition* материал подается в место подвода энергии, переходит в другое агрегатное состояние и наносится в

конкретное место модели. В [2] приводится описание таких методов, как SLS, EBM, DMD и DM.

Для изготовления моделей, полученных в этой работе, наиболее подходящим традиционным способом производства является механическая обработка, а способ создания с помощью аддитивных технологий будет зависеть от используемого материала.

#### 1.4. Используемые материалы

В работе предлагается рассмотреть следующие материалы: алюминий, сталь и титан.

Алюминий является одновременно и легким, и прочным металлом, обладающим высокой коррозионной стойкостью. Интерес вызывают алюминиевые сплавы, которые, за счет своих физико-механических свойств, применяется во многих отраслях промышленности.

Для проведения расчетов с использованием алюминия были выбраны сплавы АМг6, который предназначен для традиционного производства, и порошковый сплав РС-553, разработанной на базе исследований возможности применения сплава АМг6 в аддитивном производстве [8]. В таблице 1 представлены физико-механические свойства данных сплавов.

Таблица 1. Физико-механические свойства алюминиевых сплавов.

Сплав	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
АМг6	2640	71	0.33	170	340
РС-553	2460	72	0.3	435	475

Составлено по: [8], [10].

Другим материалом, выбранным для проведения расчетов, является сталь. Это сплав железа с углеродом, обладающий высокой прочностью. Сталь широко применяется в разных промышленных отраслях благодаря своим свойствам. Сплавы стали подходят как для механической обработки, так и для применения в аддитивном производстве.

Расчеты задачи будут проводиться с применением нержавеющей стали марки 03X17H14M3, которая изначально применялась в традиционном производстве, но после проведенных испытаний появилась возможность использовать её в аддитивной печати [7]. Физик-механические свойства стальных сплавов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства стальных сплавов.

Сплав 03X17H14M3	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
Традиционный	7750	195	0.31	200	500
Аддитивный	7790	102	0.28	534	593

Составлено по: [7], [12].

Последним из предлагаемых материалов для рассмотрения выступает титан. В сравнении с алюминием, он обладает более высокой прочностью и устойчивостью к коррозии, благодаря чему он предпочтительнее в авиационном и морском производствах. С другой стороны, по сравнению со сталью, титан значительно легче и прочнее, поэтому в некоторых случаях он применяется в аэрокосмической и автомобильной промышленности [13].

В качестве используемых титановых сплавов будут применены традиционный сплав ПТЗВ и его аддитивный аналог. Механические свойства образцов ПТЗВ были получены после напечатания по технологии прямого послойного построения на установке ИЛиСТ [14] и продемонстрированы в таблице 3.

Таблица 3. Физико-механические свойства титановых сплавов.

Сплав ТТЗВ	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
Аддитивный	4410	118.5	0.29	876	904
Традиционный	4450	120	0.32	590	885

Составлено по: [11], [14].

## ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является снижения массы кронштейнов, которые являются опорами для крыла и входят в конструкцию спойлера, изображенного на рисунке 2.1.1, путём проведения топологической оптимизации.

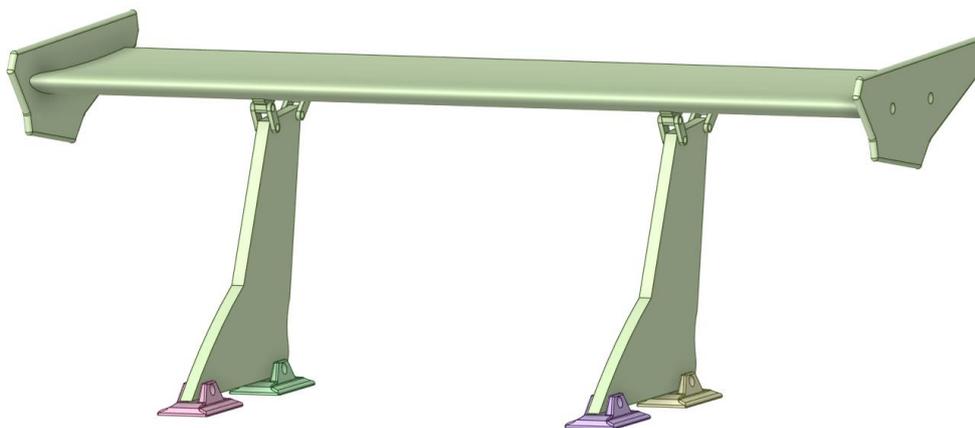


Рисунок 2.1.1. Геометрия конструкции спойлера.

Проведение топологической оптимизации требует расчета напряженно-деформированного состояния кронштейнов. В основе прочностного расчета лежит метод конечных элементов, для которого необходимо выполнить следующие шаги:

- определить действующих на модель нагрузок;
- присвоить каждому телу геометрии материал;
- построить конечно-элементную сетку;
- приложить полученные нагрузки и задать граничные условия;
- получить поля перемещений и напряжений.

После получения напряженного-деформированного состояния модели производится топологическая оптимизация по следующему алгоритму:

- 1) проверка корректности присвоения материалов для текущего расчета;
- 2) выбор целевой функции, а именно минимизация массы и напряжения модели;

- 3) исключение областей, на которые заданы граничные условия и к которым приложены нагрузки;
- 4) ограничение максимальных напряжений значением в два раза меньшим предела текучести материала;
- 5) определение процента массы, которого нужно сохранить – 45%.

Результат топологической оптимизация необходимо подготовить, учитывая технологические возможности традиционного и аддитивного производств, для проведения повторных расчетов.

Верификационные расчеты на прочность проводятся при тех же нагрузках и условиях закрепления.

После завершения расчетов нужно провести анализ полученных полей перемещений и напряжений, а также сравнить массы и запасы прочности моделей, полученных после оптимизации, и изначального варианта.

## ГЛАВА 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

### 3.1. Получение нагрузок с помощью Ansys Discovery

Ansys Discovery – программа для быстрого физического моделирования, в которой присутствует опция для задания набегающего потока воздуха. С помощью этой функции будет имитироваться движение автомобиля, представленного на рисунке 3.1.1, со скоростью 30 м/с.

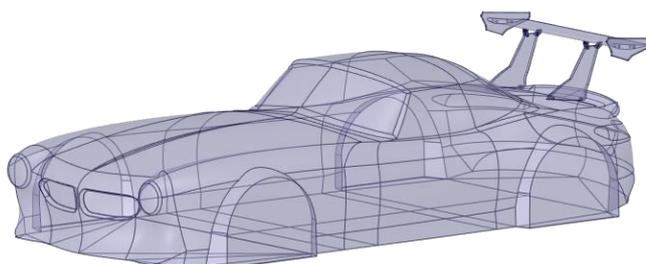


Рисунок 3.1.1. Модель автомобиля.

Для вычисления силы, приложенной к конструкции спойлера, нужно присвоить соответствующей геометрии тип граничных условий – стенка без проскальзывания.

После определения начальных и граничных условий запускается расчет с настройкой *Fidelity extreme*, которая повышает точность решения за счет измельчения сетки.

На рисунке 3.1.2 представлен результат вычисления – поле давления при обтекании профиля автомобиля.

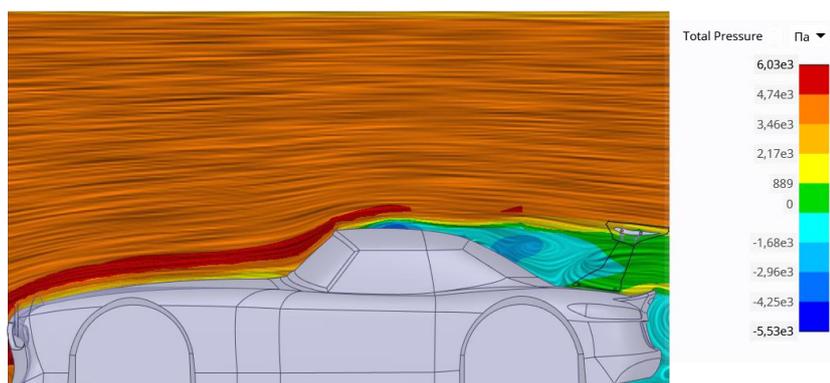


Рисунок 3.1.2. Поле давления.

В ходе расчета были получены компоненты результирующей силы, которая действует на крыло, и силы, непосредственно действующей на поверхность кронштейна. В таблице 4 приведены её значения по направлениям.

Таблица 4. Покомпонентное разложение полученных сил.

Значение силы, Н Область действия	По направлению X	По направлению Y	По направлению Z
Крыло	946	-1872	157
Поверхность кронштейна	927	-436	36

## 3.2. Топологическая оптимизация кронштейнов

### 3.2.1. Применение алюминиевых сплавов

В данном пункте рассматривается решение задачи с использованием алюминиевых материалов.

Для получения напряженно-деформированного состояния модели используется модуль *Static Structural*, в который загружается исходная геометрия модели спойлера. Далее кронштейнам присваивается материал PC-533,

остальным частям конструкции – *Structural Steel*, так как они не будут участвовать в топологической оптимизации.

Перед этапом построения сетки к местам крепления кронштейнов с опорами, изображенных на рисунке 3.2.1, были применены *Connections* типа *Joint Revolute*, которые ограничивают трансляционное движение по всем направлениям и запрещают повороты вокруг всех осей, кроме оси OZ [16]. Это позволило учесть болтовое соединение без построения дополнительной геометрии.

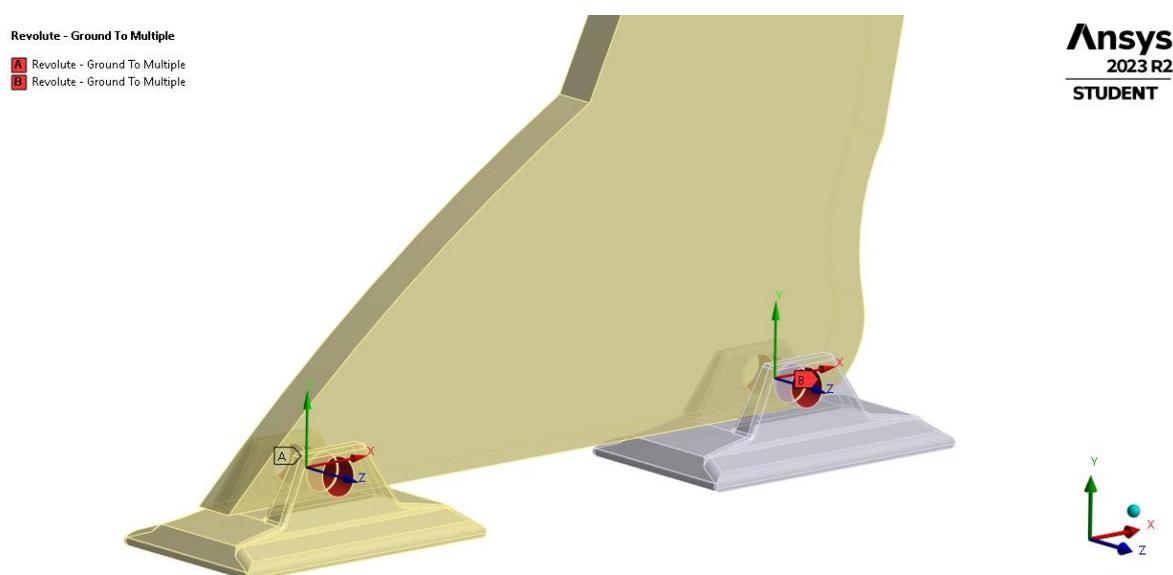


Рисунок 3.2.1. Применение связи *Joint Revolute*.

Конечно-элементная модель, представленная на рисунке 3.2.2, была построена с помощью метода *MultiZone* с характерным размером элемента 6 мм.

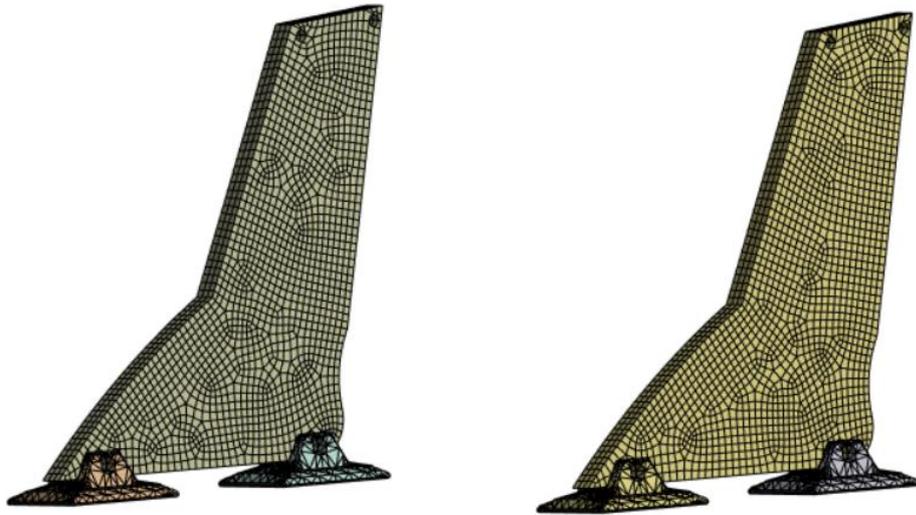


Рисунок 3.2.2. Конечно-элементная модель до оптимизации.

После получения сетки необходимо задать граничные условия и нагрузки. Нижние грани опор, к которым крепятся кронштейны, жестко заделаны – запрет на перемещения по всем степеням свободы. В качестве нагрузки покомпонентно задана *Remote Force*, которая является результирующей силой, действующей на крыло спойлера. Её значения см. табл.1. На рисунке 3.2.3 показаны примененные граничные условия и нагрузки.

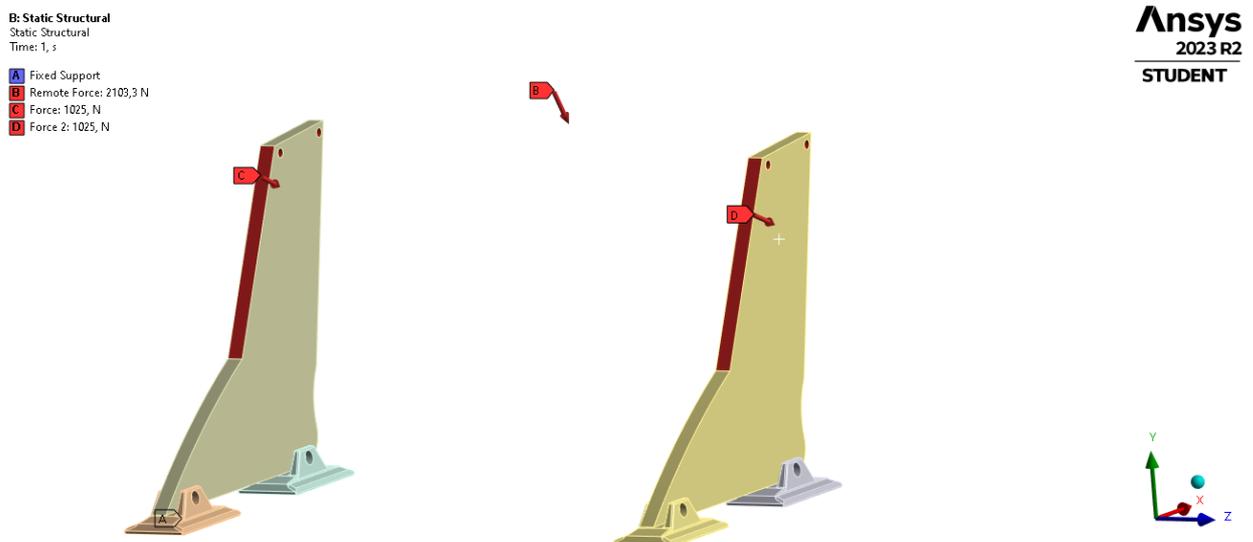


Рисунок 3.2.3. Граничные условия и нагрузки.

После завершения прочностного расчета были получены поля перемещений и напряжений, рисунок 3.2.4 и 3.2.5 соответственно.

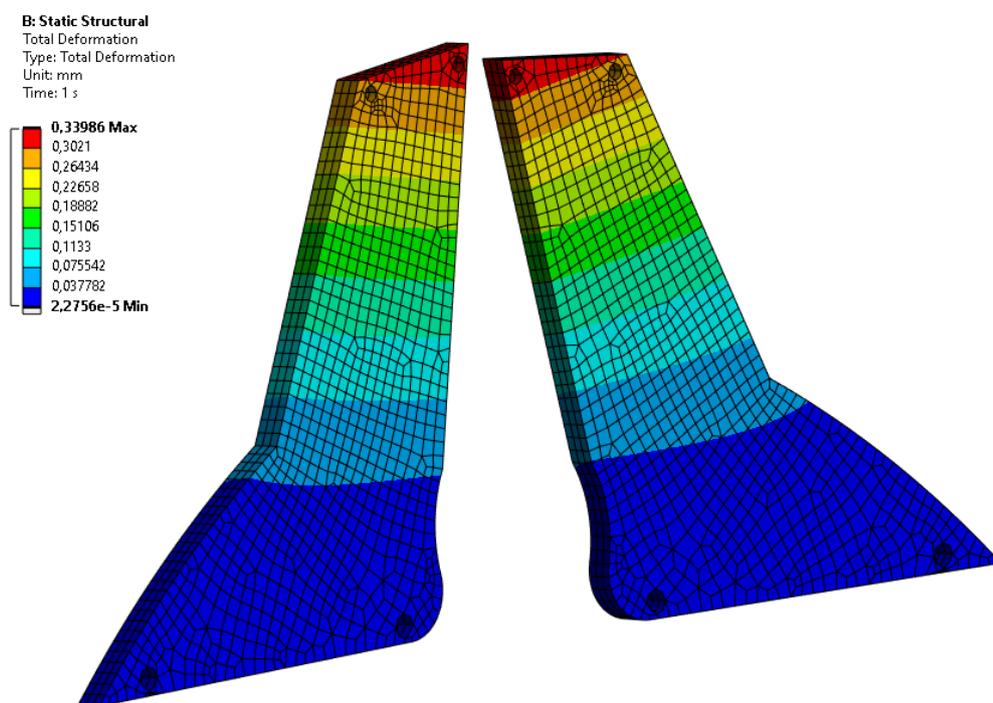


Рисунок 3.2.4. Поле перемещений алюминиевой модели.

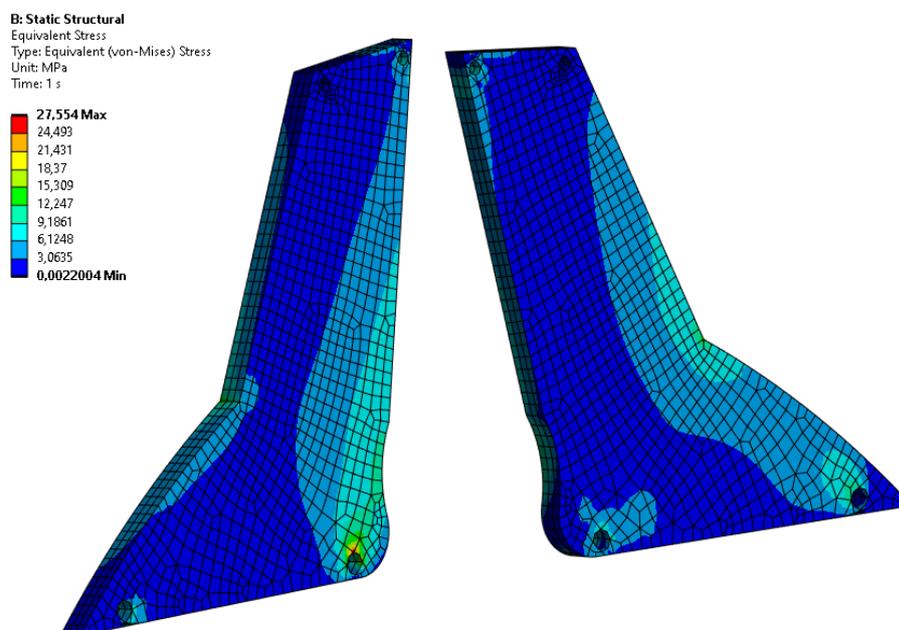


Рисунок 3.2.5. Поле напряжений алюминиевой модели.

Полученные результаты переносятся в модуль *Structural Optimization*, после чего выполняется топологическая оптимизация по алгоритму, описанному в постановке задачи.

На рисунке 3.2.6 показана полученная форма кронштейна, которую предлагается подготовить к созданию с помощью двух видов производств – аддитивного и традиционного.



Рисунок 3.2.6. Форма кронштейна после топологической оптимизации.

Результат, полученный в ходе проведения топологической оптимизации, состоит из *Facets* – поверхностей, которые образуют полое тело. Поэтому его нужно конвертировать в твердое тело, после чего геометрия приводится к более гладкому виду. На рисунках 3.2.7 и 3.2.8 изображены итоговые варианты геометрии для проведения верификационных расчетов.

Geometry



Рисунок 3.2.7. Геометрия кронштейна для аддитивного производства.



Рисунок 3.2.8. Геометрия кронштейна для традиционного производства.

В верификационных расчетах используется те же граничные условия и нагрузки, которые были применены к неоптимизированной модели кронштейна.

Полученные результаты применения аддитивного материала показаны в виде полей перемещений и напряжений на рисунках 3.2.9 и 3.2.10.

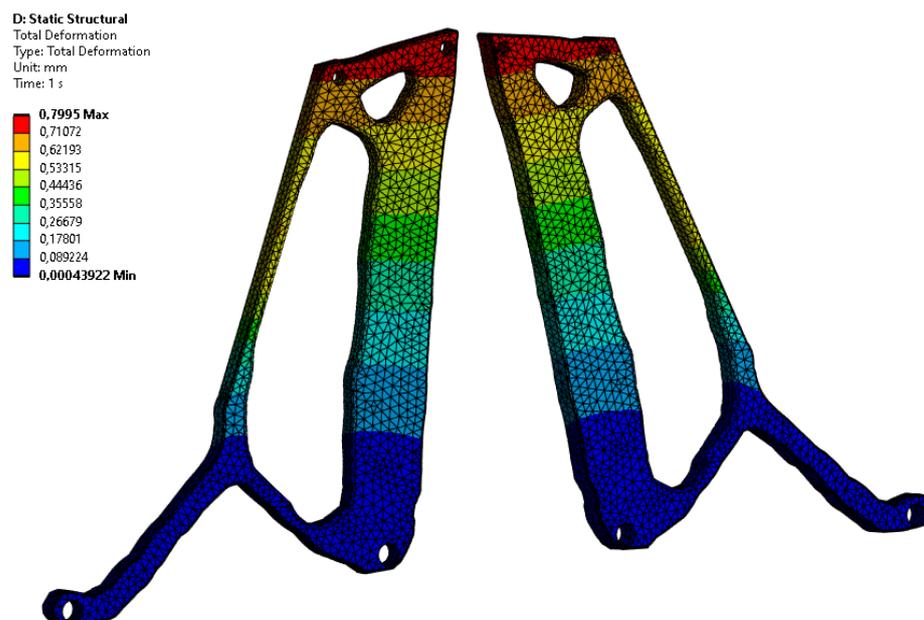


Рисунок 3.2.9. Поле перемещений оптимизированной модели из аддитивного материала.

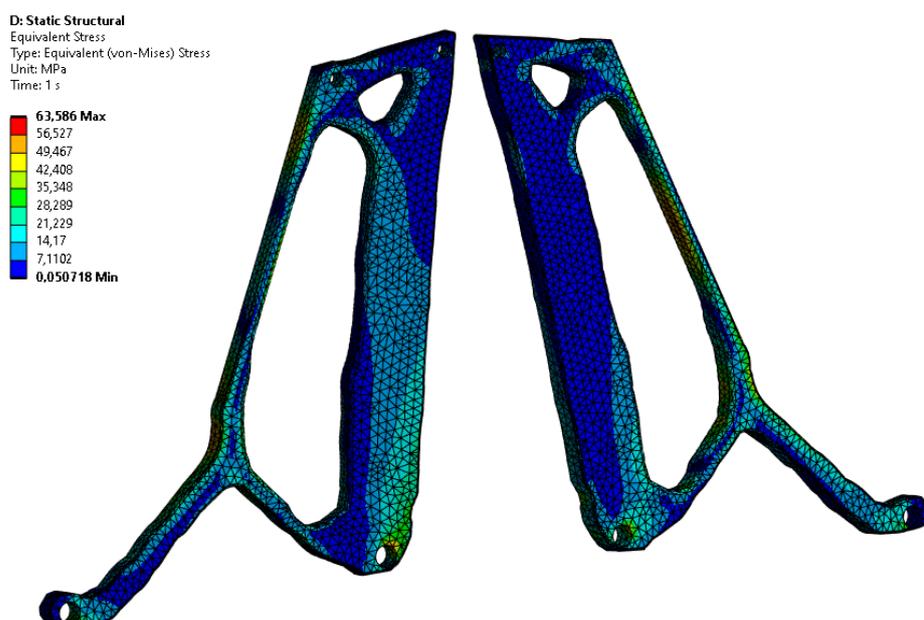


Рисунок 3.2.10. Поле напряжений оптимизированной модели из аддитивного материала.

Для кронштейна, изготовленного из традиционного материала, поле перемещений показано на рисунке 3.2.11, поле напряжений – рисунке 3.2.12.

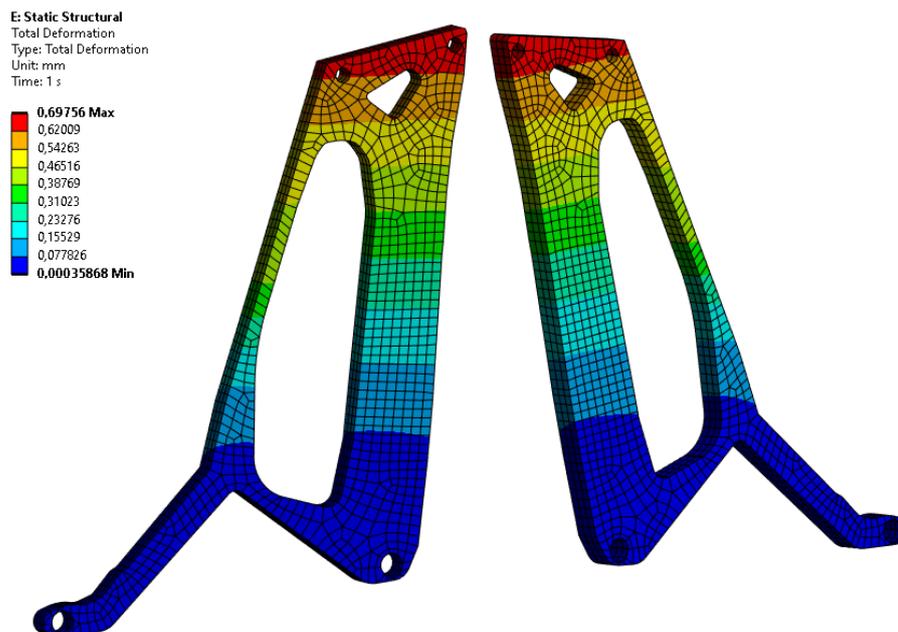


Рисунок 3.2.11. Поле перемещений оптимизированной модели из традиционного материала.

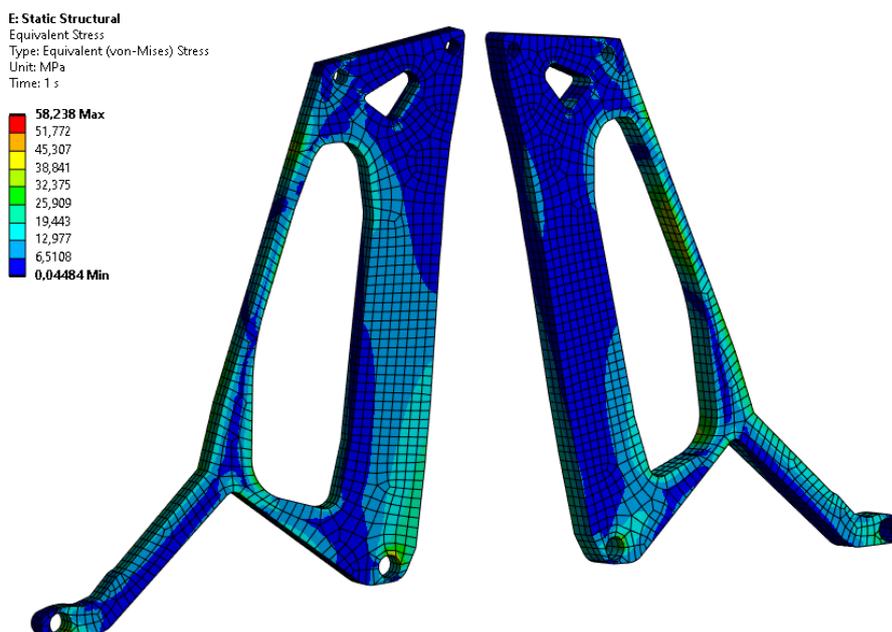


Рисунок 3.2.12. Поле напряжений оптимизированной модели из традиционного материала.

При сравнении результатов, полученных до оптимизации и после неё, можно сделать вывод, что максимальные перемещения возросли для обоих материалов. В случае аддитивного производства значение возросло на 45 мм, а в традиционном исполнении – на 35 мм.

Рассматривая поля напряжений видно, что максимальное значение при использовании аддитивного алюминия возросло в 2.3 раза, а для традиционного – в 2.1.

Массы оптимизированных моделей уменьшились по сравнению с изначальной моделью кронштейна. При этом кронштейн, сделанный из PC-553, на 165 г легче, чем вариант модели из АМгб.

Запас прочности, который определяется как отношение предела текучести материала к максимальному возникшему напряжению, уменьшился в обоих случаях: в аддитивном в 2.3 раза, а в традиционном почти в 5.5 раз.

В таблице 5 продемонстрированы значения описанных выше показателей.

Таблица 5. Числовые значения, полученные при рассмотрении алюминиевых сплавов.

Модель	Масса, кг	Максимальное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа	Запас прочности
До оптимизации	2.313	0.34	27.55	15.8
Аддитивная	1.035	0.79	63.59	6.8
Традиционная	1.200	0.69	58.24	2.9

### 3.2.2. Применение стальных сплавов

В этом пункте будут продемонстрировано решение задачи с применением сталей, механические свойства которых были описаны ранее см. табл.2.

Параметры предварительного прочностного расчета аналогичны представленному в пункте 3.2.1. Отличие заключается в использованном материале для кронштейнов – применяются 04Х19Н9, полученный аддитивными технологиями.

Далее демонстрируются полученное напряженно-деформированное состояние кронштейнов – поле перемещений на рисунке 3.2.13, поле напряжений на рисунке 3.2.14 – и результат процесса топологической оптимизации на рисунке 3.2.15.

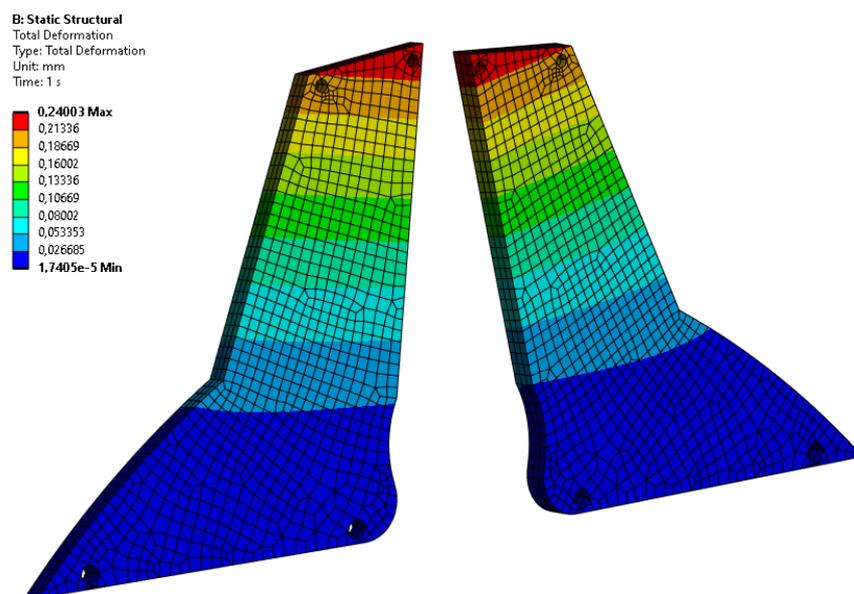


Рисунок 3.2.13. Поле перемещений до оптимизации.

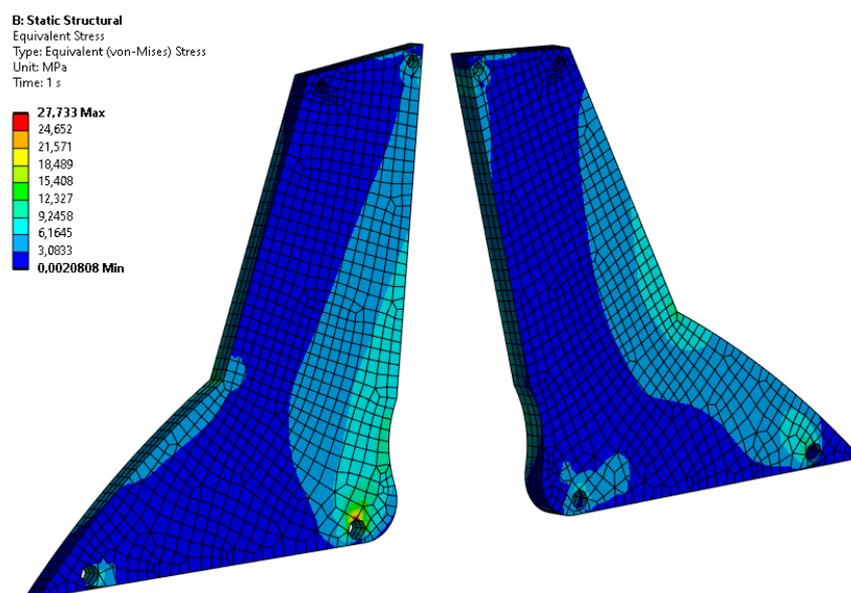


Рисунок 3.2.14. Поле напряжений до оптимизации.



Рисунок 3.2.15. Результат топологической оптимизации.

Полученная форма приводится к двум отдельным видам, удовлетворяющим технологические особенности производств. Итоговая геометрическая модель для аддитивной печати изображена на рисунке 3.2.16, для изготовления из традиционного стального сплава – на рисунке 3.2.17.

Geometry



Рисунок 3.2.16. Геометрия кронштейна для аддитивного производства из стали.



Рисунок 3.2.17. Геометрия кронштейна для традиционного производства из стали.

Напряженно-деформированное состояние определено в ходе верификационных расчетов для обеих моделей кронштейна. На рисунках 3.2.18 и 3.2.19 показаны поля перемещений для аддитивного и традиционного случаев соответственно, поля напряжений – на рисунках 3.2.20 и 3.2.21 .

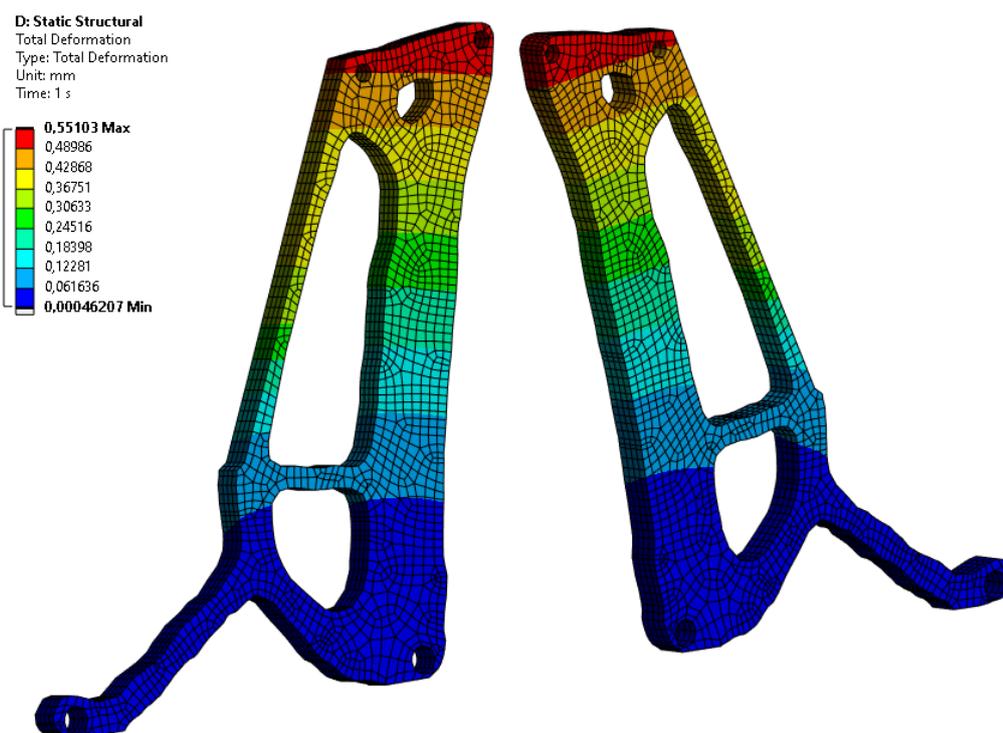


Рисунок 3.2.18. Поле перемещений оптимизированной аддитивной модели.

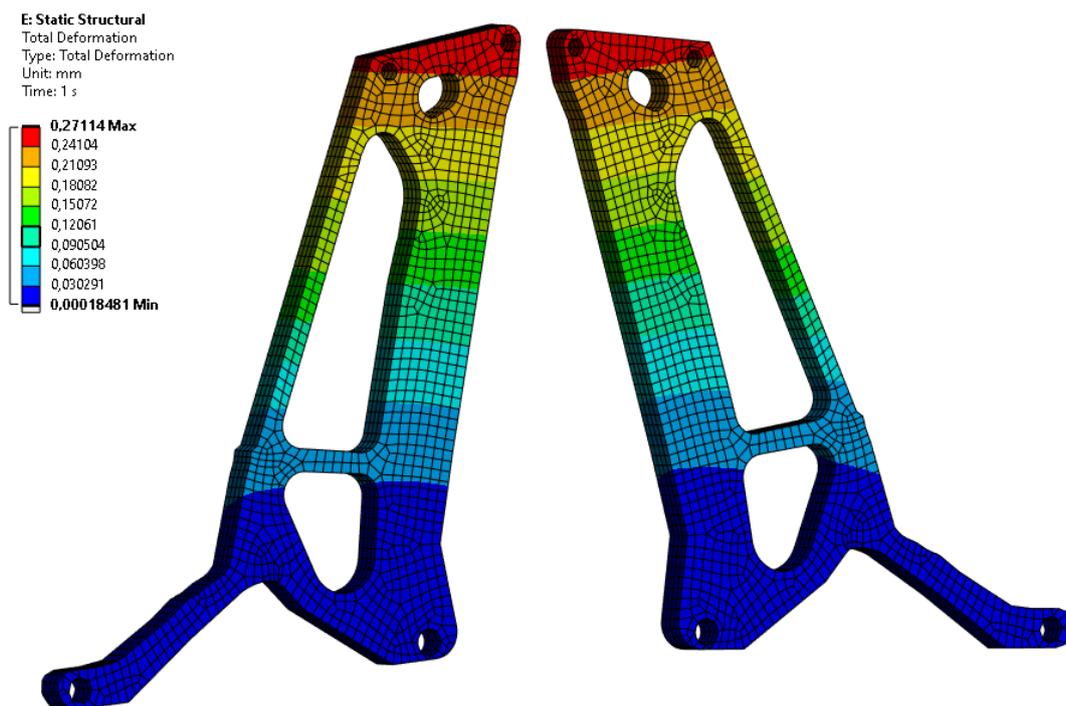


Рисунок 3.2.19. Поле перемещений оптимизированной традиционной модели.

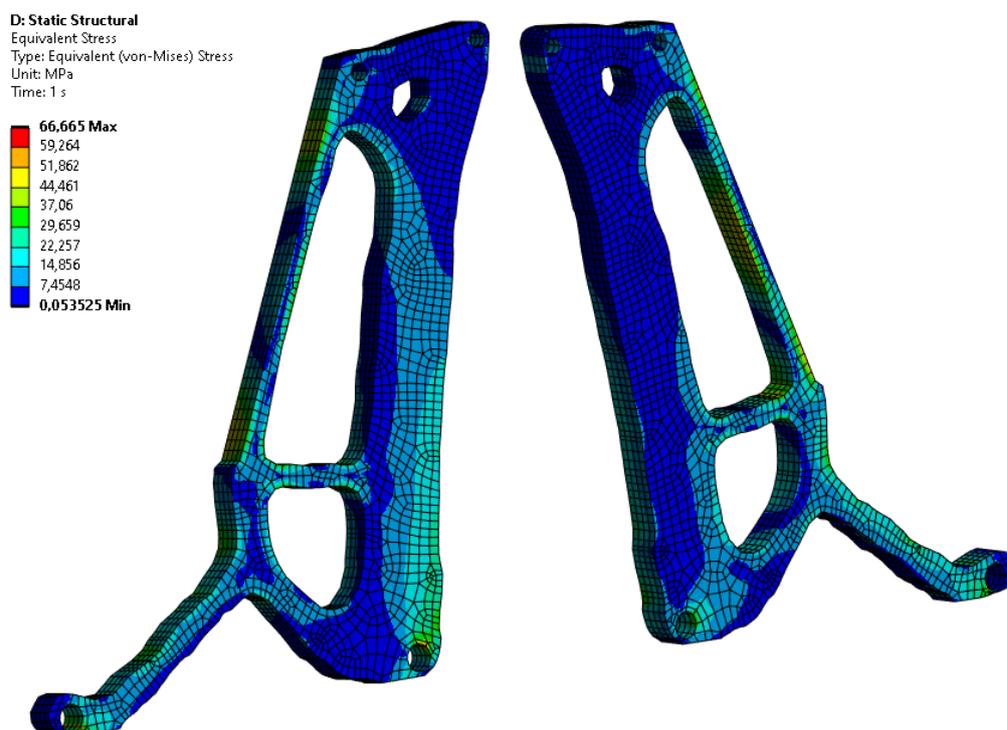


Рисунок 3.2.20. Поле напряжений оптимизированной аддитивной модели.

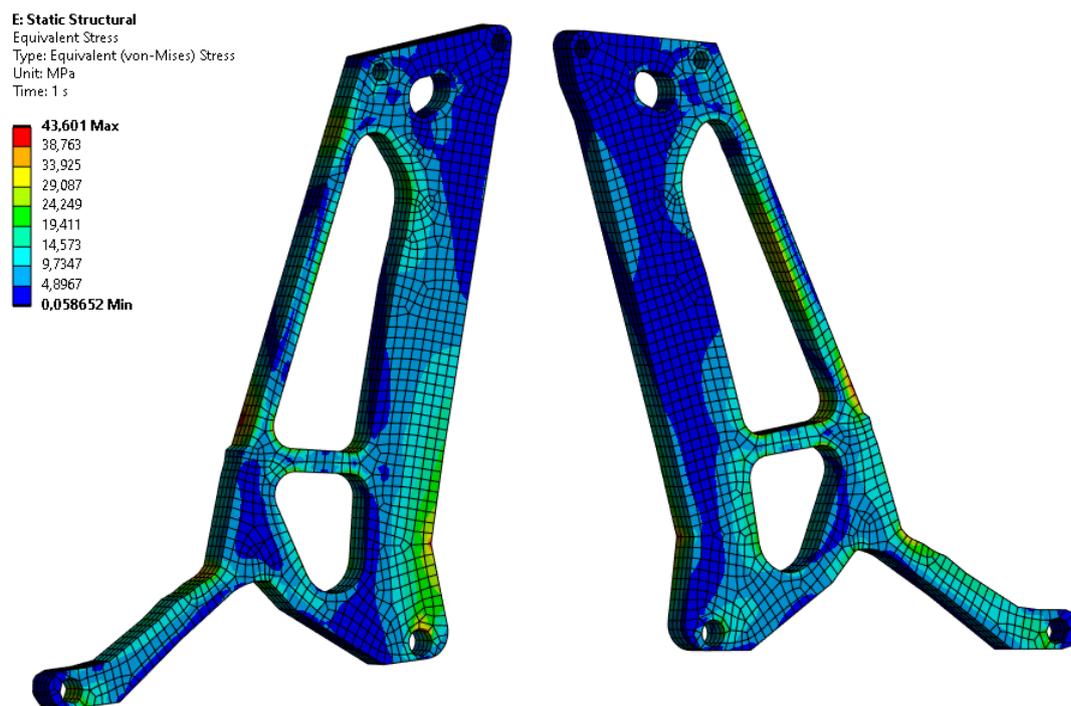


Рисунок 3.2.21. Поле напряжений оптимизированной традиционной модели.

Сравнения результаты проведенных прочностных расчетов, можно сказать, что максимальное перемещение в аддитивной модели увеличилось на 31 мм по сравнению с моделью до оптимизации. Для варианта традиционного материала этот показатель возрос на 0.03 мм.

Максимальные напряжения, возникшие в аддитивном исполнении детали, возросли в 3.2 раза в сравнении с изначальным значением, а в случае традиционной стали в 2.1 раз больше.

Масса модели для аддитивной печати уменьшилась примерно в 2.1 раз, а в сравнении с моделью, предназначенной для традиционного производства, она легче на 145 г.

Рассматривая показатели запаса прочности, можно сделать вывод, что при использовании аддитивной оптимизированной модели значение уменьшилось в 3.2 раза, а результат традиционного аналога уменьшился приблизительно в 5.6 раз.

Числовые значения, описанных выше показатели стальных деталей представлены в таблице 6.

Таблица 6. Числовые значения, полученные при рассмотрении стальных сплавов.

Модель	Масса, кг	Максимальное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа	Запас прочности
До оптимизации	7.324	0.24	20.73	25.8
Аддитивная	3.479	0.55	66.67	8.0
Традиционная	3.624	0.27	43.6	4.6

### 3.2.3. Применение титановых сплавов

Для решения задачи используются титановые сплавы, их свойства указаны в разделе см. табл.3.

Ход решения ничем не отличается от предыдущих двух пунктов. Разница лишь в том, что в первоначальном расчете на прочность используется материал ПТЗВ, применяющийся в аддитивной печати.

Напряженно-деформирование состояние, полученное в прочностном расчете изображено на рисунках 3.2.22 и 3.2.23.

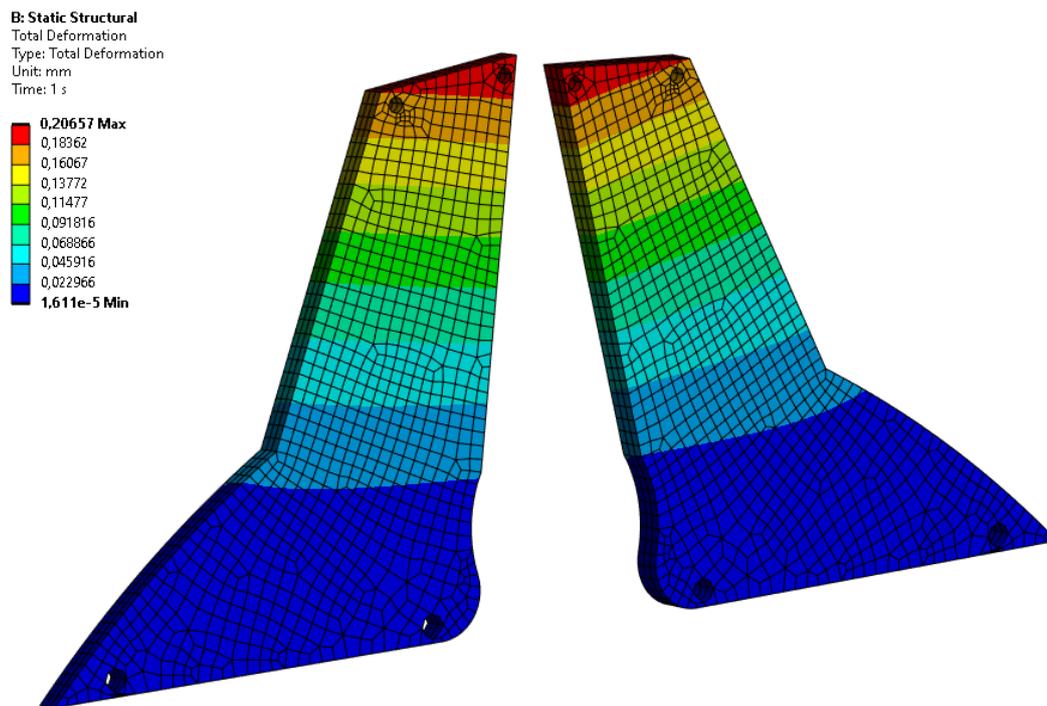


Рисунок 3.2.22. Поле перемещений неоптимизированного кронштейна из аддитивного титана.

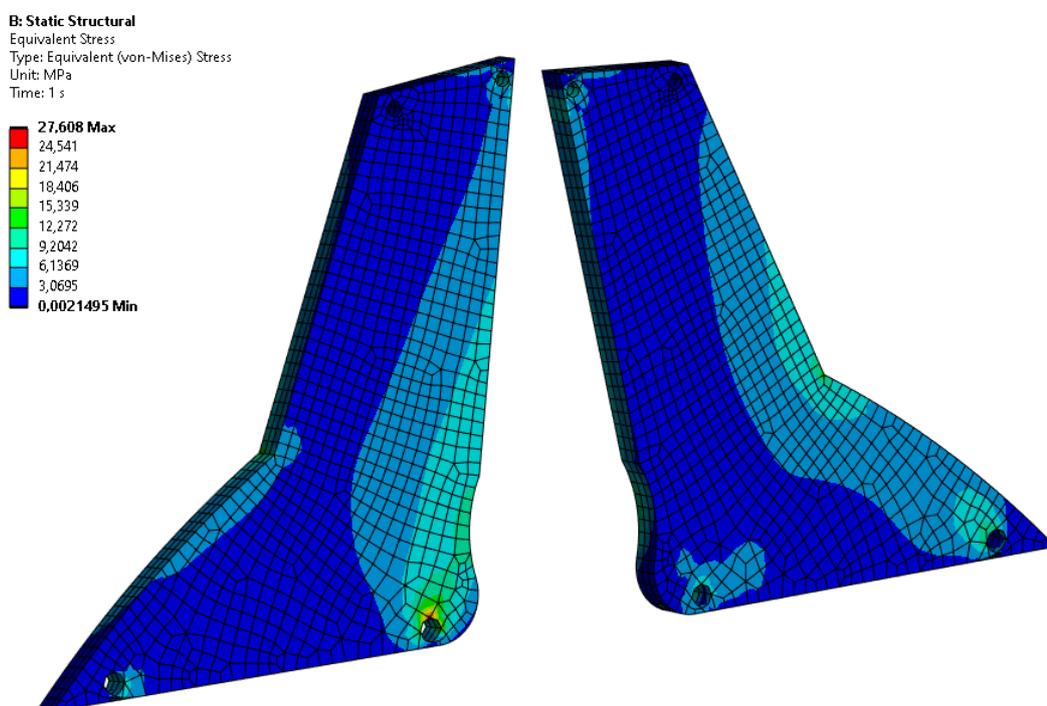


Рисунок 3.2.23. Поле напряжений неоптимизированной модели из аддитивного титана.

Топологически оптимизированная модель представлена на рисунке 3.2.24.



Рисунок 3.2.24. Форма оптимизированной модели.

Полученную форму кронштейнов необходимо привести к реализуемым в производствах видам. На рисунке 3.2.25 изображена готовая к аддитивному созданию геометрия, вариант для традиционного метода – на рисунке 3.2.26.



Рисунок 3.2.25. Готовая к аддитивной печати модель.



Рисунок 3.2.26. Готовая к традиционному производству модель.

Напряженно-деформированное состояние определено в ходе верификационных расчетов для обеих моделей кронштейна. На рисунках 3.2.27 и 3.2.29 показаны поля перемещений для аддитивного и традиционного случаев соответственно, поля напряжений – на рисунках 3.2.28 и 3.2.30.

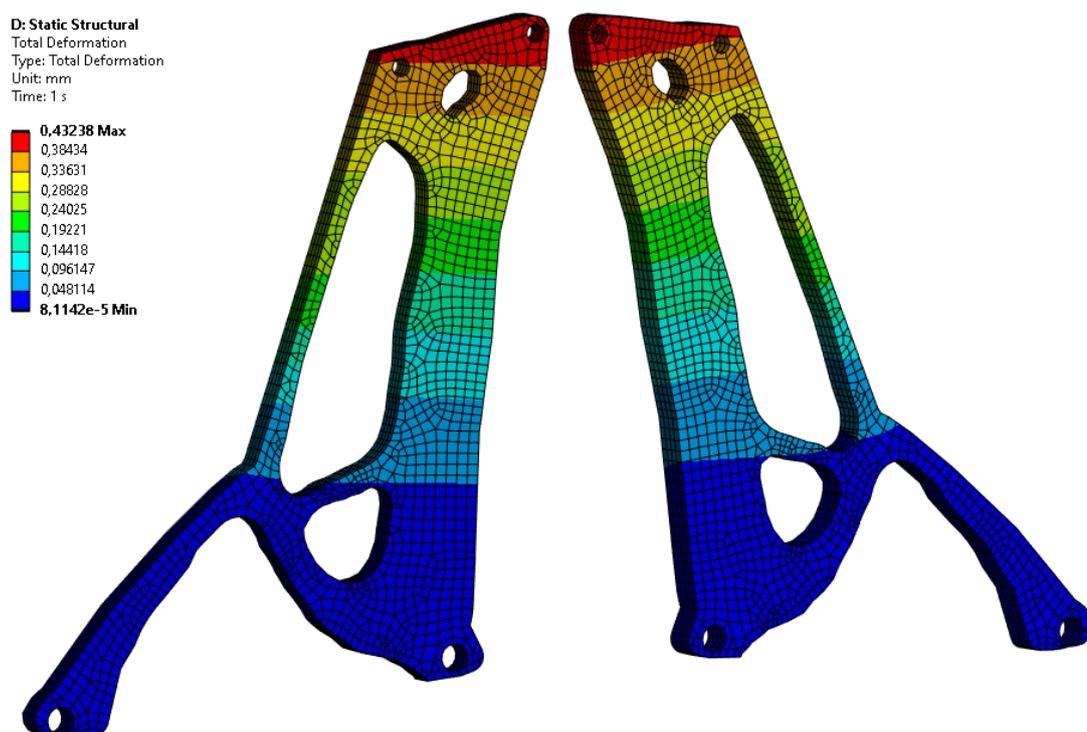


Рисунок 3.2.27. Поле перемещений оптимизированной модели из аддитивного титана.

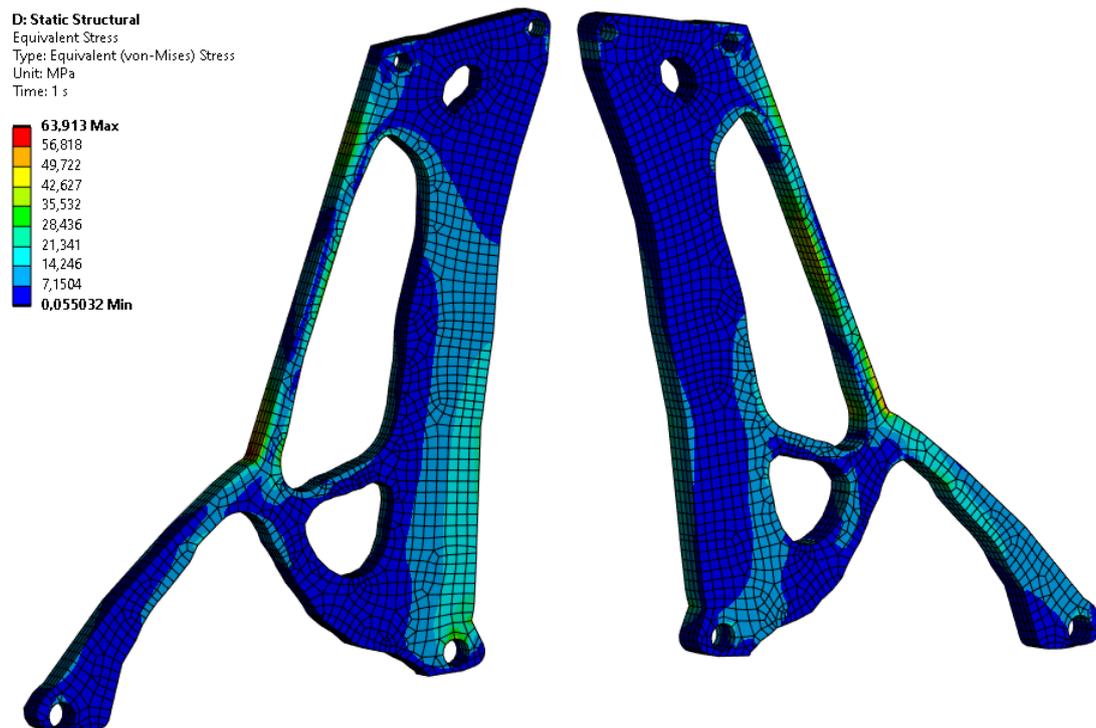


Рисунок 3.2.28. Поле напряжений оптимизированной модели из аддитивного титана.

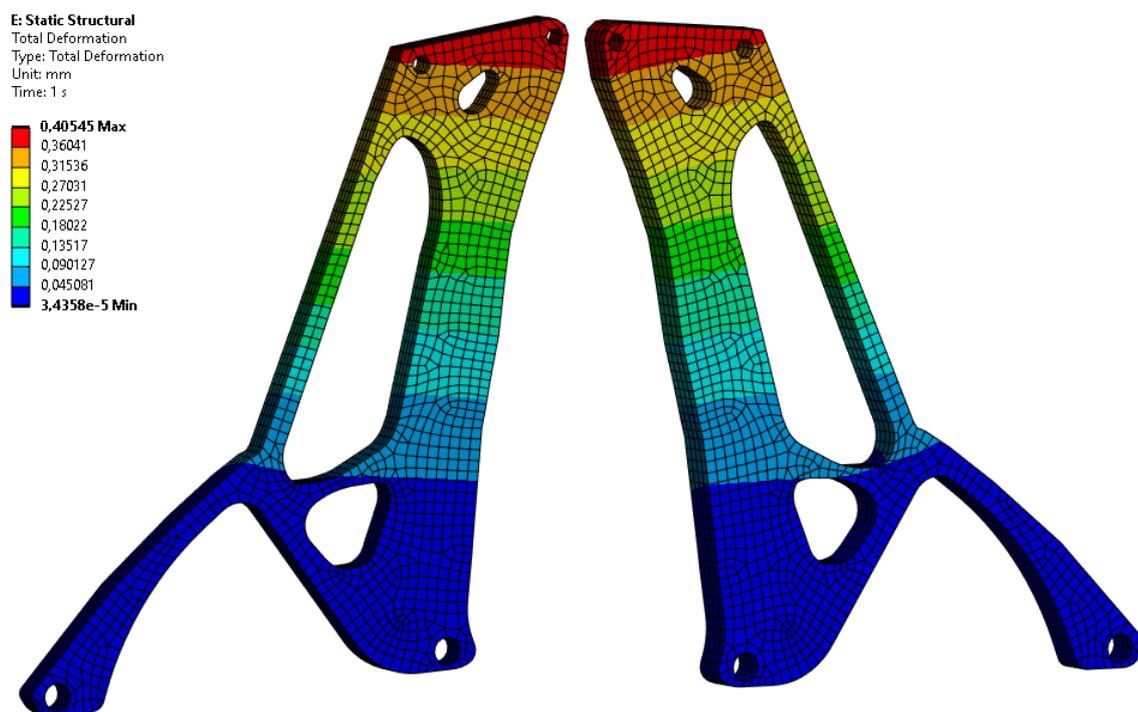


Рисунок 3.2.29. Поле перемещений оптимизированной модели из традиционного титана.

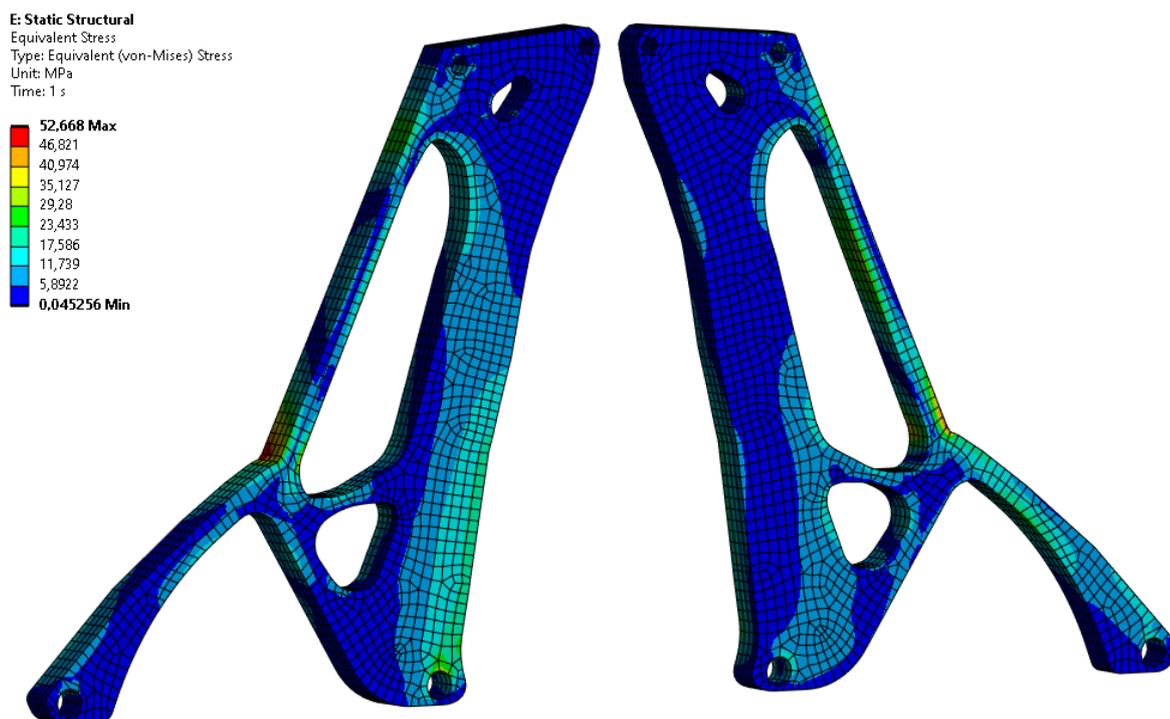


Рисунок 3.2.30. Поле напряжений оптимизированной модели из традиционного титана.

Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что максимальные напряжения наблюдаются на поверхностях отверстий. Значение, полученное для оптимизированной модели аддитивного титана, больше почти в 2.3 раза, чем было до оптимизации. Сравнивая модель с применением традиционного титана, максимальное напряжение увеличилось в 1.9 раз.

Максимальные перемещения в моделях аддитивной печати и традиционного производства по сравнению с неоптимизированным расчетом возросли на 22 мм и 20 мм соответственно.

Разница масс между аддитивным оптимизированным вариантом и его традиционным аналогом составляет 13 г. Деталь, полученная в процессе печати, будет легче, чем при механической обработке.

Сравнивая значения вычисленных запасов прочности, видно, что у аддитивной модели этот показатель стал меньше в 2.3 раза, а в случае традиционной – меньше в приблизительно в 2.8 раз.

Характеристики, которые были рассмотрены выше, представлены в таблице 7.

Таблица 7. Числовые значения, полученные при рассмотрении титановых сплавов.

Модель	Масса, кг	Максимальное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа	Запас прочности
До оптимизации	4.184	0.21	27.61	31.7
Аддитивная	2.078	0.43	63.91	13.7
Традиционная	2.091	0.41	52.67	11.2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы была проведена топологическая оптимизация модели кронштейна, результаты которой были адаптированы для изготовления с помощью механической обработки и создания аддитивными технологиями. Помимо этого, были проведены расчеты на прочность для шести материалов – трех традиционных и трех, использующихся в аддитивной печати.

По полученным полям напряжений оптимизированных моделей из материалов для 3D-печати можно сделать вывод о том, что значения напряжений возросли во всех трех случаях использования материалов, полученных аддитивными способами, по отношению к значениям напряжений неоптимизированного кронштейна, но не превышают значения своих пределов текучести. Напряжения, возникшие в оптимизированных моделях традиционных материалов, также возросли в сравнении с изначальными результатами. Характер возникших напряжений во всех расчетах на прочность схож, максимальные показатели наблюдаются в окрестностях цилиндрических отверстий.

Анализируя поля перемещений, можно сказать, что во всех оптимизированных моделях значения возросли. Это связано с тем, что после топологической оптимизации изменилось и уменьшилось заполнение изначального объема модели кронштейна, поэтому при тех же приложенных нагрузках возросло влияние на конечные элементы моделей.

Снижение массы кронштейнов влечет за собой снижение потребляемого топлива, что экономически выгодно владельцам автомобилей и благоприятно сказывается на экологии [3]. Масса моделей кронштейнов из аддитивных материалов меньше, чем масса традиционных аналогов, поэтому можно сделать вывод, что использование аддитивного подхода приведет к более эффективному расходу топлива и уменьшению выбросов газов в окружающую среду.

Ниже приведена сводная таблица (таблица 8) всех полученных результатов. Исходя из этих данных, можно сказать, что для изготовления кронштейнов наиболее подходящим материалом является алюминий аддитивного

производства, поскольку его применение демонстрирует меньшие значения максимальных напряжений, добавляемого веса к общей массе автомобиля.

Таблица 8. Значения полученных результатов.

Материал	Модель	Масса, кг	Максимальное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа	Запас прочности
Алюминий	До оптимизации	2.313	0.34	27.55	15.8
	Аддитивная	1.035	0.79	63.59	6.8
	Традиционная	1.200	0.69	58.24	2.9
Сталь	До оптимизации	7.324	0.24	20.73	25.8
	Аддитивная	3.479	0.55	66.67	8.0
	Традиционная	3.624	0.27	43.6	4.6
Титан	До оптимизации	4.184	0.21	27.61	31.7
	Аддитивная	2.078	0.43	63.91	13.7
	Традиционная	2.091	0.41	52.67	11.2

Анализ результатов показывает, что аддитивные технологии обладают рядом значительных преимуществ. Во-первых, они рациональнее используют предоставленный объем, поэтому детали имеют меньшую массу в таком случае. Во-вторых, аддитивное производство демонстрирует способность к значительному улучшению геометрии изделий, что позволяет достичь более сложных форм и конструкций, недоступных для традиционных методов. Еще одно важное преимущество аддитивного изготовления заключается в более равномерном распределении напряжений. Несмотря на то, что запасы прочности уменьшились, аддитивные модели демонстрируют большее значение этого показателя, чем в случае традиционных, поэтому кронштейны, изготовленные аддитивно, смогут выдержать большие значения нагрузок.

Нужно отметить, что на сегодняшний день интенсивно развиваются исследования в области аддитивного производства и материалов, используемых в 3D-печати. Специалисты постоянно работают над улучшением физико-механических свойств этих материалов путем их оптимизации и разработки новых составов. Кроме того, проводится множество испытаний, связанных с определением оптимальных методов аддитивных технологий и настройками параметров печати. Это позволяет добиться наилучших результатов, выражающихся высокими механическими свойствами и эффективностью производства.

Использование передовых материалов и постоянное улучшение процессов печати позволяют сегодня создавать детали с повышенными механическими характеристиками, что делает аддитивное производство еще более привлекательным для широкого спектра применений, от промышленности до медицины и авиации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витохин Е. Ю. Вычислительная механика: учеб. пособие / Е.Ю. Витохин. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 53 с.
2. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – СПб.: Изд-во политехнического университета, 2013 – 220 с.
3. Кулик В. И. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационных и ракетно-космической техники: учеб. пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 140-142.
4. Михальцов А. М. Технология литейной формы: учебно-методическое пособие / А.М. Михальцов. – Минск: БНТУ, 2011. – 109 с.
5. Терентьев Г. П. Технология изготовления металлических конструкций: учеб. пособие / Г.П. Терентьев, В.П. Пестряков; Нижегород. гос. архитектур.- строит. ун-т – Н. Новгород : ННГАСУ, 2016. – 52 с.
6. Андрюшкин А. Ю., Буцикин Е. Б., Ли Чжэньнин. Технологические подходы проектирования топологически оптимизированных деталей // Аэрокосмическая техника и технологии. – 2023. Т. 1, № 3. С. 102-114.
7. Овчаренко В. А. Влияние параметров SLM печати на структуру и механические свойства стали 03X17H14M3 / Томск: Изд-во ТПУ, 2023. — С. 374-376.
8. Рябов Д. К., Грушин И. А., Сеферян А. Г. Некоторые особенности формирования структуры и свойств новых алюминиевых материалов при аддитивном производстве // Станкоинструмент. – 2022. - №1. – С.44-50.
9. Chen L., Shen M.-H. H. A new topology optimization approach by physics-informed deep learning process // Advances in Science, Technology and Engineering Systems. – 2021. – Vol. 6, No. 4. – С.233-240.
10. ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002 г. – 9 с.
11. ГОСТ 23755-79. Плиты из титана и титановых сплавов. – Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1979 г. – 16 с.

12. ГОСТ 25054-81. Поковки из коррозионно-стойких сталей и сплавов. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1983 г. – 4 с.

13. Штромило И.В, Побелянский А.В. Молодежь. Техника. Космос // Балт. гос. ун-т. – Т.1. – 2019. - №56. – С. 219-224.

14. Порошки титановых сплавов. [Электронный ресурс]. URL:<https://region-prom.com/poroshki-titanovykh-splavov>. – (дата обращения 12.03.2024).

15. Технология изготовления изделий из металла: способы и этапы производства. [Электронный ресурс]. URL:<https://www.profbau.ru/blog/tehnologiya-izgotovleniya-izdeliy-iz-metalla>. – (дата обращения 25.04.2024).

16. Revolute Joint. [Электронный ресурс]. URL: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v232/en/wb\\_sim/ds\\_Joints\\_types\\_revolute.html?q=revolute](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v232/en/wb_sim/ds_Joints_types_revolute.html?q=revolute). – (дата обращения 03.05.2024).