

# Облачная оптимизация топологии

## Cloud topology optimization

**Жихарев Л.А.**

Ассистент кафедры инженерной графики РТУ МИРЭА

e-mail: Zhabafrog@mail.ru

**Zhikharev L.A.**

Assistant, Department of Engineering Graphics, MIREA – Russian Technological University

e-mail: Zhabafrog@mail.ru

### **Аннотация**

В XXI в. развитие наук очень тесно связано с прогрессом в технической сфере, особенно в междисциплинарных областях. Это касается и геометрии, в сочетании с современными компьютерными технологиями позволяющей создавать форму с оптимизированной топологией. В рамках данной статьи проводится проверка возможностей современной программы по оптимизации формы деталей подвески Rocker-Bogie, используемой в марсоходах NASA на сегодняшний день. Полученные в ходе оптимизации детали подвергались статическому анализу и анализу на потерю устойчивости, которые показали значительное увеличение удельной прочности элементов подвески относительно их неоптимизированных аналогов.

Проверка осуществлялась при помощи продукта Autodesk Fusion 360. Был использован метод конечных элементов, позволяющий оптимизировать топологию удалением наименее нагруженных частей детали. Компьютерные расчёты велись при помощи распределённых вычислений.

**Ключевые слова:** оптимизация топологии, метод конечных элементов, удельная прочность, облачные расчёты.

### **Abstract**

In the XXI century, the development of Sciences is very closely linked with progress in the technical sphere, especially in interdisciplinary fields. This also applies to geometrics, which allows you to create a form with an optimized topology combined with modern computer technology. Within the framework of this work, the capabilities of a modern program to optimize the shape of Rocker-Bogie suspension parts used in NASA Rovers to date are being tested. The parts obtained during the optimization were subjected to static analysis and stability loss analysis, which showed a significant increase in the specific strength of the suspension elements relative to their non-optimized counterparts.

Verification was carried out using the Autodesk Fusion 360 product. The finite element method was used to optimize the topology by removing the least loaded parts of the part. Computer calculations were carried out using distributed computing

**Keywords:** topology optimization, finite element method, specific strength, cloud calculations.

В XXI в. развитие наук очень тесно связано с прогрессом в технической сфере, т.е. в основном научный прогресс нацелен на прикладное применение теоретических знаний. Особо явно это выражается в развитии междисциплинарных областей [1, 2, 3, 4]. Всё это актуально и для геометрии. В сочетании с развитием знаний в области сопротивления материалов и компьютерными технологиями, она позволила создавать форму с оптимизированной топологией, применение которой в прототипировании позволяет придавать деталям особые механические и термодинамические свойства [5, 6]. Оптимизация топологии даже при современном развитии компьютерной техники требует очень больших вычислительных мощностей

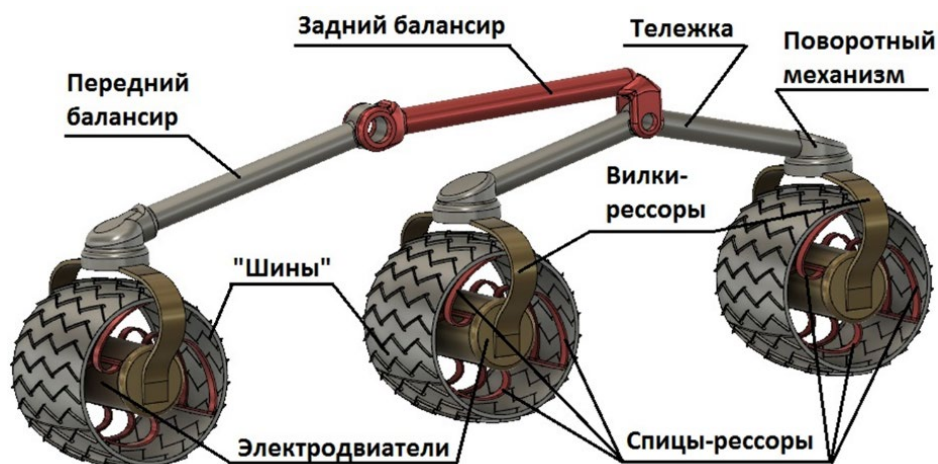
[7], поэтому целесообразным является использование распределённых облачных вычислений. Покажем возможности современных технологий в создании оптимизированной формы и оценим их эффективность на примере деталей, применяемых в космической технике.

Под оптимизацией топологии будем понимать определение количества, формы и распределения пустот в пределах определённой детали – оптимизируемой области, призванную предать изделию особые свойства – в нашем примере – повысить удельную механическую прочность относительно определенных нагрузок, под действием которых происходит эксплуатация изделия. Удельная прочность определяется как величина, равная отношению запаса прочности к массе объекта.

Существует множество алгоритмов оптимизации топологии. В рамках представленного на конференции доклада, сравнивался метод деформируемой сетки и метод конечных элементов. При оптимизации топологии, прежде всего, требуется определить геометрию распределения напряжений внутри детали при эксплуатации, что является задачей по решению дифференциального уравнения. Метод деформируемой сетки в общем случае сводится к прямому решению этого уравнения. Преимуществами такого подхода является возможность оптимизации при существенных деформациях изделия в процессе эксплуатации, однако, метод деформируемой сетки неоправданно сложен для оптимизации простых жёстких конструкций.

Оптимизация топологии методом конечных элементов сводится к линеализации дифференциального уравнения – приведением его к системе простых линейных уравнений. Данный подход более удобен при машинной обработке, кроме того, позволяет распределить вычисления между отдельными компьютерами, в частности, достаточно прост при адаптации к облачным расчётам. Линеализация осуществляется путём разбиения массива детали на большое число конечных элементов, обычно неправильных тетраэдров или кубов, после чего определяется набор сил, действующих на каждый элемент, и высчитывается напряжение в его пределах. Зная напряжение в каждом конечном элементе трёхмерной сетки, можно удалить наименее напряжённые части детали, тем самым избавившись от балласта и повысив общую механическую эффективность. Отметим, что такая оптимизация имеет ряд недостатков: например, она ухудшает способность детали выдерживать неучтённые нагрузки. Подробнее более сложные методы оптимизации топологии описаны в статье [8]. Тем не менее в отношении основного воздействия данный способ эффективен.

Получаемая в ходе оптимизации форма обычно оказывается крайне сложной для традиционных методов обработки материалов, так что требует применения более совершенных технологий, например таких, как 3D-печать. Это, в сочетании с вычислительными затратами, повышает конечную стоимость продукта, что делает оправданным применение оптимизированной формы только в сферах, требующих от деталей очень высокой удельной прочности при допустимости высоких цен. К таким сферам относится протезирование, военная авиация и космическая техника. Поэтому в качестве объекта оптимизации были выбраны элементы подвески Rocker-Bogie, применяемой в марсоходах НАСА [9, 10]. В последних представителях таких роботов элементы подвески имели форму полых титановых труб [11]. На рис. 1 представлена предложенная нами модель подвески, содержащая все основные элементы.



**Рис. 1.** Модель подвески Rocker-Bogie

На основе чертежей, иллюстрирующих компоновку деталей подвески марсохода при транспортировке и при эксплуатации, были определены границы, в рамках которых могут располагаться основные элементы. Это необходимо для задания области оптимизации.

Основная нагрузка, которую испытывают балансир и тележка подвески, это нагрузка на изгиб, так как ровер приземляется на поверхность Марса в разложенном состоянии, и в дальнейшем именно изгибающая сила действует на них, когда колёса упираются в грунт. Одновременно присутствуют также скручивающие нагрузки (рис. 2).



**Рис. 2.** Заготовки деталей подвески, подвергаемые оптимизации

Эффективность оптимизации возрастает с ростом числа конечных элементов, так как это позволяет более точно оценить распределение напряжения в пределах детали.

Процесс оптимизации осуществлялся в программе Fusion 360. Данный продукт не только обладает развитым функционалом 3D-моделирования, необходимым для создания моделей деталей подвески, но и позволяет осуществлять оптимизацию топологии, а также является единственной программой, доступной на отечественном рынке, предоставляющей доступ к облачным расчётам.

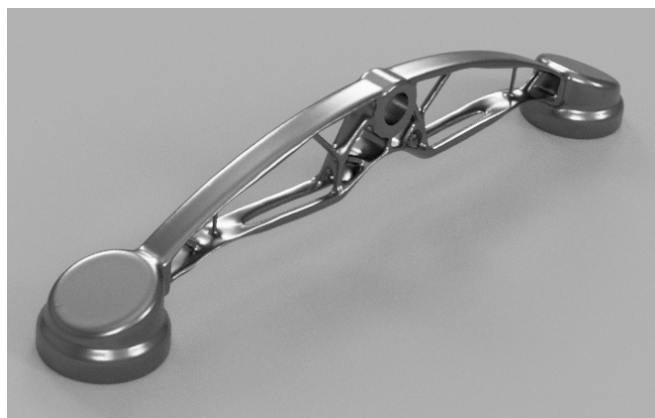
Форма заготовки была подобрана экспериментально. Она не является оптимальной, но приводит к хорошим результатам (рис. 2).

Твердотельные заготовки деталей разбивались на 3,5 миллиона тетраэдров каждая, что близко к программному пределу Fusion 360, после чего подвергались оптимизации на серверах Autodesk. Каждый пробный расчёт занимал в среднем от 8 до 12 часов.

Продукт такой оптимизации представляет собой массив из отдельных тетраэдров – Trian-Mash, при конвертации которых в твердотельную модель получается деталь с огромным количеством граней, постобработка и анализ которой практически невозможны. Обычно, подобная проблема решается созданием новой твердотельной модели вручную, однако, в нашем случае форма получилась достаточно сложной (рис. 3).



**Рис. 4.** Форма деталей после оптимизации



**Рис. 3.** Твердотельная модель детали

При помощи другой программы Autodesk Re Cur, удалось преобразовать Trian-Mash в Quad-Mash, что позволило автоматически создать поверхность, а затем и твердотельную модель (рис. 4).

Механические характеристики оптимизированных твердотельных моделей деталей подвески сравнивались с их неоптимизированными аналогами – трубками, которые применяются в марсоходах.

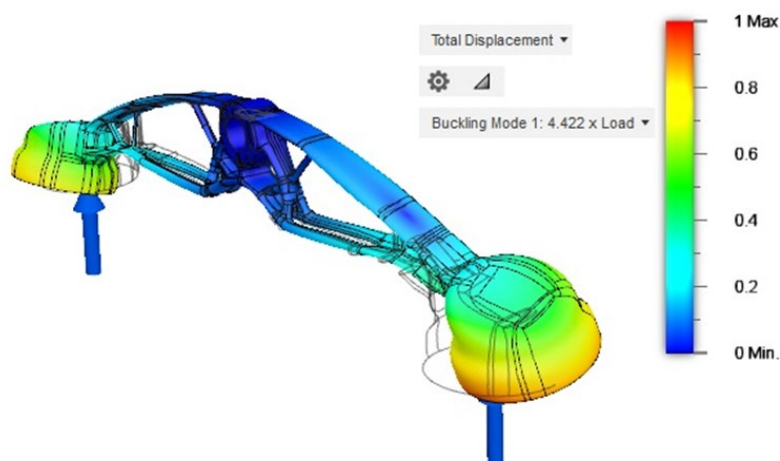
Определение запаса прочности велось при одинаковой массе (3 кг) и габаритах (1 м) сравниваемых деталей. Материал – Ti6Al4V, применяемый в 3D-печати. Каждая деталь подвергалась фиксированной нагрузке на изгиб – 900 Н, на изгиб в боковой плоскости – 300 Н, на скручивание – (50 Н\*м). Результаты представлены в табл. 1. Таким образом, оптимизирование топологии позволило увеличить запас прочности при действии основной нагрузки до 13,5 раз.

**Увеличение запаса прочности после оптимизации топологии, раз**

	Нагрузка на изгиб	Нагрузка на изгиб в боковом направлении	Нагрузка на кручение
Передний балансир	13,6	1,8	2,7
Задний балансир	10,2	1,3	2,8
Тележка	12,9	1,6	2,6

Отдельно стоит отметить, что жёсткость конструкции уменьшилась: предельный угол поворота при скручивании после оптимизирования топологии увеличился почти в 10 раз. В данном случае такое изменение можно использовать, совместив в деталях подвески функции рессоры.

Анализ на потерю устойчивости показал, что модифицированные детали выйдут из строя при отклонении колеса в сторону и скручивании. Тем не менее даже при таком сценарии разрушения предел прочности возрастает в несколько раз (рис. 5).



**Рис. 5.** Анализ на потерю устойчивости

### **Заключение**

Исследование прочностных характеристик полученных оптимизированных деталей позволяет сделать вывод о высокой эффективности такой оптимизации, а также открывает возможность дальнейшего модифицирования. Современные программы даже непрофессионального уровня способны достаточно эффективно решать задачу топологической оптимизации.

Возможную эффективность оптимизирования топологии можно повысить, если удастся более точно описать распределение нагрузок внутри сплошной детали. Существуют основания полагать, что силовые линии, как и многие предметы окружающего мира, наиболее точно можно описать при помощи фракталов. Это означает, что фрактальная геометрия может позволить создать самые совершенные силовые конструкции, что иллюстрируют исследования [12, 13, 14]. Именно с изучением фрактальных конструкций [15, 16] и их применимости в создании деталей высокой удельной прочности будут посвящены дальнейшие исследования.

## Литература

1. *Притыкин Ф.Н., Хомченко В.Г., Янишевская А.Г., Небритов В.И.* Визуализация линейных смещений узловых точек при реализации мгновенных состояний различных конфигураций руки андроида // Геометрия и графика. – 2019. – №3. – С. 51–59. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5dce6b81e2a808.81762326](https://doi.org/10.12737/article_5dce6b81e2a808.81762326)
2. *Маркин Л.В.* Дискретные геометрические модели оценки степени затененности в гелиоэнергетике // Геометрия и графика. – 2019. – №1. – С. 28–45. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5c9202d8d821b0.81468033](https://doi.org/10.12737/article_5c9202d8d821b0.81468033)
3. *Графский О.А., Пономарчук Ю.В., Холодилов А.А.* Геометрия электростатических полей // Геометрия и графика. – 2018. – №1. – С. 10–19. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5ad085a6d75bb5.99078854](https://doi.org/10.12737/article_5ad085a6d75bb5.99078854)
4. *Синицын С.А., Стребков Д.С., Панченко В.А.* Паркетирование поверхности параболического концентратора солнечного теплофотоэлектрического модуля по заданным дифференциально-геометрическим требованиям // Геометрия и графика. – 2019. – №3. – С. 15–27. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5dce6084f1ac94.09740392](https://doi.org/10.12737/article_5dce6084f1ac94.09740392)
5. Langelaar, Matthijs (2016). Topology Optimization of 3D Self-Supporting Structures for Additive Manufacturing. Additive Manufacturing. 12. 10.1016/j.addma.2016.06.010. DOI: 10.1016 / j.addma.2016.06.010
6. Li, Lei & Zhang, Guodong&Khandelwal, Kapil (2017). Topology Optimization of Energy Absorbing Structures with Maximum Damage Constraint. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 112. 10.1002/nme.5531. DOI: 10.1002/nme.5531
7. Liu, C., Zhu, Y., Sun, Z. et al. (2018). An efficient moving morphable component (MMC)-based approach for multi-resolution topology optimization. Struct Multidisc Optim 58, 2455–2479. doi:10.1007/s00158-018-2114-0
8. Xia, L., Xia, Q., Huang, X. et al. (2018). Bi-directional Evolutionary Structural Optimization on Advanced Structures and Materials: A Comprehensive Review. Arch Computat Methods Eng 25, 437–478. doi:10.1007/s11831-016-9203-2
9. Edgett, K.S., Yingst, R.A., Ravine, M.A. et al. (2012). Space Sci Rev. 170: 259. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9910-4>
10. Mars Microrover Power Subsystem. Jet Propulsion Laboratory (24 July 1997). URL: <https://mars.jpl.nasa.gov/MPF/roverpwr/power.html> (Date of access 16.01.2020)
11. Maurice, S., Wiens, R.C., Saccoccio, M. et al. (2012). Space Sci Rev 170: 95. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9912-2>
12. Rian I. M. FracShell: From Fractal Surface to a Lattice Shell Structure //Digital Wood Design. – Springer, Cham, 2019. – С. 1459–1479. –DOI: 10.1007/978-3-030-03676-8\_59
13. Rayneau-Kirkhope D., Mao Y., Farr R. Ultralight fractal structures from hollow tubes //Physical review letters. – 2012. – Т. 109, №20. – С. 204–301. –DOI: 10.1103 / PhysRevLett.109.204301
14. Rayneau-Kirkhope D. et al. Hierarchical space frames for high mechanical efficiency: Fabrication and mechanical testing //Mechanics Research Communications. – 2012. – Т. 46. – С. 41–46. –DOI: 10.1016 / j. mechrescom.2012.06.011
15. *Жухарев Л.А.* Фракталы в трехмерном пространстве. I-фракталы // Геометрия и графика. – 2017. – №3. – С. 51–66. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_59bfa55ec01b38.55497926](https://doi.org/10.12737/article_59bfa55ec01b38.55497926)
16. *Жухарев Л.А.* Фрактальные размерности // Геометрия и графика. – 2018. – №3. – С. 33–48. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5bc45918192362.77856682](https://doi.org/10.12737/article_5bc45918192362.77856682)