

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102

*\*Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

## ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ

**Аннотация.** В представленной статье описана технология топологической оптимизации. Также описываются главные методы топологической оптимизации: ESO/BESO; SIMP-метод; ESO-Simp-метод; Level-Set-метод. Каждый из методов имеет свои достоинства, но обладают общими недостатками, а именно: проблема «шахматной доски» и зависимость от сеточного разбиения. Топологическая оптимизация позволяет снизить вес изделия, с сохранением прочностных характеристик. На основе полученного после оптимизации изделия были рассмотрены технологии его производства. К ним относятся традиционные технологии (литье, штамповка, фрезеровка и т.д.) и аддитивные технологии производства. Было представлено и описано программное обеспечение, обладающее функционалом топологической оптимизации. В основном это коммерческие CAD/CAE-системы (OptiStruct, Simulia Tosca, ANSYS и MSC Nastran). Основными отраслями, которые используют метод топологической оптимизации являются аэрокосмическая промышленность, машиностроение, медицина, робототехника и другие. В данной работе рассматривается процесс уменьшения веса тележки роботизированной ячейки при помощи метода SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), на которую крепится робот KUKA. Для топологической оптимизации тележки роботизированной ячейки использовался функционал CAD/CAM/CAE-системы NX от компании Siemens PLM Software. Сделаны обобщающие выводы о том, что топологическая оптимизация позволяет получать геометрические формы изделия с минимальной массой при сохранении прочности и жесткости.

**Ключевые слова:** топологическая оптимизация, роботизированные комплексы, нагрузки, ограничения, оптимизация, WAVE-связи, навигатор оптимизации.

**Введение.** Топологическая оптимизация представляет собой технологию для проектирования конструкций различной сложности, путем оптимизации машины с сохранением прочности [1, 2]. Также оптимизацию топологии используют для изучения уникальных физических свойств [3–5].

Самое первое упоминание о технологии топологической оптимизации (ТО) появилось одновременно с методом конечных элементов, то есть в 1960-е годы. Когда промышленность и производство начали набирать обороты в развитии и повышение цены на материалы, люди стали задумываться о снижении массы изделия, с сохранением прочностных характеристик. В этот момент начал стремительно развиваться метод топологической оптимизации. Поэтому за последнее десятилетие ТО стала применяться намного чаще, чем до быстрого развития промышленности и производства в целом. Это связано с тем, что в настоящее время стали предъявлять высокие требования к прочности и жесткости конструкции, с обеспечением минимального веса. Такие требования предъявляются в основном в аэрокосмической отрасли, военной промышленности, медицинской промышленности, строительной промышленности, роботизированных конструкциях и т.д. Такие требования можно

выполнить только с помощью методики топологической оптимизации либо генеративного дизайна.

В настоящее время актуальным направлением применения топологической оптимизации является проектирование роботизированных ячеек. Роботизированные ячейки могут быть различного масштаба и сложности: роботизированные ячейки, роботизированные участки, роботизированные линии. За счет представленного деления усложняется схема и увеличивается масштаб технологического процесса.

Роботизированная ячейка – это низшее звено роботизации. Также ее другое название – это роботизированный технологический комплекс.

Роботизация в промышленности стала применяться в XXI веке и в дальнейшем стала важной составляющей автоматизированного производства. Роботы используются в любой промышленности. Их внедрение в производство помогает сократить брак и издержки, а также повысить производительность и качество выпускаемой продукции. Качество продукции до внедрения промышленных роботов и после различается значительно, так как роботы не устают физически, могут выполнять работу в неблагоприятных условиях. Современные технологии позволяют

роботизированные комплексы снабдить техническим зрением и датчиками движения, что позволяет их адаптировать к внешним условиям работы.

К роботизированным ячейкам предъявляются различные требования, которые регламентированы государственным межотраслевым стандартом (ГОСТ 12.2.072-82):

1. Роботы должны иметь специализированное исполнение своей конструкции, если применяются в условиях повышенной запыленности и температуры воздуха и т.д.

2. Захватное устройство промышленного робота обязано удерживать объект манипулирования при прекращении подачи электричества. Это делается для безопасности человека.

3. Промышленные роботы обязаны оснащаться регуляторами, которые позволяют снижать скорость его исполнительных устройств до минимального значения, в случае, когда в зоне рабочего пространства робота находится обслуживающий персонал.

4. Чтобы обеспечить при работе роботизированной ячейки безопасность оператору, необходимо, чтобы на пульт управления осуществлялся следующий вывод информации:

- режим работы роботизированной ячейки;
- остановка оборудования (блокировка), которая работает в паре с роботом;
- оповещение о сбое работы промышленного робота.

5. Роботизированные ячейки должны быть оборудованы аппаратурой, которая исключает автоматическое включение робота после внезапного прекращения подачи электроэнергии.

6. Необходимо, чтобы роботы проходили требования по шумовым характеристикам.

7. Органы управления роботом и отображаемая информация, должна располагаться на панели управления.

8. Если происходит выбор средств для отображения информации, которая подразумевает немедленное реагирование, то предпочтение отдается звуковым сигналам, так как они считаются наиболее эффективными. Если звуковой сигнал собирается использовать в помещениях, в которых невозможно его распознать из-за рабочего шума, то лучше тогда использовать световой сигнал, который в дальнейшем выбирается по ГОСТ.

9. Переключатели, предназначенные для смены режима, в котором работает робот, должны быть оснащены фиксирующим механизмом, который предотвращает их произвольное перемещение.

10. Механизмы, предназначенные для аварийной остановки роботизированных ячеек,

должны располагаться в легкодоступных местах. Допустим в качестве органа для аварийного отключения от питания будет применяться кнопка, то она должна быть увеличена в размерах, иметь грибовидную форму и окрашена в красный цвет, а также рядом должны располагаться указатели и правила пользования данным механизмом.

11. При организации полноценных роботизированных ячеек, которые находятся на одной огражденной территории и управляются различными пультами, должна стоять система блокировки, которая не позволит управлять одним и тем же пультом сразу несколькими оборудованными, находящимися в рабочей зоне роботизированного комплекса.

12. Расстановка технологического оборудования, входящего в роботизированную ячейку, должно включать корректное расположение оборудования, чтобы обслуживающий персонал при проведении каких-либо необходимых работ (программирование, обучение, ремонт и т.д.) мог свободно и безопасно получить доступ к оборудованию.

13. Перед началом работы, сотрудник или оператор должен проверить роботизированную ячейку на холостом ходу. Это делается для того, чтобы сотрудник убедился в исправности промышленного робота и вспомогательного оборудования или же для исправления неисправностей, которые были замечены работником при испытании роботизированной ячейки. Также необходима проверка блокировочных устройств, которые должны работать в соответствии с гидравлической, пневматической и электрической схемами.

14. Обслуживающему персоналу строго запрещено находиться в пространстве роботизированной ячейки, дабы избежать несчастных случаев, также запрещено выполнять ремонтные работы или обслуживание промышленных роботов без отключения питания.

**Методика.** Теперь разберем подробнее, что такое топологическая оптимизация и для чего ее используют. До момента появления аддитивных технологий, вопрос по геометрии не являлся такой серьезной проблемой и решался всеми доступными методами [1, 2]. С появлением аддитивных технологий стали стараться уменьшить вес конструкций за счет данной технологии, и так появился метод топологической оптимизации. Он позволяет изменить форму стандартной геометрии на геометрию, которая адаптирована под определенную технологию. Такими технологиями могут являться, как традиционные (литье, штамповка, фрезеровка и т.д.), так и аддитивные технологии [6, 7].

Существует несколько методов топологической оптимизации:

1) ESO/BESO – это эволюционный метод оптимизации (Evolutionary Structural Optimization) и двунаправленной эволюционной оптимизации конструкции (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) [8].

2) SIMP-метод (Solid Isotropic Material with Penalization) – это метод пенализации для твердого изотропного тела [8].

3) ESO-Simp-метод. Это гибридный метод топологии. Он нацелен на объединение рассмотренных ранее методов ESO и SIMP [8].

4) Level-Set-метод. Его основная цель в том, что данный метод позволяет представить кривую или поверхность в неявном виде [8].

Представленные выше методы имеют различные преимущества, но всех их объединяет несколько недостатков, а именно:

- проблема «шахматной доски»;
- зависимость от сеточного разбиения.

Про каждую проблему можно сказать следующее:

а) Проблема «шахматной доски» состоит в том, что после оптимизации, оптимизированная модель имеет фрагменты, которые находятся на каком-то расстоянии от основной геометрии.

б) Зависимость от сеточного разбиения. Данная проблема появляется в связи с тем, что в расчете используется различные конечные элементы (размер, форма, тип сетки и т.д.), что в конечном итоге приводит к различным дефектам. К сожалению, решения для преодоления данной проблемы еще не придумали [8, 9].

**Основная часть.** В последние несколько десятилетий топологическая оптимизация превратилась в активное поле для исследователей.

Основной задачей процесса топологической оптимизации и его идеей считается – поиск наиболее подходящего варианта распределения материала в детали из множества итераций, чтобы при дальнейших расчетах не изменились прочностные характеристики детали (рис. 1). Если же говорить простым языком, то использование метода топологической оптимизации при проектировании позволит определить правильное распределение массы детали, при этом сохранив жесткость конструкции и уменьшив ее массу, что повлияет также и на экономическую составляющую [10].

Если смотреть со стороны программного обеспечения, то есть какие программы позволяют использовать данный метод, то в них входит большое количество коммерческих CAD/CAE-систем, а это OptiStruct от Altair Hyper Works, NX от компании Siemens, а также модуль

Simulia Tosca, используемый в Abaqus, ANSYS и MSC Nastran. В современном мире специализированные программы для топологической оптимизации могут создать необходимую деталь с самого нуля. Но в любом случае, программе необходимо задать условия закрепления элемента и указать соприкасающиеся поверхности [11–15].

Большой интерес к данному методу испытывают в отрасли машиностроения, так как можно решить сразу несколько проблем, а именно:

- снижение веса производимых изделий;
- повышение прочности изделий;
- экономическое состояние предприятия,

то есть уменьшение веса позволяет сэкономить на закупках.

Передовые компании во время проектирования стали все чаще применять метод топологической оптимизации.

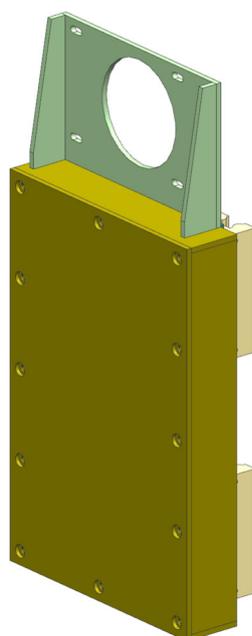
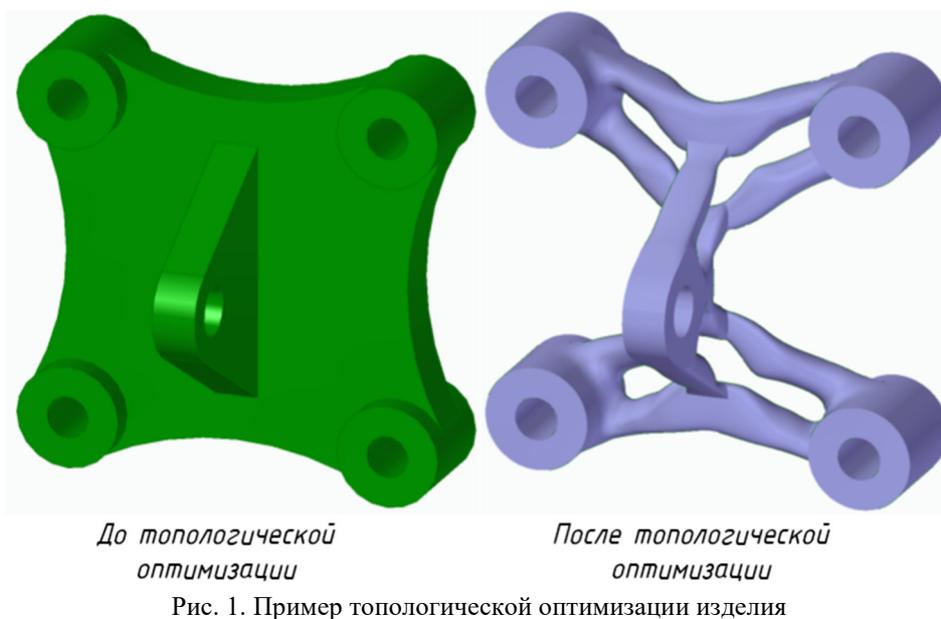
Также основная отрасль, которую нельзя в настоящее время уже представить без данной технологии, это аэрокосмическая промышленность. Там важно получить прочную конструкцию с минимальным весом. В результате топологической оптимизации получается изделие сложной формы, которое производится только в тех случаях, когда это обосновано экономически и стоит задача снижения веса конструкции. Обычно это такие детали, которые нельзя изготовить при помощи применения традиционных методов (точение, фрезерование, штамповка и т.д.), а если можно получить ее с помощью традиционных методов, то выходит экономически невыгодно производить такую деталь, тогда в таких ситуациях переходят к аддитивным технологиям 3D-печати [6, 7, 14, 15].

Основная цель в данной статье состоит в том, чтобы получить топологическую модель тележки, на которую устанавливается робот KUKA [1, 13].

При выполнении топологической оптимизации в данной работе используется CAD/CAM/CAE-система NX. Поскольку после проведения топологической оптимизации предполагается изготовление изделия с помощью сварной конструкции в качестве материала используется СЧ20, имеющая следующие свойства: плотность ( $\rho = 7100 \text{ кг/м}^3$ ); предел кратковременной прочности ( $\sigma_B = 200 \text{ МПа}$ ); модуль упругости ( $E = 10^5 \text{ МПа}$ ); коэффициент Пуассона ( $\nu = 0,3$ ).

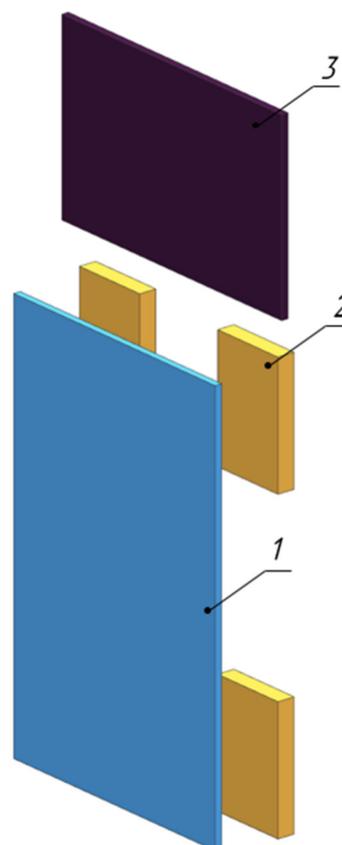
Теперь рассмотрим процесс топологической оптимизации на примере тележки, к которой крепится робот (рис. 2).

Данная конструкция крепится к стенке с помощью кареток, которые в свою очередь устанавливаются на линейные направляющие для перемещения робота в вертикальном положении.



Теперь с помощью редактора геометрической связи WAVE необходимо создать ассоциативную копию всей сборки. После проведения данной операции в дереве построения отображаются забранные геометрические связи (связанное тело).

Следующим этапом в топологической оптимизации является указание геометрии, которую необходимо оставить. На рисунке 3 как раз представлена данная геометрия. Под цифрой 1 указана площадка, которая необходима для установки робота KUKA; цифра 2 – это площадки, к которым будут крепиться каретки, и цифра 3 – площадка под мотор-редуктор.



Следующим этапом выбираем область проектирования. В данном случае это полностью конструкция тележки. После выбора области проектирования необходимо назначить материал (СЧ 20 ГОСТ 1412-85) (рис. 4).

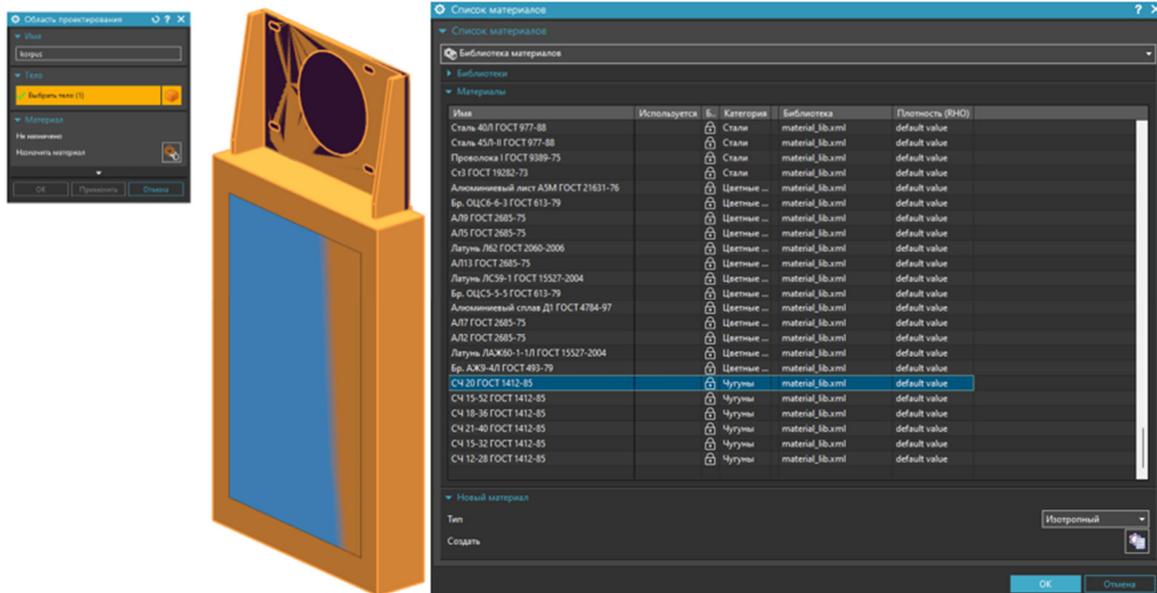


Рис. 4. Выбор области проектирования и назначения материала

Затем необходимо выбрать команду «Тела построения». Это тела, которые были представлены на рисунке 3. На рисунке 5 представлен выбор тела построения с наименованием «плошадка\_робота».

На рисунке 6 показан «Навигатор оптимизации». Там представлен выбор всех тел построений, которые были созданы ранее.

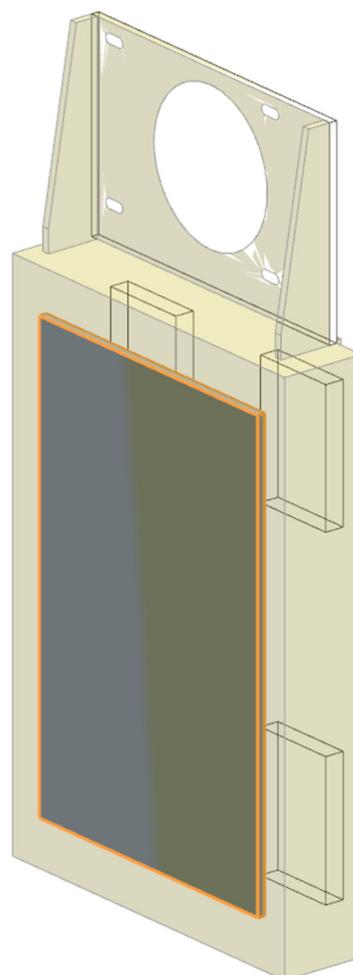
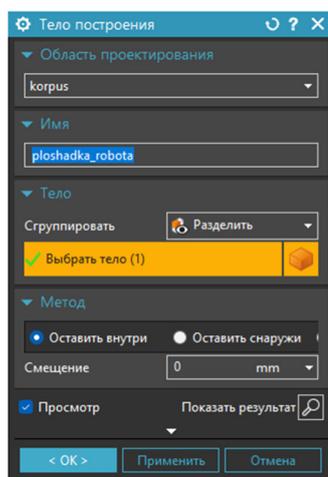


Рис. 5. Выбор тела построения

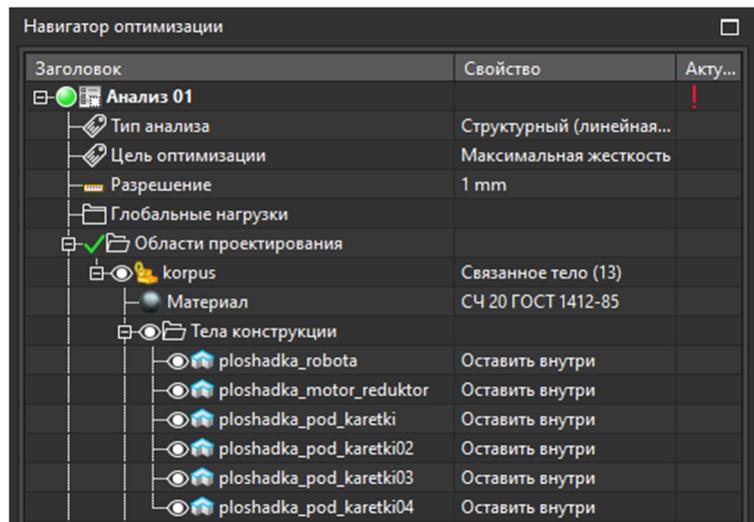


Рис. 6. Навигатор оптимизации

Теперь необходимо задать ограничения. В качестве ограничений будет использоваться команда «Заделка». Это команда, которая фиксирует тело в месте его крепления к основной конструкции. В представленной конструкции заделка задается в местах крепления кареток к корпусу тележки (рис. 7).

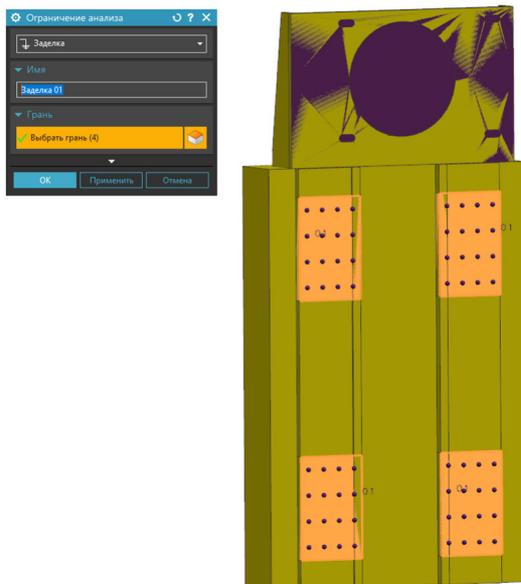


Рис. 7. Фиксация каретки при помощи команды «Заделка»

После создания ограничений необходимо задать силы, действующие на тележку от веса робота и силы (рис. 8). Вес робота, действует на тележку вдоль направления оси – Z.

Затем задаются ограничения оптимизации, то есть в случае проводимой топологической оптимизации необходимо задать ограничения массы, которую не должна превышать конструкция. Представленная тележка не должна превышать массу значением 50 кг (рис. 9).

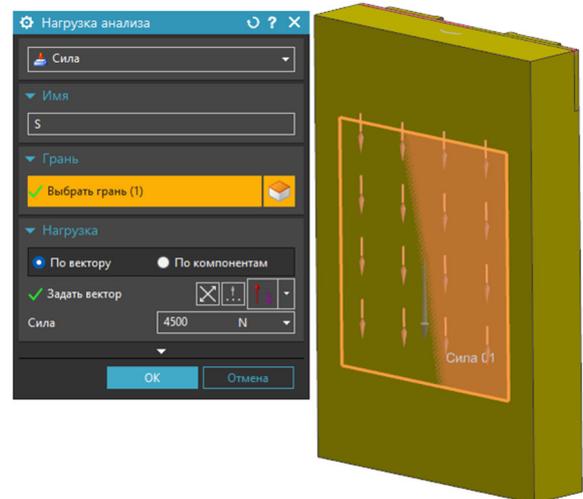


Рис. 8. Задание воздействующих сил

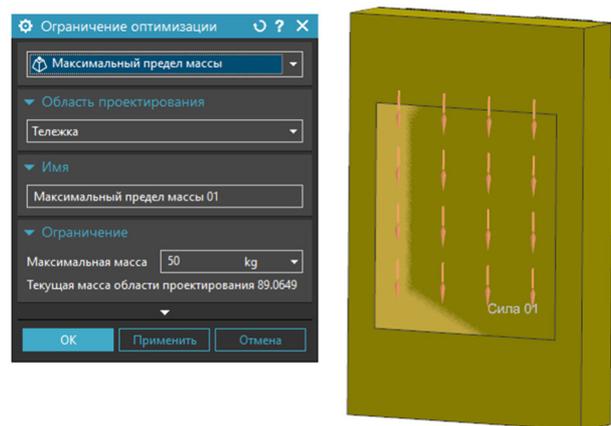


Рис. 9. Ограничения оптимизации

Когда были заданы все необходимые параметры, которые необходимы для процесса топологической оптимизации. Теперь можно начать процесс топологической оптимизации. После его запуска, появится монитор выполнения решений (рис. 10). График, получаемый в этом окне, показывает на сколько будет подходить конструкция по заданным параметрам.

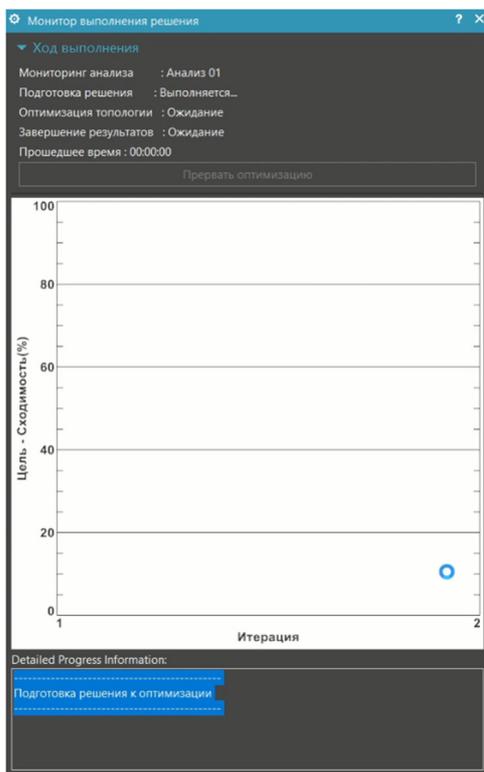


Рис. 10. График получаемых результатов

Так как топологическая оптимизация проводилась в NX, то сразу полученную геометрию можно отредактировать, не загружая полученную геометрию в сторонние программы. Оптимизированная модель приведена на рисунке 11. На основе оптимизированной модели, строится твердотельная модель (3D-модель). На рисунке 12 можно увидеть, как меняется геометрия топологического изделия в зависимости от заданной массы и количества итераций.

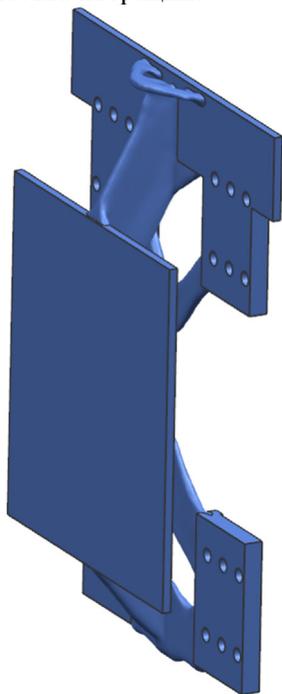


Рис. 11. Пример топологического изделия

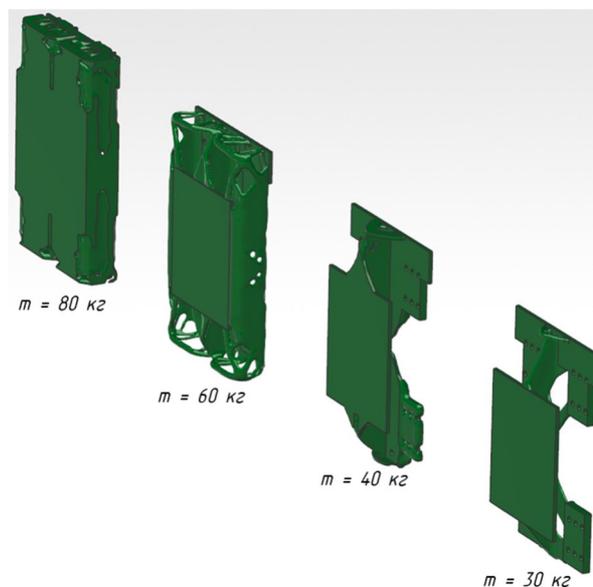


Рис. 12. Изменение вида топологического изделия

После получения облегченной модели, необходимо провести расчет на прочность. Это выполняется для определения влияния уменьшения веса на прочность детали. Расчет будет производиться для начальной модели, которая еще не подвергалась топологической оптимизации и модели уже подверженной топологической оптимизации.

**Выводы.** Методика топологической оптимизации позволяет снизить массу изделия, но при этом сохраняет жесткостные и прочностные характеристики детали, которая подвержена данному методу. В написанной статье метод топологической оптимизации был продемонстрирован на примере тележки для подвесного робота. Данная сборная конструкция была выбрана из-за того, что требования к роботам и роботизированным ячейкам выросли в разы.

Полученные в статье расчетные и экспериментальные данные могут быть использованы для верификации более сложных математических моделей.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попова Д.Д., Самойленко Н.А., Семенов С.В., Балакирев А.А., Головкин А.Ю. Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника.

2018. №55. С. 42–51. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05.

2. Боровиков А.А., Тушев О.Н. Разработка силовой конструкции космического аппарата с использованием топологической оптимизации для двух вариантов технологии изготовления // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 9. С. 1–13. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1807.

3. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Учёные записки ЦАГИ. 2011. Т. XLII. № 2. С. 91–102.

4. Sigmund O., Maute K. Struct topology optimization approaches a comparative review // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48. Is. 6, Pp. 1031–1055. DOI:10.1007/s00158-013-0978-6.

5. Кротких А.А., Максимов П.В. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №. 01(55). Часть 4. С. 91-94. DOI:10.23670/IRJ.2017.55.071.

6. Masood S.H. Advances in Fused Deposition Modeling // Comprehensive Materials Processing. 2014. №10. Pp. 69–91. DOI:10.1016/B978-0-0.

7. Hazrat Ali Md., Smagulov Z., Otepbergenov T. Finite element analysis of the CFRP-based 3D printed ankle-foot orthosis // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 179. Pp. 55–62. DOI:10.1016/2020.12.008.

8. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. №4 (51). С. 51–61. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.05.

9. Боровиков А.А., Тененбаум С.М. Топологическая оптимизация переходного отсека КА // Аэрокосмический научный журнал. 2016. №. 05. С. 16–30. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05.

10. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing // Proc. SFF Symp. Austin Texas. 2011. Pp. 348–362.

11. Максимов П.В., Фетисов К.В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №. 9(51). Часть 2. С. 58-60. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.05.

12. Kukushkin A.V., Konovalov D.A., Ver-shinin A.V., Levin V.A. Numerical simulation in CAE Fidesys of bonded contact problems on non-conformal meshes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1158. №. 2. Art. 032022. DOI: 10.1088/1742-6596/1158/3/032022.

13. Cheng L., Liang X., Bai J., Chen Q., Lemon J., To A. On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 27. Pp. 290–304. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.001.

14. Shi G., Guan C., Quan D., Dongtao W.u., Tang L., Gao T. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing // Chinese Journal of Aeronautics. 2020. Vol. 33 (4). Pp.1252–1259. DOI: 10.1016/j.cja.2019.09.006.

15. Mass Y., Amir O. Topology optimization for additive manufacturing: accounting for overhang limitations using a virtual skeleton // Additive Manufacturing 18. 2017. Pp. 58–73. DOI: 10.1016/j.addma.2017.08.001.

#### Информация об авторах

**Анциферов Сергей Игоревич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование». E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

**Карачевцева Анастасия Владимировна**, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

**Сычѳв Евгений Андреевич**, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

**Литвишко Александр Александрович**, магистр кафедры «Механическое оборудование». E-mail: alex.litvishko@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Поступила 26.09.2023 г.

© Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычѳв Е.А., Литвишко А.А., 2023

\*Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

\*E-mail: anciferov.sergey@gmail.com

## TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF DESIGN ELEMENTS OF A ROBOTIC CELL

**Abstract.** The presented article describes the technology of topological optimization. The main methods of topological optimization are also described: ESO/BESO; SIMP-method; ESO-Simp-method; Level-Set-method. Each of the methods has its advantages, but they have common disadvantages, namely: the problem of the "chessboard" and the dependence on grid partitioning. Topological optimization allows you to reduce the weight of the product, while maintaining the strength characteristics. Based on the product obtained after optimization, its production technologies were considered. These include traditional technologies (casting, stamping, milling, etc.) and additive manufacturing technologies. Software with topological optimization functionality was presented and described. These are mainly commercial CAD/CAE systems (OptiStruct, Simulia Tosca, ANSYS and MSC Nastran). The main industries that use the method of topological optimization are the aerospace industry, mechanical engineering, medicine, robotics and others. In this paper, we consider the process of reducing the weight of a robotic cell trolley using the SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) method, on which a robot KUKA is attached. The functionality of the CAD/CAM/CAE-system NX from Siemens PLM Software was used for the topological optimization of the robotic cell trolley. Generalizing conclusions are made that topological optimization makes it possible to obtain geometric shapes of a product with a minimum mass while maintaining strength and rigidity.

**Keywords:** Topological optimization, robotic complexes, loads, constraints, optimization, WAVE-link, optimization navigator.

### REFERENCES

1. Popova D.D., Samoylenko N.A., Semenov S.V., Balakirev A.A., Golovkin A.Yu. Application of the topological optimization method to reduce the weight of a structurally similar aircraft gas turbine pipeline bracket engine [Primenenie metoda topologicheskoy optimizatsii dlya umen'sheniya massy konstruktivno podobnogo kronshtejna truboprovoda aviacionnogo gazoturbinyj dvigatel']. Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. 2018. No. 55. Pp. 42–51. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05. (rus)
2. Borovikov A.A., Tushev O.N. Development of the power structure of a spacecraft using topological optimization for two variants of manufacturing technology [Razrabotka silovoj konstrukcii kosmicheskogo apparata s ispol'zovaniem topologicheskoy optimizatsii dlya dvuh variantov tekhnologii izgotovleniya]. Engineering Journal: Science and Innovation. 2018. No. 9. Pp. 1–13. DOI:10.18698/2308-6033-2018-9-1807. (rus)
3. Sysoeva V.V., Chedrik V.V. Algorithms for optimizing the topology of power structures [Algoritmy optimizatsii topologii silovykh konstrukcij]. Scientific notes of TsAGI. 2011. Vol. XLII. No. 2. Pp. 91–102. (rus)
4. Sigmund O., Maute K. Struct topology optimization approaches a comparative review. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48. Is. 6. Pp. 1031–1055. DOI:10.1007/s00158-013-0978-6.
5. Krotkikh A.A., Maksimov P.V. Research and modification of the SIMP topological optimization method [Issledovanie i modifikatsiya metoda topologicheskoy optimizatsii SIMP]. International Research Journal. 2016. No. 01(55). Part 4. Pp. 91–94. DOI:10.23670/IRJ.2017.55.071. (rus)
6. Masood S.H. Advances in Fused Deposition Modeling. Comprehensive Materials Processing. 2014. No. 10. Pp. 69–91. DOI:10.1016/B978-0-0.
7. Hazrat Ali Md., Smagulov Z., Otepbergenov T. Finite element analysis of the CFRP-based 3D printed ankle-foot orthosis. Procedia Computer Science. 2021. Vol. 179. Pp. 55–62. DOI:10.1016/2020.12.008.
8. Bashin K.A., Tursunov R.A., Semenov S.V. Topology optimization methods for structures used in the aerospace industry [Metody topologicheskoy optimizatsii konstrukcij, primenyayushchiesya v aerokosmicheskoy otrasli]. Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. 2017. No. 4 (51). Pp. 51–61. DOI:10.15593/2224-9982/2017.51.05. (rus)
9. Borovikov A.A., Tenenbaum S.M. Topological optimization of the transition compartment Spacecraft [Topologicheskaya optimizatsiya perekhodnogo otseka kosmicheskije apparaty]. Aeronautical and Rocket Space Engineering, 2016. No. 05. Pp. 16–30. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05. (rus)
10. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. Proc. SFF Symp. Austin Texas. 2011. Pp. 348–362.
11. Maksimov P.V., Fetisov K.V. Analysis of methods for finalizing the finite element model after topological optimization [Analiz metodov dorabotki konechno-elementnoj modeli posle topologicheskoy optimizatsii]. International Research Journal. 2016. No. 9(51). Part 2. Pp. 58–60. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05. (rus)

12. Kukushkin A.V., Kononov D.A., Ver-shinin A.V., Levin V.A. Numerical simulation in CAE Fidesys of bonded contact problems on non-conformal meshes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1158. No. 2. Art. 032022. DOI:10.1088/1742-6596/1158/3/032022.

13. Cheng L., Liang X., Bai J., Chen Q., Lemon J., To A. On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 27. Pp. 290–304. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.001.

14. Shi G., Guan C., Quan D., Dongtao W.u., Tang L., Gao T. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2020. Vol. 33 (4). Pp.1252–1259. DOI:10.1016/j.cja.2019.09.006.

15. Mass Y., Amir O. Topology optimization for additive manufacturing: accounting for overhang limitations using a virtual skeleton. *Additive Manufacturing* 18. 2017. Pp. 58–73. DOI:10.1016/j.addma.2017.08.001.

#### *Information about the authors*

**Antsiferov, Sergey I.** PhD, Associate Professor of the Mechanical Equipment Department. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

**Karachevtseva, Anastasia V.** Post-graduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

**Sychev, Evgeniy A.** Post-graduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

**Litvishko Alexander Alexandrovich.** Master of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: alex.litvishko@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

---

*Received 26.09.2023*

#### **Для цитирования:**

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А. Топологическая оптимизация элементов конструкции роботизированной ячейки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 93–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102

#### **For citation:**

Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A. Topological optimization of design elements of a robotic cell. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 11. Pp. 93–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102