Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Балтийский государственный технический университет

«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

**ОТЧЕТ**

**О НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

по теме:

Топологическая оптимизация кронштейнов механизма разворота блока балластной нагрузки

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Руководитель: | |  |  | | |
|  | |  | подпись | | |
| канд. техн. наук, доцент | |  | Евстафьев В.А. | | |
| ученая степень, ученое звание | |  | Фамилия И.О. | | |
|  | |  | « 24 » декабря 2018 г. | | |
|  | |  |  | | |
| Магистрант: |  | | |  | Буксар М.Ю. |
|  | подпись | | |  | Фамилия И.О. |
|  | | | « 24 » декабря 2018 г. | | |

Санкт-Петербург

2018 г.

**Содержание**

[Введение 3](#_Toc532505152)

[1 Постановка задачи оптимизации кронштейнов механизма разворота блока балластной нагрузки 4](#_Toc532505153)

[2 Описание методов топологической оптимизации 6](#_Toc532505154)

[2.1. *ESO*/*BESO* – метод 6](#_Toc532505155)

[2.2. *SIMP* – метод 9](#_Toc532505156)

[2.3. *ESO* – *SIMP* – метод 11](#_Toc532505157)

[3 Расчетная модель топологической оптимизации кронштейнов 12](#_Toc532505158)

[4 Результаты оптимизации 16](#_Toc532505159)

[Заключение 18](#_Toc532505160)

[Список использованных источников 19](#_Toc532505161)

# Введение

Темой научно-исследовательской работы является топологическая оптимизация (ТО) кронштейнов механизма разворота (МР) блока балластной нагрузки (ББН) космического аппарата (КА).

КА с ядерной энергетической установкой несет на борту полезную нагрузку. В то время, когда полезная нагрузка не задействована, требуется сбрасывать (утилизировать) потребляемую от ядерной энергетической установки электрическую мощность.

ББН КА предназначен для утилизации избыточной электроэнергии, вырабатываемой ядерной энергетической установкой. ББН преобразовывает электрическую энергию в тепловую и сбрасывает в космическое пространство.

ББН размещается на механизме разворота (МР). Т.к. конструкция МР ББН является массивной, то актуальным является вопрос уменьшения массы конструкции МР.

# Постановка задачи оптимизации кронштейнов механизма разворота блока балластной нагрузки

В работе [1] описаны назначение балластной нагрузки, конструкция МР ББН (рисунок 1), конструкции ее составных элементов, а также способ приведения конструкции МР ББН из транспортного положения в рабочее.

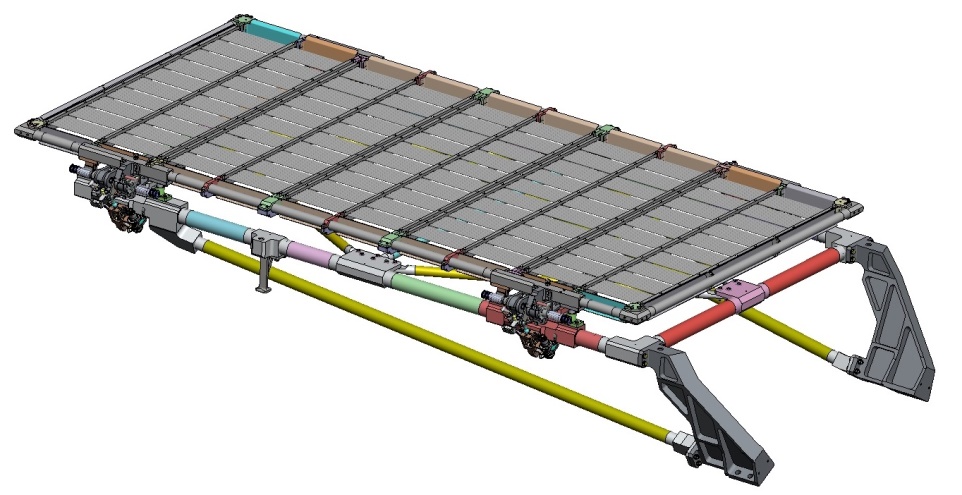


Рисунок 1 – Конструкция МР ББН

Из [1] известны массы элементов конструкции, а именно:

– масса рамы ББН: 46 кг;

– масса каркаса: 39,5 кг;

– масса узла разворота: 8,5 кг;

– масса МР ББН: 110,46 кг.

В связи с ростом энерговооруженности КА, возрастает масса КА, выводимых на околоземные рабочие орбиты. Все более актуальным становится вопрос создания изделий с высоким массовым совершенством. Решение данной проблемы связано с задачей поиска оптимальных геометрических параметров проектируемого изделия [2].

Оптимизация конструкции включает в себя тесно связанные, но различные по своей постановке и методам решения задачи:

– оптимизация формы и размеров;

– оптимизация топологии.

Оптимизация формы и размеров является простейшим видом оптимизации. Ее задачей является подбор оптимальных геометрических параметров конструкции. [3].

Понятие топологической оптимизации (ТО) будет дано в разделе 2.

Было выдвинуто предположение о возможности улучшения массовых характеристик конструкции МР ББН с помощью методов ТО. Объектом исследования стали кронштейны каркаса МР ББН (рисунок 2).

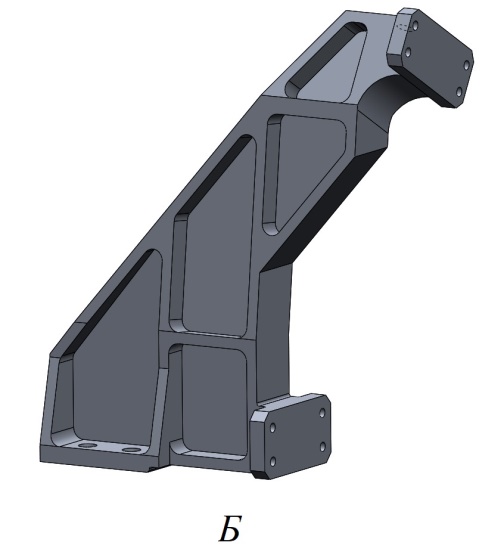
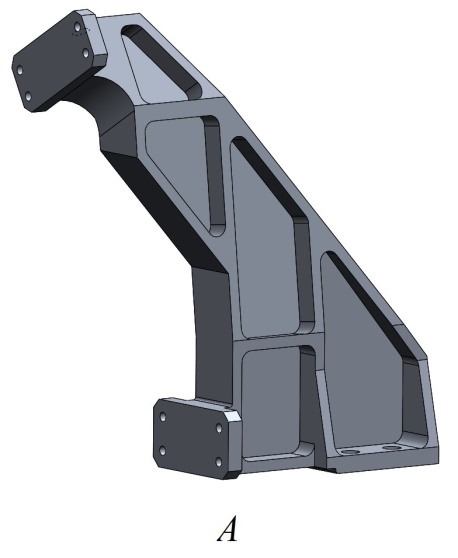


Рисунок 2 – Кронштейны каркаса МР ББН

А – левый кронштейн, Б – правый кронштейн

Целями научно – исследовательской работы являлись:

1. Изучение методов и алгоритмов ТО, используемых в различных программных пакетах.
2. Улучшение массовых характеристик конструкции с помощью методов ТО.

# Описание методов топологической оптимизации

Топологическая оптимизация– это оптимизация распределения материала в проектной области при воздействии на нее заданных нагрузок и использовании ограничений различного рода: геометрических, прочностных, жесткостных и др. Цель ТО – нахождение оптимального распределения материала в заданной области проектирования.

Особенностью задач ТО является то, что область проектирования известна заранее, и она фиксирована в процессе оптимизации, а переменной проектирования является сама форма.

В настоящие время ТО включена в модули большинства CAD/CAE – систем, таких как *Altair Hyper-Works*, *ANSYS*, *Catia*, *MSC Nastran*, *SolidWorks*.

Рассмотрим методы (алгоритмы) ТО, применяемые в различных программных пакетах.

## *ESO*/*BESO* – метод

Методы эволюционной оптимизации конструкций (*Evolutionary Structural Optimization* – *ESO*) и двунаправленной эволюционной оптимизации конструкций (*Bi-directional Evolutionary Structural Optimization* – *BESO*) интенсивно изучаются и развиваются в последние годы.

*ESO* метод классифицируется как метод жесткого уничтожения, который итерационно удаляет или добавляет конечное количество материала. *ESO* относительно прост в реализации, что является преимуществом для задач оптимизации топологии с участием сложных физических процессов.

Метод *ESO* основан на определении уровня напряжений в произвольной части конструкции методом конечных элементов. Индикатором неэффективного использования материала является низкий уровень напряжений (или деформаций) в той или иной части конструкции. В идеале уровень напряжений в конструкции должен быть одинаковым, близким к предельному, но безопасному значению. Из этой концепции следует принцип удаления материала, согласно которому недостаточно нагруженный материал может быть удален, что приводит к удалению отдельных элементов конечно-элементной модели [3].

Напряжения по Мизесу каждого элемента  сравниваются с максимальным или критическим значением напряжений Мизеса в конструкции . Если в результате анализа элемент удовлетворяет условию:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , |  |

где  – предельное значение (коэффициент отбраковки), то элемент удаляется.

Цикл анализа конечных элементов и их удаления повторяется для нескольких итераций с использованием одного и того же порогового отношения до достижения устойчивого состояния, т.е. отсутствия элементов, удовлетворяющих этому порогу удаления. После коэффициент отбраковки может быть изменен с помощью параметра , называемого коэффициентом эволюции:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

C увеличенным коэффициентом отбраковки, цикл производится до достижения нового стационарного состояния. Итерационный процесс продолжается, пока не будет достигнут желаемый результат.

Пример реализации данного метода можно найти в работе [4], в которой рассматривается оптимизация консольной рамы, нагруженной сдвигающим усилием (рисунок 3, *a* – *i*). Первоначальная конструкция представляет собой плиту заданных размеров. Оптимальное решение в виде двухстержневой рамы получено за 30 итераций, при значениях  = 1...30 %.

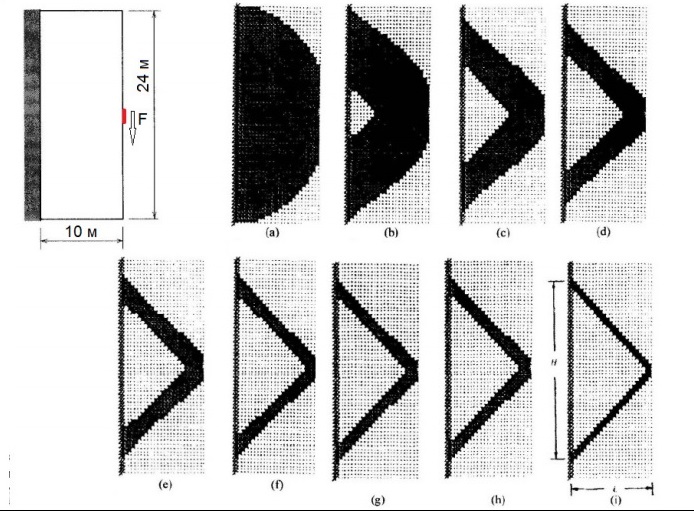


Рисунок 3 – Пример реализации метода *ESO*

Количественной оценкой изменения жесткости (или податливости) конструкции в результате удаления *i* – го конечного элемента является индекс чувствительности, определяемый для средней податливости как:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , |  |

где  – вектор узлового смещения *i* – го элемента;  – матрица жесткости элемента.

Функция чувствительности указывает на увеличение средней податливости в результате удаления *i* – го элемента, равной элементарной энергии деформации *i* – го элемента. Для минимизации средней податливости (т.е. максимизации жесткости) посредством удаления элементов необходимо исключать элементы с минимальным значением коэффициента чувствительности.

Удаление элемента производится присвоением его модулю нулевого значения, что приводит к его игнорированию при последующих итерациях. По мере удаления элементов в итерационном процессе число уравнений уменьшается, снижая вычислительную трудоемкость задачи.

Метод имеет существенный недостаток – удаленный на ранних итерациях материал, может быть полезен на последующих итерациях. Метод *ESO* не поозволяет его восстановить, поэтому в ряде случаев он не позволяет получить оптимальное решение. Данная проблема была решена в дальнейшем развитии метода – методе двунаправленной эволюционной оптимизации *BESO*.

Метод *BESO* позволяет одновременно удалять и добавлять материал в области проектирования. Принципиальное отличие данного метода от *ESO* заключается в том, что индекс чувствительности пустых элементов определяется путем линейной экстраполяции поля смещений, получаемого в результате конечно – элементного анализа. После этого заполненные элементы с минимальными значениями индекса чувствительности удаляются из структуры, а пустые элементы с наибольшими значениями чувствительности заполняются материалом. Количества удаляемых и добавляемых элементов на каждой итерации определены двумя независимыми друг от друга параметрами: отношением удаления *RR* и отношением включения *RI*.

Наиболее эффективно применение данных методов при оптимизации топологии непрерывных структур, т.е. при нахождении наилучшего размещения и геометрии пустот внутри области моделирования.

## *SIMP* – метод

*SIMP* – метод (*Solid Isotropic Material with Penalization*), или метод пенализации для твердого изотропного тела, – это метод ТО, основополагающая идея которого заключается в создании поля виртуальной плотности, представляющей аналог некоторой реальной характеристики объекта. *SIMP* – метод перераспределяет материал, уменьшая податливость конструкции. Результатом его использования является получение равнопрочного объекта в рамках рассматриваемой задачи.

В процессе оптимизации, область проектирования Ω также как и в предыдущем методе, дискретизируется с помощью конечных элементов. Свойства материала в этих областях зависят только от относительной плотности *xi*. Относительная плотность должна равняться 1 или 0 в расчетной области. Для ограничения промежуточной относительной плотности используется фактор отбраковки *p*.

Отношение между модулем упругости и относительной плотностью записывается как:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , |  |

где *E0* – модуль упругости материала, *xi* – относительная плотность *i* – го элемента, *p* - фактор отбраковки. Для численной устойчивости принимается:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , |  |

Относительные плотности элементов берутся в качестве расчетных переменных, а среднее значение выбирается, как целевая функция. Задача оптимизации топологии для минимального соответствия может быть записана следующим образом:









где целевая функция *С* определяется как среднее соответствие; *X* – вектор конструктивных переменных; *x*min и *x*max – минимальная и максимальная относительная плотность элементов соответственно; *F* – вектор нагружения; *U*– вектор глобального смещения; *K* – глобальный тензор жесткости; *k*i – тензор жесткости после интерполяции плотности; *k*0 и *u*i – тензор жесткости и вектор смещения узлов элементов; *V* – объем материала; *V*0 – начальный объем расчетной области; *f*0 – заданное объемное отношение.

## *ESO* – *SIMP* – метод

Данный метод гибридной топологии под названием *ESO* – *SIMP* нацелен на объединение рассмотренных ранее методов *ESO* и *SIMP*. При этом в качестве расчетных переменных берутся относительные плотности элементов, а в качестве целевой функции выбирается среднее соответствие. Разница между методами *ESO* – *SIMP* и *SIMP* – в ограничении объема. В процессе каждой итерации элементы, относительная плотность которых меньше или равна коэффициенту отбраковки, удаляются из области разработки, а все оставшиеся элементы вводятся в следующую итерацию. Общий объем всех оставшихся элементов *V* должен удовлетворять следующему условию:

.

Однако *V* не является реальным полным объемом оставшихся элементов , *V′* который выражается как:

.

Когда выполняется ограничение объема, реальный общий объем всех оставшихся элементов *V′* больше, чем *V*, из-за промежуточной относительной плотности, что является невыгодным для ТО. Таким образом, в процессе оптимизации должен контролироваться реальный общий объем всех оставшихся элементов *V′*.

# Расчетная модель топологической оптимизации кронштейнов

Расчет проводился в системе конечно-элементного анализа *ANSYS* в модуле *Topology Optimization*. Для расчета были использованы данные о перегрузках, действующих на конструкцию на различных этапах эксплуатации. Критерием оптимальности была выбрана масса (*Mass*). В качестве ограничений были выбраны производственное ограничение на минимальную толщину стенки (2 мм), и напряжения по Мизесу, возникающие в конструкции (от 50 до 200 МПа).

Исходные данные для расчета:

Материал кронштейнов: алюминиевый сплав Д16Т.

Плотность: ρ = 2780 кг/м3.

Модуль Юнга: *E* = 7,1∙1010.

Предел прочности: σв = 345МПа.

Предел текучести: σ0,2 = 245МПа.

Было принято допущение: изготовление кронштейнов осуществляется с помощью методов механической обработки.

ТО проводится для упрощенной модели кронштейнов, из которой были исключены все отверстия и пазы.

При построении сетки использовались метод *Tetrahedrons Patch Conforming* и функция *Sizing* [5]*.*

Схема проекта ТО показана на рисунке 4. Процесс оптимизации проводился в 3 этапа:

1. Прочностной расчет, определение напряжений, действующих в кронштейнах.

2. Оптимизация конструкции кронштейнов МР ББН.

3. Проверочный прочностной расчет полученной конструкции кронштейнов.

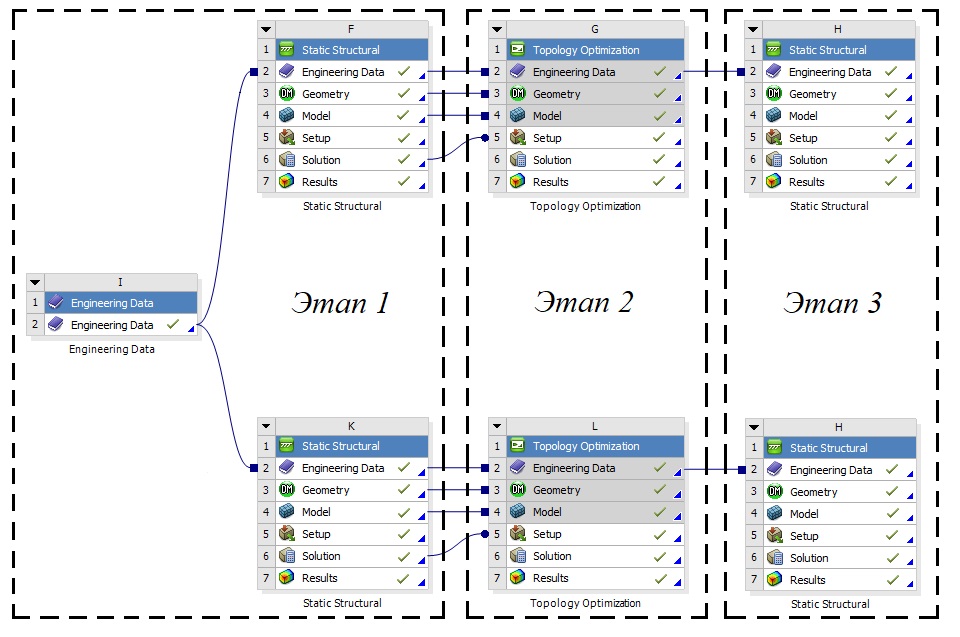


Рисунок 4 – Схема проекта ТО кронштейнов МР ББН

В работе [1] показано закрепление конструкции МР ББН на фланцах кронштейнов. Были определены реакции во фланцах на различных этапах эксплуатации. В соответствии с ними были приложены силы и моменты к фланцам (рисунок 5).

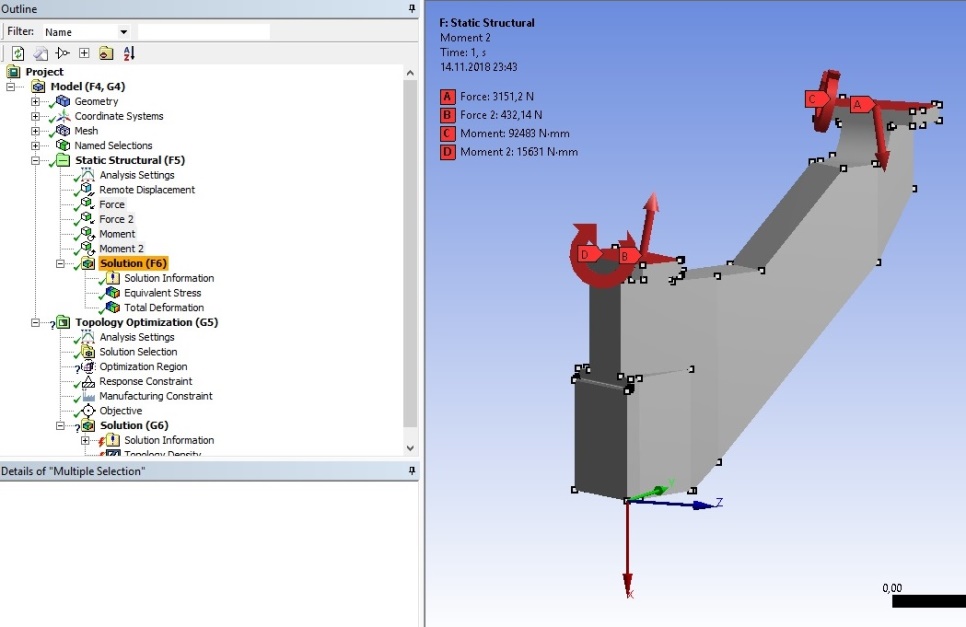


Рисунок 5 – Расчетная модель кронштейна на 1 этапе

На этапе 2 проводилась ТО конструкции кронштейнов. Напряжения, полученные при прочностном расчете на 1 этапе, были использованы в качестве исходных данных для расчета. Была задана расчетная область сетки, в которой осуществлялась оптимизация с помощью параметра *Optimization Region* (рисунок 6). Исключаемая из оптимизации область задается с помощью функции *Named Selection*.

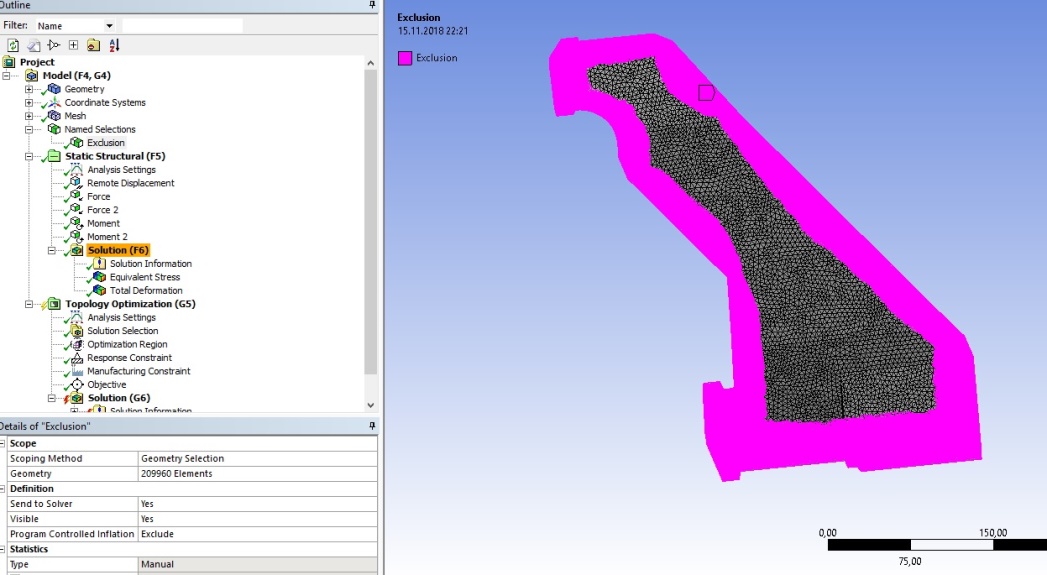


Рисунок 6 – Оптимизируемая область сетки

Также были заданы следующие параметры оптимизации:

*Objective*: *Mass, Minimize*.

*Response constraint*: *Global Von–Mises Stress*: 70 МПа.

*Manufacturing constraint*: *Min size*: 2 мм.

Результат оптимизации конструкции левого кронштейна для одного из этапов эксплуатации представлен на рисунке 7. Как видно из рисунка, алгоритм оптимизации удалил центральную часть кронштейна.

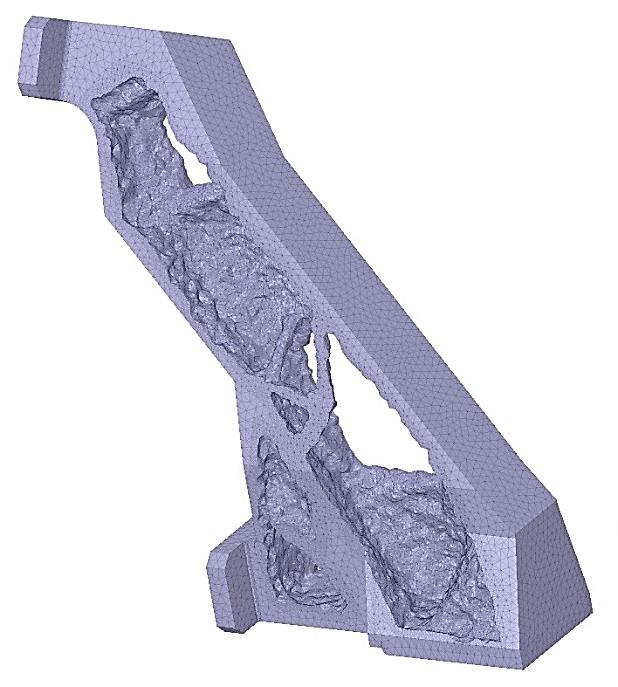


Рисунок 7 – Оптимизированная конструкция левого кронштейна

После завершения ТО полученные варианты конструкции для различных этапов эксплуатации были доработаны и адаптированы к изготовлению методами механической обработки.

На этапе 3 был проведен проверочный прочностной расчет оптимизированной конструкции кронштейнов.

# Результаты оптимизации

На рисунке 8 показана доработанная конструкция левого и правого кронштейнов.



Рисунок 8 – Кронштейны каркаса МР ББН

А – левый кронштейн, Б – правый кронштейн

В таблице 1 указаны массовые характеристики оптимизированной конструкции кронштейнов в сравнении с массовыми характеристиками штатной конструкции кронштейнов.

Таблица 1 – Сравнение массовых характеристик кронштейнов МР ББН

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Кронштейн А | Кронштейн Б | Σ |
| Масса штатного варианта конструкции кронштейнов, кг | 5,05 | 5,05 | 10,1 |
| Масса оптимизированного варианта конструкции кронштейнов, кг. | 3,91 | 3,91 | 7,82 |

Проведенные проверочные прочностные расчеты показали, что полученная конструкция кронштейнов МР ББН выдерживает действующие на нее нагрузки на различных этапах эксплуатации. Коэффициент запаса η0,2 = 1,2.

Применение методов ТО приводит к существенному уменьшению массы конструкции. При этом в результате адаптации конструкции кронштейнов для изготовления методами механической обработки в кронштейнах остались малонагруженные области, которые могли бы быть удалены при адаптации конструкции кронштейнов для изготовления с помощью аддитивных технологий. Масса конструкции кронштейнов МР ББН может быть снижена на величину до 23 %.

# Заключение

В ходе выполнения работы была проведена ТО кронштейнов МР ББН КА с ЯЭУ. Оптимизированная конструкция кронштейнов выдерживает нагрузки, действующие на нее на различных этапах эксплуатации. Суммарная масса кронштейнов была уменьшена на 23% и составляет 7,82 кг.

В целом, задачи, поставленные в работе, выполнены. Полученные результаты позволяют использовать данную конструкцию на следующих этапах проектирования.

# Список использованных источников

1. М.Ю. Буксар, В.А. Евстафьев, В.Ю. Серебренников Разработка и проверочный расчет конструкции механизма разворота блока балластной нагрузки космического аппарата // Молодежь. Техника. Космос: труды X Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. Т.1/ Балт. гос. техн. ун-т. – СПб.,; 2018. – с. 54-59.
2. Атамасов В.Д., Бабук В.А., Немыкин С.А., Романов А.В., Соколов Ю.А., Устинов А.Н. Ядерные орбитальные комплексы /Под ред. В.Д. Атамасова - СПБ.: ФГУП «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе», Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербургское отделение Академии космонавтики Российской Федерации им. К.Э. Циолковского, НИИ космических систем им. генерала А.А. Максимова, 2016.- 800 с., ил., цв. вкл.
3. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51 с. 51-61.
4. Шевцов С.Н. Методы оптимизации конструкций: курс лекций / Донск. гос. техн. ун-т. – Ростов н/Д, 2010. – С. 97
5. Основы работы в ПК ANSYS 16.0 / С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова, Н.Н. Федорова; Новосиб. Гос. Архитектур.-строит. Ун-т (Сибстрин). – Новосибирск 6 НГАСУ (Сибстрин), 2015. – 240 с.
6. D. Gunwant; A. Misra Topology Optimization of Sheet Metal Brackets Using ANSYS// MIT International Journal of Mechanical Engineering Vol. 2, No. 2, Aug. 2012, pp. (120-126)**.**