

ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖРД, ИЗГОТОВЛЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

О.Е. Бондаренко¹, С.Ш. Векилов¹, Ю.В. Ткачѳв¹, Р.А.Марчан²,

¹*Днепроуоский национальный университет имени Олеса Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепр, Украина*

²*FlightControl Propulsion, пр. Гагарина, 115, г. Днепр, Украина*

Аннотация. Сегодня ракетно-космические технологии выходят на новый уровень. Развитие аддитивных технологий и использование новых материалов для 3D-печати оказывают положительное влияние на отрасль в целом. На современном рынке ракетно-космической техники стремительно растет конкуренция, поэтому подавляющее большинство космических компаний (государственных и частных), таких как RocketLab, SpaceX, Firefly Aerospace, FlightControl Propulsion, BlueOrigin и другие, все чаще используют 3D-печатные изделия и детали. 3D-печать значительно ускоряет время производства некоторых изделий, что крайне необходимо при крупносерийном производстве. Кроме того, с развитием аддитивных технологий открылись большие возможности для создания нетипичных геометрических форм некоторых деталей. Аддитивные технологии имеют несколько методов производства (одним из таких методов является SLM (Selective Laser Melting), который был использован для изготовления оптимизированного кронштейна). В статье представлен принцип топологической оптимизации, на примере одного кронштейна. Приведена схема алгоритма при выполнении топологической оптимизации. Описан процесс топологической оптимизации, т.е. показан полный цикл. Приведен основной принцип метода SIMP. На основании полученного промежуточного результата проведен прочностной анализ (методом конечных элементов (МКЭ)) кронштейна до и после топологической оптимизации для различных расчетных случаев (осевая сжимающая нагрузка, квазистатическая перегрузочная нагрузка), где был определен окончательный вариант конструкции. Данная конструкция прошла ряд статических испытаний (в условиях реальной эксплуатации) и хорошо зарекомендовала себя в работе над изделием, где используется по назначению.

Ключевые слова: ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ, АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, КРОНШТЕЙН, LPRE-ENGINE, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

ОСОБЛИВОСТІ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРД, ВИГОТОВЛЕНИХ АДДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

О.Є. Бондаренко¹, С.Ш. Векілов¹, Ю.В. Ткачов¹, Р.А. Марчан²

¹*Дніпроуоский національний університет імені Олеса Гончара, пр. Гагарина, 72, м. Дніпро, Україна*

²*FlightControl Propulsion, пр. Гагарина, 115, м. Дніпро, Україна*

Анотация. На сьогоднішній день ракетно-космічна техніка виходить на новий рівень. Розвиток адитивних технологій та використання нових матеріалів для 3D-друку позитивно впливають на галузь в цілому. Дуже стрімко зростає конкуренція на сучасному ринку виробів ракетно-космічної техніки, тому значна більшість космічних компаній (державних та приватних), наприклад RocketLab, SpaceX, Firefly Aerospace, FlightControl Propulsion, BlueOrigin та інші все більше використовують 3D-друковані вироби та деталі. 3D-друк значно прискорює час виготовлення тих чи інших виробів, що вкрай необхідно при великому серійному виробництві. Також з розвитком адитивних технологій відкрились більші можливості для створення нетипових геометричних форм тих чи інших деталей. Адитивні технології мають декілька способів виготовлення (одним з таких способів є SLM (Selective Laser Melting), за допомогою якого було виготовлено оптимізований кронштейн). В роботі наведено принцип топологічної оптимізації, на прикладі одного кронштейна. Наведена схема алгоритму при виконанні топологічної оптимізації. Описано сам процес топологічної оптимізації, тобто показаний повний цикл. Приведено головний принцип SIMP-методу. На основі отриманого проміжного результату проведено міцнісний аналіз (з використанням методу кінцевих елементів (МКЕ)) кронштейна до і після топологічної оптимізації для різних розрахункових випадків (навантаження осью стискальною силою, навантаження квазистатичними перевантаженнями), де був визначений кінцевий варіант конструкції. Дана конструкція пройшла ряд статичних випробувань (в умовах реальної роботи) і успішно себе проявила в роботі на виробі, де і передбачалося цільове призначення.

Ключові слова: ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ, МІЦНІСТНИЙ АНАЛІЗ, МЕТОД КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ, КРОНШТЕЙН, РРД, АДДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ.

TOPOLOGY OPTIMIZATION FEATURES OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINE POWER ELEMENTS MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

O. Bondarenko¹, S. Vekilov¹, Y. Tkachov¹, R. Marchan²

¹*O. Honchar Dnipro National University, Gagarin Ave., 72, Dnipro, Ukraine*

²*FlightControl Propulsion, Gagarin Ave., 115, Dnipro, Ukraine*

Abstract. Today, rocket and space technologies are reaching a new level. The development of additive technologies and the use of new materials for 3D printing have a positive impact on the industry as a whole. Competition is growing rapidly in today's space rocket market, so the vast majority of space companies (public and private), such as RocketLab, SpaceX, Firefly Aerospace, FlightControl Propulsion, BlueOrigin and others, are increasingly using 3D printed products and parts. 3D printing significantly speeds up the production time of certain products, which is extremely necessary for large series production. Also, with the development of additive technologies, greater opportunities have opened up for the creation of atypical geometric shapes of certain parts. Additive technologies have several manufacturing methods (one such method is SLM (Selective Laser Melting), which was used to make an optimized bracket). The paper presents the principle of topological optimization, on the example of one bracket. The scheme of the algorithm when performing topological optimization is given. The process of topological optimization is described, i.e., the full cycle is shown. The main principle of the SIMP method is given. Based on the obtained intermediate result, the strength analysis (using the finite element method (FEM)) of the bracket before and after topological optimization for different design cases (axial compressive load, quasi-static overload load) was performed, where the final design variant was determined. This design has passed a number of static tests (in real operation) and has proven itself in the work on the product, where the intended purpose.

Key words: TOPOLOGICAL OPTIMIZATION, STRENGTH ANALYSIS, FINITE ELEMENTS METHOD, BRACKET, LPRE-ENGINE, ADDITIVE TECHNOLOGIES.

Введение

Стремительное развитие современной космической техники было бы невозможным без развития современных технологий разработки конструкций и производства. Развитие аддитивных технологий [1] позволило получать практически неограниченные по сложности формы деталей и раскрыло возможности, не доступные при использовании классических технологий производства. Применение генеративного дизайна [2] с использованием топологической оптимизации позволяет более эффективно и рационально использовать материал и создавать облегченные конструкции, которые будут удовлетворять требованиям прочности, надежности и устойчивости.

Топологическая оптимизация [3] является математическим подходом, способным решить ряд поставленных перед инженерами задач. Например, решается проблема оптимального распределения материала в ограниченном пространстве, с учетом воздействующих нагрузок и граничных условий. Данный метод

используется на стадии разработки первоначального вида конструкции. Полученное оптимальное решение затем модифицируется с учетом функциональных и технологических требований, что позволяет существенно сэкономить время на первоначальном этапе проектирования [4].

В работе представлены результаты внедрения аддитивных технологий SLM (Selective Laser Melting) [5] и топологической оптимизации, проведенной в компании FlightControl Propulsion [6] на примере реализации конструкции кронштейна ЖРД (см. рис 1). Схема нагружения данного кронштейна имитирует реальную силу, которая нагружает конструкцию (см. рис 2).

Сложность внедрения данной технологии обусловлена отсутствием статистических данных о применении SLM технологии при изготовлении элементов конструкции ЖРД, в частности, нет стандартов, регулирующих систему качества. Так же сложность представляет собой и то, что характеристики и качество

получаемых изделий напрямую зависит от множества факторов (самого принтера, качества порошка и т. д).

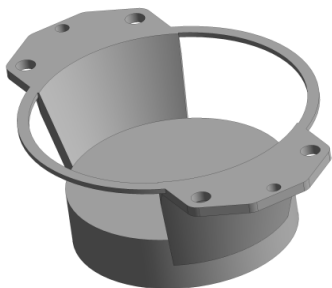


Рисунок 1 – Конструкция кронштейна до оптимизации

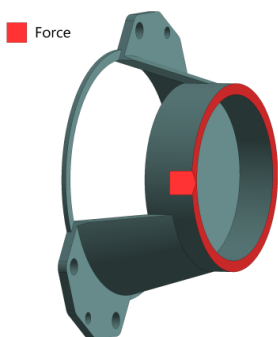


Рисунок 2 – Схема нагружения конструкции осевой сжимающей силой $T = 2500 \text{ Н}$

Цель работы

Целью данной работы является показать цикл получения оптимальной конструкции с помощью топологической оптимизации на примере такого элемента конструкции ЖРД как кронштейн. Данная проблема существует долгое время, поскольку проектирование кронштейнов задача сложная с точки зрения рационального использования материала в конструкции.

Постановка задачи исследований

Кронштейны являются важной частью конструкции РН. Они осуществляют передачу нагрузок. Их суммарная масса в конструкции РН может быть достаточно большой, потому минимизация массы кронштейнов в

конструкции РН и частности ЖРД является важной задачей.

Провести топологическую оптимизацию конструкции и достичь следующих результатов:

- минимизировать массу кронштейна;
- обеспечить достаточную прочность кронштейна.

Решение задачи, топологическая оптимизация конструкции

Общая схема процедуры разработки и производства конструкции (см. рис 3) с помощью топологической оптимизации [7]

Начальным этапом является построение начальной конструкции (пункт 1). Затем проводится её конечно-элементный анализ, в соответствии со схемой нагружения и граничных условий (пункт 2). Затем проводится топологическая оптимизация конструкции (пункты 3 – 6). Начальная конструкция представляется в виде набора вокселей.

На данном этапе используется SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) метод, или метод пенализации для твердого изотропного тела, – метод топологической оптимизации идея которого заключается в создании виртуальной плотности, представляющей аналог некоторой реальной характеристики объекта. То есть суть метода состоит в том, что достигается уменьшение податливости конструкции в результате перераспределения материала в рассмотренной области пространства при известных и заданных граничных условиях. Результатом использования является получение равнопрочного объекта в рамках рассматриваемой задачи.

На сегодняшний день SIMP-метод широко применяется во всём мире, а широкое применение получил данный метод именно в аддитивных технологиях (3D-печать), способных создавать конструкции необходимой геометрии. В качестве расчётной переменной рассматривается плотность материала.

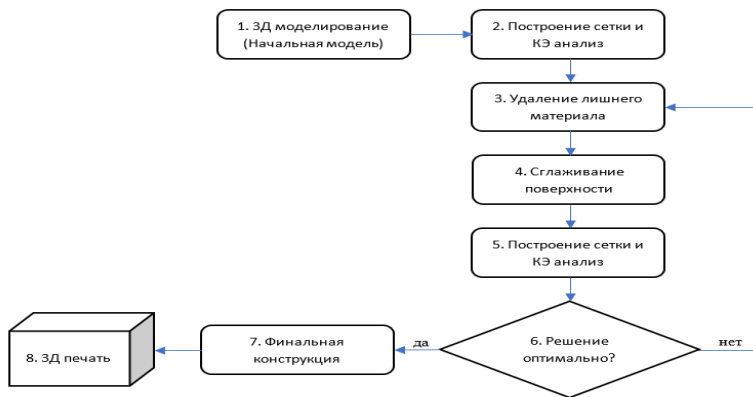


Рисунок 3 – Схема процедуры конструкции с помощью топологической оптимизации

Основополагающая часть SIMP – область проектирования Ω , которая определяется с помощью конечных элементов. Свойства материала постоянны в каждом из этих элементов и зависят от относительной плотности x_i . Относительная плотность должна быть равна 1 или 0 в расчетной области Ω после оптимизации. Для ограничения промежуточной относительной плотности используется фактор отбраковки p . Отношение между модулем упругости и относительной плотностью записывается как:

$$E(x_i) = E_{min} + (x_i)^p(E_0 - 1) \quad (1)$$

где E_0 – модуль упругости материала. Для численной устойчивости E_{min} принимается за $E_0/1000$, x_i – относительная плотность i -го элемента; p – фактор отбраковки.

Удаление вокселей происходит в соответствии с условием наименее вовлечённого в работу материала. После удаления лишнего материала происходит сглаживание полученной конструкции и проводится её КЭ анализ (пункты 4, 5). В дальнейшем идёт оценка оптимальности конструкции. Если условия минимума удовлетворяются, то полученная конструкция рассматривается как финальная, готова к 3Д печати и не требует дополнительных операций. В противном случае процесс оптимизации повторяется (пункт 3).

На данный момент топологическая оптимизация конструкции реализована в таких CAD-CAE пакетах как ANSYS [8] Discovery Live, Autodesk Inventor, Abaqus, TopOpt и так далее.

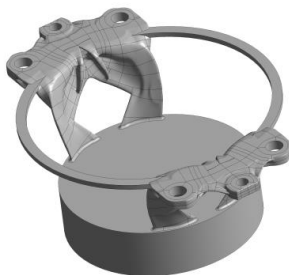


Рисунок 4 – Кронштейн после топологической оптимизации

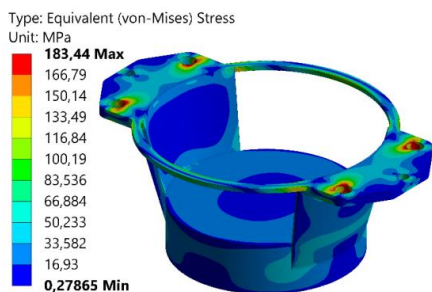


Рисунок 5 – Эквивалентные напряжения в конструкции кронштейна до оптимизации

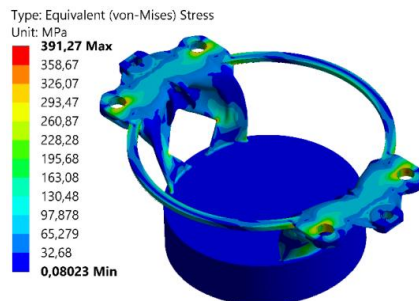


Рисунок 6 – Эквивалентные напряжения в конструкции кронштейна после оптимизации

В результате оптимизации удалось снизить массу конструкции на **51%** и при этом коэффициент запаса прочности составил больше 2, что соответствует

нормам прочности. Приведена сравнительная характеристика кронштейнов до и после оптимизации (см.табл.1).

Таблица 1 – Сравнение характеристик конструкций

Параметр	Исходная конструкция	Оптимизированная конструкция
Масса кронштейна	250 грамм	124 грамма
Максимальные Эквивалентные напряжения	183 МПа	391 МПа
Коэффициент запаса прочности	4.54	2.13

Научная новизна

В работе впервые представлены результаты топологической оптимизации опытных образцов кронштейнов, изготовленных методом селективного лазерного сплавления (SLM). Выявлены особенности применения технологии SLM для изготовления кронштейнов ЖРД, а именно:

- исследована возможность изготовления сложных геометрических форм, которые сложно или невозможно изготовить классическими способами;
- исследована возможность многосерийного изготовления деталей

Далее приведена финальная конструкция кронштейна (см. рис.4) после топологической оптимизации. Так же выполнен прочностной анализ исходной конструкции и полученной после оптимизации (см. рис.5, 6).

Выводы

В статье рассмотрена процедура топологической оптимизации конструкций РН на примере кронштейна ЖРД.

Представлена конструкция кронштейна до и после оптимизации, расчёт на прочность, оценка его работоспособности и анализ массы конструкции. Особое внимание уделено нагружению квазистатическими перегрузками.

В результате оптимизации удалось снизить массу конструкции на **51%** и при этом коэффициент запаса прочности составил больше 2, что соответствует нормам прочности. Так же важно, что конструкция готова к использованию и не требует дополнительных работ.

Применение топологической оптимизации несомненно имеет большой

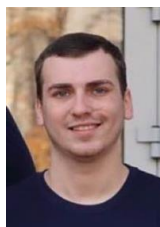
потенциал в отношении кронштейнов и прочих силовых конструкций ЖРД. Однако этот метод требует более тщательного изучения и наращивание экспериментальной базы.

Библиографический список

1. Bendsoe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*. 1989. V. 1, Iss. 4. P. 193-202. DOI: 10.1007/bf01650949
2. Jikai Liu, Yongsheng Ma. A survey of manufacturing-oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Software*, 2016 August. P. 161–175.
3. Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer, 2003. P. 271
4. Комаров А.А. Основы проектирования силовых конструкций. Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1965. С. 88
5. Direct Metal Laser Sintering или прямое лазерное спекание. URL: <http://cantouch.ru/blog/dmls/> (дата обращения: 27.03.2021).
6. FlightControl Propulsion. URL: <http://flightcontrolpropulsion.com/> (дата обращения: 21.02.2021).
7. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций. *Ученые записки ЦАГИ*, 2011, Т. XLII, № 2. С. 91–101.
8. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Нижний Новгород, 2006. С 118.

Поступило в редакцию 19.05.2021 г.

Сведения об авторах



Бондаренко Олег Евгеньевич
Украина
Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара
Аспирант
Сфера интересов – механика деформированного тела



Векилов Самир Шамсиевич
Украина
Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара
Аспирант
Сфера интересов – ракетные двигатели



Ткачѳв Юрий Валентинович
Украина
Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара
Заведующий кафедры космических информационных технологий, к.т.н, доцент
Сфера интересов – материаловедение, аддитивное производство



Марчан Роман Анатольевич
Украина
FlightControl Propulsion
Технический директор, к.т.н
Сфера интересов – ракетные двигатели