

# ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

## TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF OBJECT-BASED THREE- DIMENSIONAL MODELING

**D. Lukomsky**  
**A. Ripetsky**  
**S. Freilehman**  
**E. Petrakova**

*Summary.* The use of topological optimization tools at the design stage allows the engineer to quickly determine the theoretical appearance of the designed product of minimum weight on the basis of the results. This is ensured by the fact that the stage of finding the shape and design of the product is replaced by the process of its topological optimization. The use of additive manufacturing technologies changes the process of technological preparation, and, in contrast to the writing of the technological process on the basis of two-dimensional drawings of design documentation, is to compile a set of control commands (eg, G-code) based on the designed three-dimensional model of the product to control the 3D printer.

*Keywords:* optimization, modeling, three-dimensional model, topological optimization, object.

**Лукомский Дмитрий Константинович**

К.т.н., начальник сектора, АО «Корпорация «МИТ»;  
onion13@mail.ru

**Рипецкий Андрей Владимирович**

К.т.н., доцент, Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)  
a.ripetskiy@mail.ru

**Фрейлехман Станислав Александрович**

Инженер-конструктор 2 категории, АО «Корпорация  
«МИТ»; Аспирант, Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)  
Ordos121@yandex.ru

**Петракова Елена Валерьевна**

Генеральный директор, ООО «Easar»  
info@easarspace.com

*Аннотация.* Применение инструментов топологической оптимизации на этапе проектирования позволяет инженеру в кратчайшие сроки определить теоретический облик проектируемого изделия минимальной массы на основе полученных результатов. Это обеспечивается тем, что этап поиска формы и дизайна изделия заменяется процессом его топологической оптимизации. Применение аддитивных технологий производства изменяет процесс технологической подготовки, и, в отличие от написания технологического процесса на основе двумерных чертежей конструкторской документации, заключается в составлении набора управляющих команд (например, G-кода) на основе спроектированной трехмерной модели изделия для управления 3D-принтером.

*Ключевые слова:* оптимизация, моделирование, трехмерная модель, топологическая оптимизация, объект.

**Н**а этапе проектирования определяется целевое назначение будущего изделия, рабочие поверхности и окружение данного изделия, после чего создается расчётная модель в виде области поиска проектируемого дизайна изделия (рисунок 1).

Полученная твердотельная электронная модель изделия экспортируется в оптимизатор, задаются свойства исследуемого материала, прикладываются усилия и условия закрепления согласно схемам испытаний и эксплуатации, задаются условия оптимизации и проводится топологическая оптимизация изделия по результатам которой определяется искомый дизайн геометрии изделия (рисунок 2, а) или формируется готовая к производству деталь (рисунок 2, б)) [26, с. 27].

К достоинствам такого подхода к процессу проектирования можно отнести следующие:

- 1) Автоматизированное получение облика будущего изделия;

- 2) Получение оптимального распределения материала и пустот, и, как следствие, минимальное значение массы изделия, при условии обеспечения заданных прочностных требований;
- 3) Сокращение сроков разработки изделия и снижение уровня трудозатрат.

Однако, применение инструментов САПР с функцией топологической оптимизации имеет ряд особенностей, которые приводят к изменению «классических» методов технологической подготовки и производства [5, с. 59]. Из-за того, что изделия, полученные данным методом, обладают крайне специфическим дизайном геометрии и топологии в целом, их достаточно сложно (порой и невозможно) изготовить даже с применением передовых станков с ЧПУ [1, с. 16].

Для решения этой задачи используются инструменты аддитивного производства с применением 3D-принтеров на основе послойного нанесения материала. При-

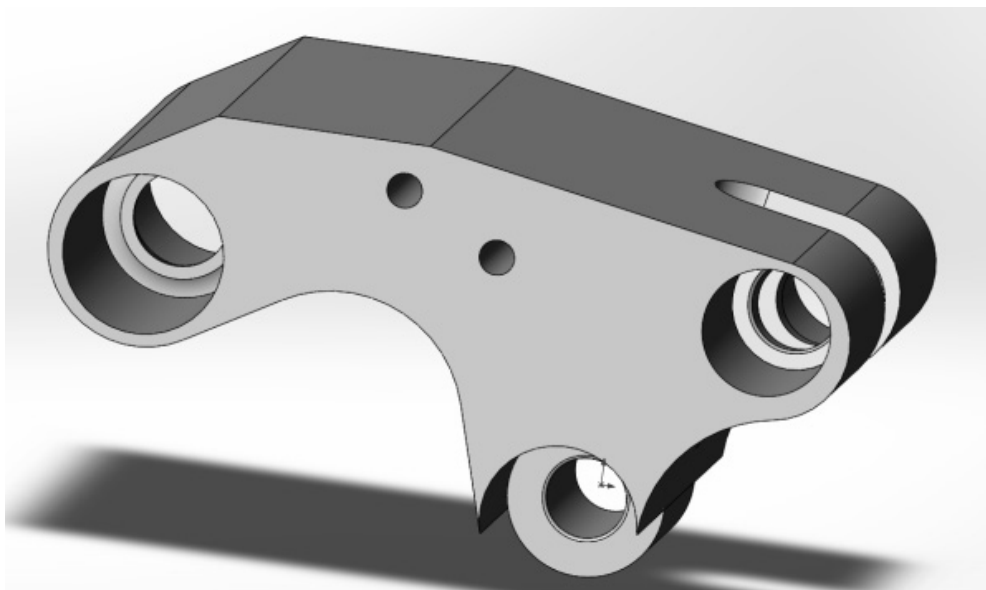


Рис. 1. Область поиска дизайна изделия

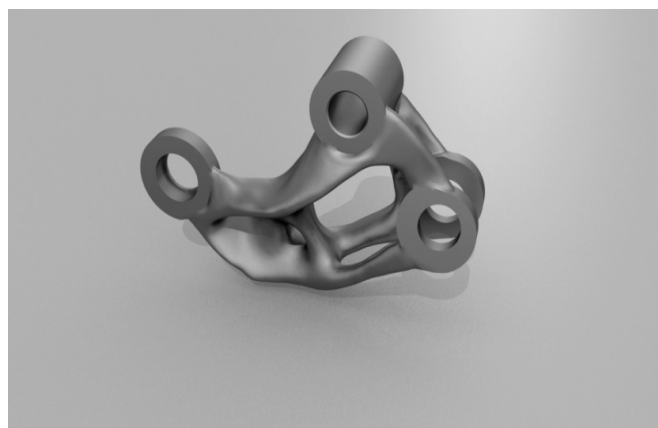
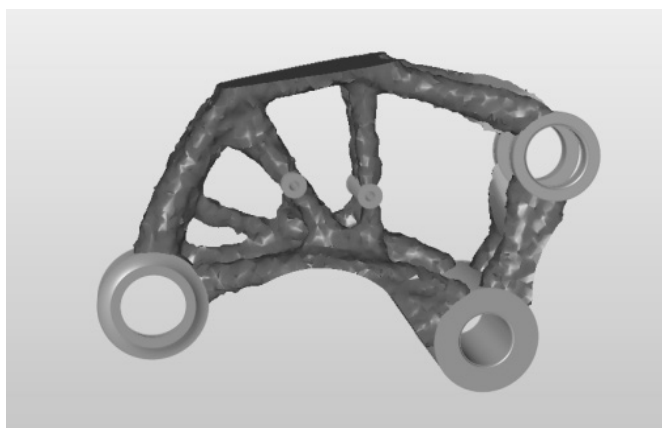


Рис. 2. Результат топологической оптимизации — (а), и изготовленная деталь — (б).

менение инструментов 3D-печати позволяет создавать изделия практически любой формы, что отлично дополняет инструменты топологической оптимизации [4, с. 44].

Проведенные исследования показали, что при изменении материала изделия отсутствует повторяемость результатов топологической оптимизации, что является специфическим свойством такого подхода к проектированию конструкций [3, с. 142].

При проектировании изделия с применением инструментов топологической оптимизации для последующего аддитивного производства замена материала влечет за собой серьезные изменения, как в конструкторской документации, так и в технологической документации,

а также в процессах технологической подготовки и производства [6, с. 225].

Такого рода явления были обнаружены в процессе решения задачи минимизации массы конструкции посредством применения инструментов топологической оптимизации. Исходная конструкция, представленная на рисунке 3, спроектированная для алюминиевого сплава 1201 имела массу 6,8 кг. Перед разработчиками стояла задача по созданию альтернативной конструкции массой не более 4 кг, выдерживающей те же эксплуатационные нагрузки.

Ниже в таблице 1 приведены свойства ряда металлов, чьи характеристики близки к свойствам порошковых металлов, применяемых в аддитивном производстве, кото-

Таблица 1. Свойства ряда металлов, близких по своим характеристикам порошковым металлам

Материал	Свойства		
	Е, ГПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_r$ , МПа
X18H10T	184	7920	274
BT6	123	4430	103
AL4	69	2650	196

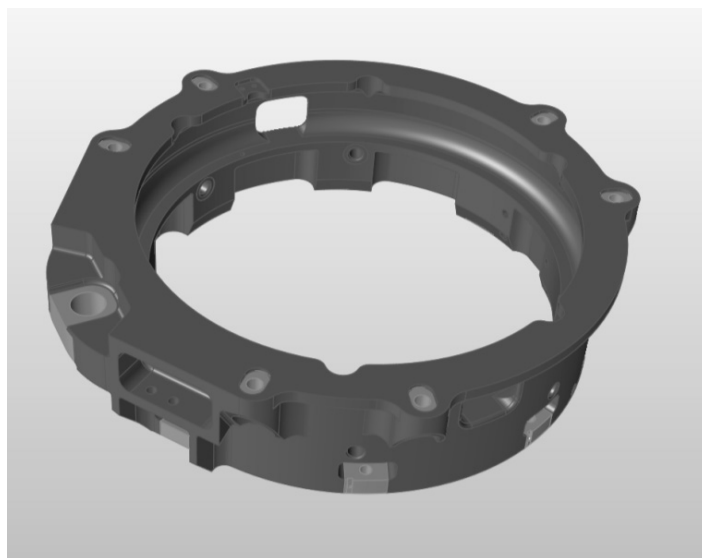


Рис. 3. Исходная модель конструкции

рые использовались при расчётах оптимальных топологий конструкции:

При исследовании влияния свойств материалов изделия на результаты топологической оптимизации и процесс изготовления оптимальных форм в качестве исходной модели была использована электронная модель уже существующего отсека, учитывающая внутренние и внешние габаритные ограничения (рисунок 3).

Результаты топологической оптимизации отсека с применением материалов X18H10T, BT6 и AL4 при одинаковых граничных условиях и критериях оптимизации показали, что:

1. Замена материала 1201 на X18H10T с учётом топологической оптимизации конструкции не обеспечивает требуемое снижение массы до 4 кг, при этом геометрия оптимизированного изделия содержит большую часть элементов исходной геометрии и трубообразные элементы, которые образовались вследствие проведения топологической оптимизации. В таком случае результаты оптимизации целесообразно использовать в качестве шаблона для проектирования нового дизайна изделия в CAD среде. Стоит отметить, что дизайн кон-

струкции изделия был незначительно изменен, но появились новые продольные элементы конструкции на местах силового кольца. Изготовление данного изделия с использованием станков с ЧПУ возможно, но приводит к большим трудозатратами на написание управляющих команд.

2. Замена материала на сплав AL4 не дала существенного уменьшения массы конструкции, а дизайн и технологический процесс производства изделия практически не изменился. В качестве конечной рабочей электронной модели изделия, целесообразно использовать исходную модель.

3. Наиболее целесообразной оказывается замена на материал BT6, при этом большая часть материала в модели была удалена, что привело к образованию множественных продолговатых элементов и сделало изделие не пригодным для производства с использованием станков с ЧПУ. Для доработки результатов оптимизации с целью дальнейшего изготовления конструкции методами аддитивного производства в оптимизаторе была сформирована результирующая CAD-модель посредством NURBS-поверхностей. Полученная оптимальная форма конструкции имеет минимальную

Таблица 2. Результаты топологической оптимизации

№ п.п.	Материал	Графическое отображение результатов топологической оптимизации, SolidThinkingInspire 2016	Масса конструкции до/ после оптимизации, кг	Процентное уменьшение исходной массы конструкции
1	X18H10T		19,253/9,722	49,5%
2	АЛ4		6,4421/6,3119	2%
3	BT6		10,769/2,92	72,8%

массу при условии обеспечения заданных требований прочности.

Выбор материала конструкции оказывает неоднозначное влияние, как на вид конструкции, так и на её массовые характеристики, и на технологию её производства.

Замена материала на X18H10T не является целесообразным решением, в связи с низким массовым совершенством конструкции, высокими трудозатратами на доработку электронной модели инженером и на составление управляющих команд для станка с ЧПУ для данного изделия.

Во втором случае электронная модель изделия не нуждается в доработке, а процесс производства данного изделия остается неизменным, но не даёт существенного уменьшения массы конструкции, что не обеспечивает решение поставленной задачи.

В третьем случае, электронная модель изделия обладает оптимальным значением массового совершенства конструкции, что обеспечивает решение задачи минимизации массы посредством применения инструментов топологической оптимизации, но данная модель требует трудоемких процедур по её доработке и требует изменений в технологии производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Безсонов К.А., Нехорошев М. В., Шулепов А. П. Разработка методологии по проектированию и изготовлению изделий с применением топологической оптимизации // В сборнике: фундаментальные исследования основных направлений технических и физико — математических наук сборник статей Международной научно-практической конференции. 2018.
- Боровиков А. А. Топологическая оптимизация переходного отсека К.А. / Боровиков А. А., Тененбаум С. М // Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 05.
- Кишов Е.А., Комаров В. А. Топологическая оптимизация силовых конструкций методом выпуклой линейаризации //Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 1.

4. Курапов С.В., Толоч А. В. Построение топологического рисунка максимально плоского суграфа не планарного графа // Автоматика и телемеханика. 2018. № 5.
5. Максимов П. В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации. / Максимов П. В. Фетисов К. В. // Международный научно-исследовательский журнал № 9 (51). Часть 2. Сентябрь 2016.
6. Новокшенов А.Д., Немов А. С., Мамчиц Д. В., Зобачева А. Ю. Разработка программного компонента топологической оптимизации на основе метода движущихся асимптот // В сборнике: Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады. 2018.

© Лукомский Дмитрий Константинович ( onion13@mail.ru ), Рипецкий Андрей Владимирович ( a.ripetskiy@mail.ru),  
Фрейлехман Станислав Александрович ( Ordos121@yandex.ru ), Петракова Елена Валерьевна ( info@easarspace.com ).  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Московский авиационный институт