

Орду Музаффер Али

студент бакалавриата кафедры СМ10 «Колесные машины»

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Россия, Москва

E-mail: om21m457@student.bmstu.ru

Шабалин Михаил Леонидович

кандидат технических наук, кафедра СМ10 «Колесные машины»

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Россия, Москва

E-mail: shabolin@bmstu.ru

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ КОЛЕСНОГО РОБОТА

В работе проведено исследование возможности применения полиамидов для изготовления несущей системы колесного робота полной массой 125 кг. Основной целью является доказательство применимости конструкционных пластмасс для подобных элементов с учетом требований к жесткости и прочности. Для этого сформулирована задача топологической оптимизации, рассмотрены основные нагрузочные режимы, выполнена топологическая оптимизация конструкции. Проведены поверочные расчеты прочности на четырех эксплуатационных режимах, подтверждающие необходимый запас прочности конструкции. Предложены варианты конструктивной реализации в виде разборной системы и рекомендации по изменению проектного пространства для упрощения сборки. Результаты исследования демонстрируют возможность использования пластиковых материалов для создания легких и прочных несущих систем колесных роботов.

Ключевые слова: *топологическая оптимизация, колесный робот, пластмасса, нагрузочные режимы, пространство проектирования, проверочные расчеты*

The study investigates the feasibility of using polyamides for manufacturing the load-bearing frame of a wheeled robot with a total mass of 125 kg. The main objective is to demonstrate the applicability of engineering plastics for such components while meeting stiffness and strength requirements. To this end, a topology optimization problem was formulated, the main loading scenarios were considered, and topology optimization of the structure was performed. Verification strength analyses were carried out for four operating modes, confirming the required safety margin of the design. Design solutions in the form of a modular system and recommendations for modifying the design space to simplify assembly are proposed. The results of the study demonstrate the potential of using plastic materials to create lightweight and robust load-bearing structures for wheeled robots.

Key words: *topology optimization, wheeled robot, plastic, loading conditions, design space, verification analyses*

1 Введение

Топологическая оптимизация представляет собой численный метод проектирования, позволяющий определить наилучшую форму и рациональное распределение материала в конструкции. Целью такого подхода является достижение заданных характеристик при минимальных ресурсных затратах [1]. Метод активно применяется в инженерной практике, архитектурном проектировании и других сферах, где критичны прочность, легкость и эффективность конструкций. Суть метода заключается в автоматическом выявлении зон, где материал действительно необходим для выполнения заданных функций, и тех областей, где он может быть исключён без потери функциональности [2].

Топологическая оптимизация решает задачи, связанные с минимизацией массы или объема конструктивных элементов, при этом обеспечивая соблюдение требований к прочности, жесткости, тепловым и иным параметрам. Такие задачи решаются при строгих ограничениях — например, по допустимым деформациям или механическим напряжениям [3].

В общем виде задача топологической оптимизации формулируется как задача минимизации некоторой целевой функции $C(\rho)$, при ограничении на объём материала, как представлено в выражении (1.1) [4]:

$$\min_{\rho(x)} C(\rho) = \int_{\Omega} \mathbf{f}^T \mathbf{u} \, d\Omega, \quad (1.1)$$

где $C(\rho)$ – целевая функция оптимизации;

$\rho(x)$ – функция плотности материала;

\mathbf{u} – вектор перемещений;

\mathbf{f} – вектор внешних нагрузок;

Ω – область оптимизации.

Условия топологической оптимизации можно задать из уравнений (1.2), (1.3) и (1.4):

$$K(\rho)\mathbf{u} = \mathbf{f}; \quad (1.2)$$

$$V(\rho) \leq V_0; \quad (1.3)$$

$$0 \leq \rho(x) \leq 1 \quad \forall x \in \Omega, \quad (1.4)$$

где $K(\rho)$ – матрица жёсткости системы, зависящая от распределения материала;

$V(\rho)$ – объем оптимизируемой области;

V_0 – заданный максимальный объем.

2 Постановка задачи и нагрузочные режимы

В рамках статьи была проведена топологическая оптимизация несущей системы колесного робота полной массы 125 кг, общий вид и 3D-модель которого представлены на рисунках 2.1 и 2.2. Работа направлена на анализ применимости полиамидных материалов для изготовления несущих конструкций.

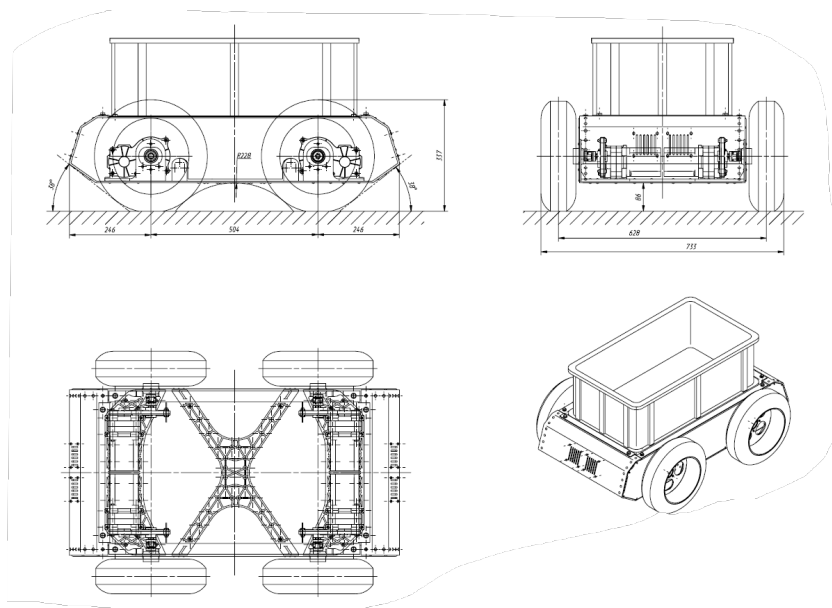


Рисунок 2.1 – Чертеж общего вида колесного робота

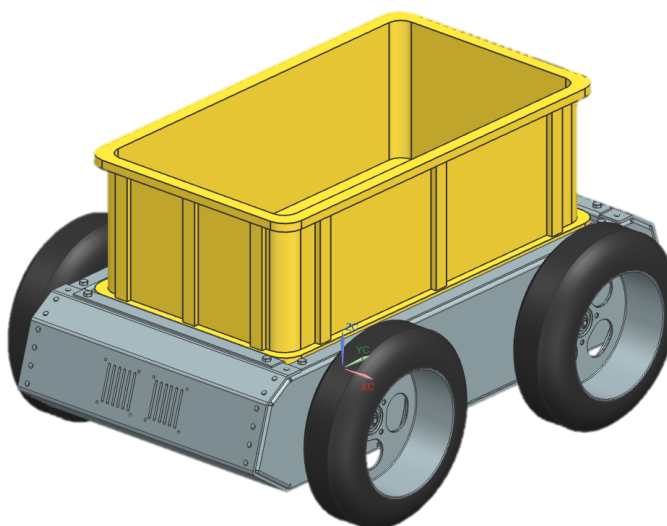


Рисунок 2.2 – 3D-модель колесного робота

В первую очередь необходимо задать пространство проектирования будущей несущей системы [5]. На рисунке 2.3 представлено пространство проектирования, задающее внешние габариты транспортного средства, на рисунке 2.4 – пространство, выделенное под агрегаты колесного робота. Для упрощения приложения граничных условий, колеса были представлены в виде Г-образных тел, один конец которого соединен с пространством проектирования.

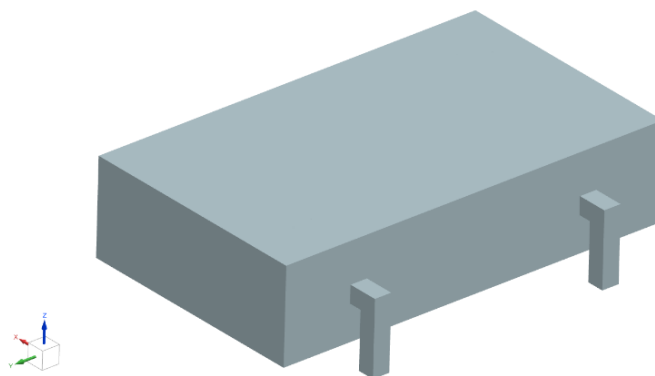


Рисунок 2.3 - Внешнее пространство проектирования

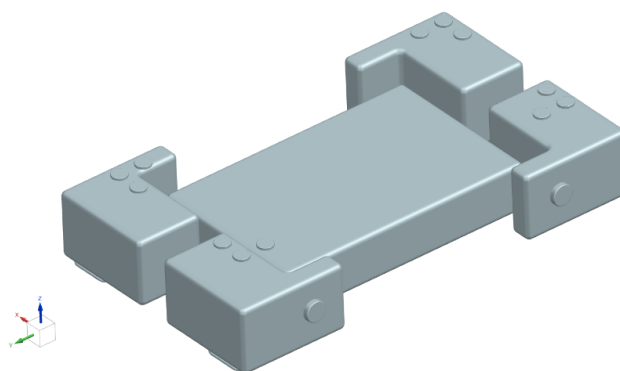


Рисунок 2.4 – Область выделенная под агрегаты колесного робота

При выполнении оптимизации необходимо задать также цель и ограничения оптимизации. В рамках топологической оптимизации несущей системы следует добиваться наибольшей жесткости конструкции, что и было задано в качестве целевой функции оптимизации [6]. Ограничением оптимизации является максимальный предел массы, который должен быть достигнут в ходе топологической оптимизации.

Колесный робот, несущая система которого рассматривается в рамках данной работы, предназначен для внутрицеховых грузоперевозок. Ввиду ограниченной области применения транспортного средства, для проведения оптимизации зададим два нагрузочных режима – диагональное вывешивание одного из колес и стоянка транспортного средства. Схемы закреплений для обоих режимов представлены на рисунках 2.5 и 2.6 [7].

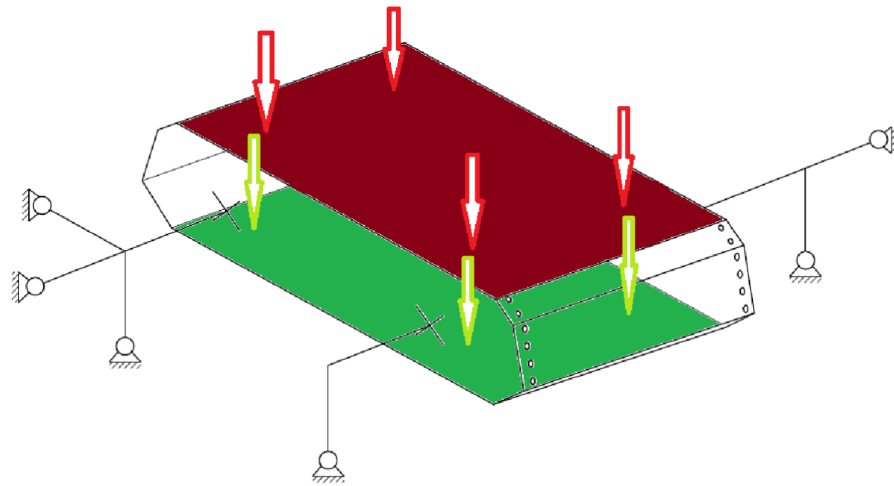


Рисунок 2.5 – Схема закреплений при диагональном вывешивании робота

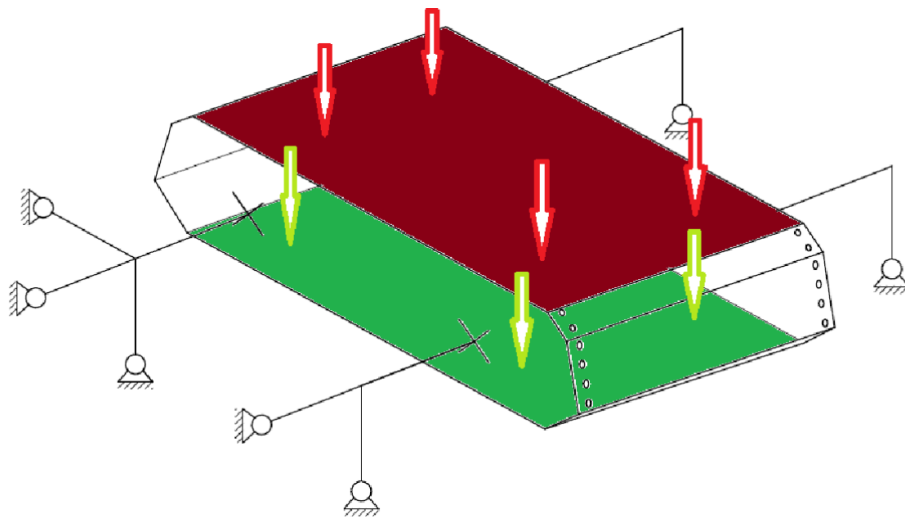


Рисунок 2.6 – Схема закреплений стоянке робота

В обоих случаях на тело действуют две силы: G_H – сила тяжести от полезной нагрузки транспортного средства, приложенная к местам крепления груза; и G_A – сила тяжести от агрегатов транспортного средства, приложенная к местам крепления агрегатов.

3 Результаты оптимизации

С учетом заданных граничных условий и нагрузок были получены топологически оптимизированные конструкции несущей системы при пределах массы 6 и 9 кг соответственно. Полученные конструкции несущей системы представлены на рисунках 3.1 и 3.2. Материалом конструкции принят полиамид PA11 с пределом текучести 40 МПа, модулем упругости 1250 МПа, и коэффициентом Пуассона 0,4 [8].

Для проведения топологической оптимизации была сгенерирована конечно-элементная сетка, состоящая из конечных элементов Tetra 10 размером 7 мм. Выбран элемент Tetra10, поскольку он обеспечивает более высокую точность расчёта напряжённо-деформированного состояния на сложной геометрии по сравнению с линейными элементами [9].

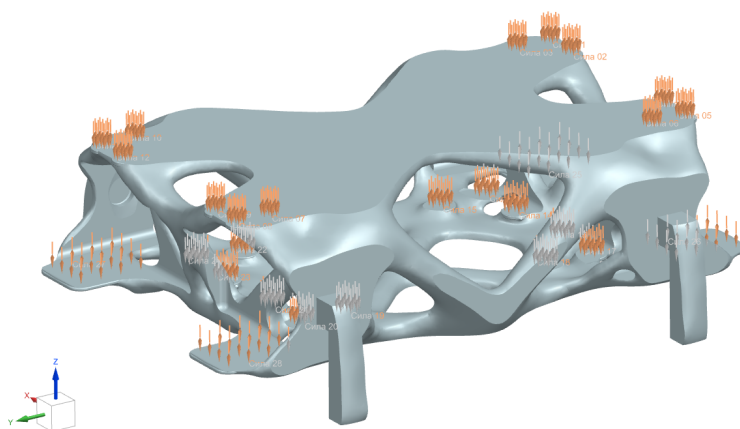


Рисунок 3.1 – Результат оптимизации при пределе массы 9 кг

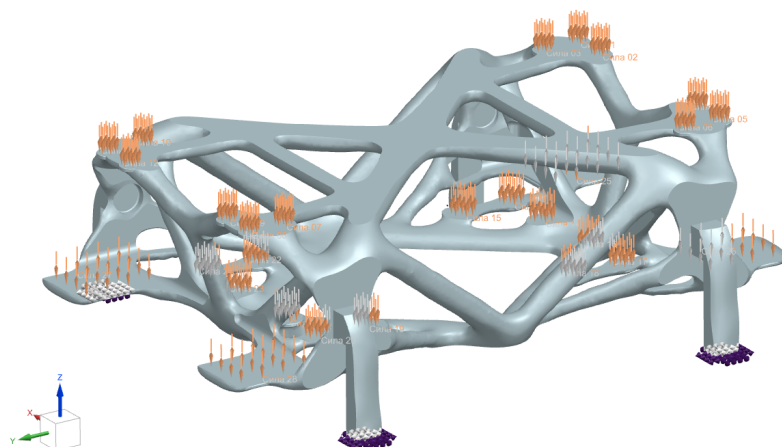


Рисунок 3.2 – Результат оптимизации при пределе массы 6 кг

Далее были проведены поверочные расчеты оптимизированной конструкции. Расчеты производились при четырех нагрузочных режимах: диагональное вешивание; движение по косоугру под углом 45° ; тяговый режим и режим трехкратной перегрузки. Эквивалентные напряжения, возникающие в конструкции при этих режимах представлены на рисунках 3.3-3.6.

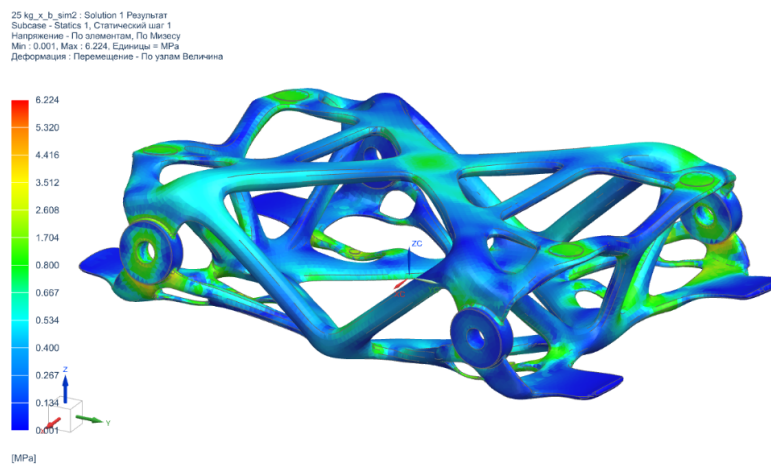


Рисунок 3.3 – Эквивалентные напряжения при вешивании колеса

25 kg_x_b_sim2 : nakl Результат
Subcase - Statics 1, Статический шаг 1
Напряжение - По элементам, По Максимуму
Min : 0.000, Max : 6.698, Единицы = МПа
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

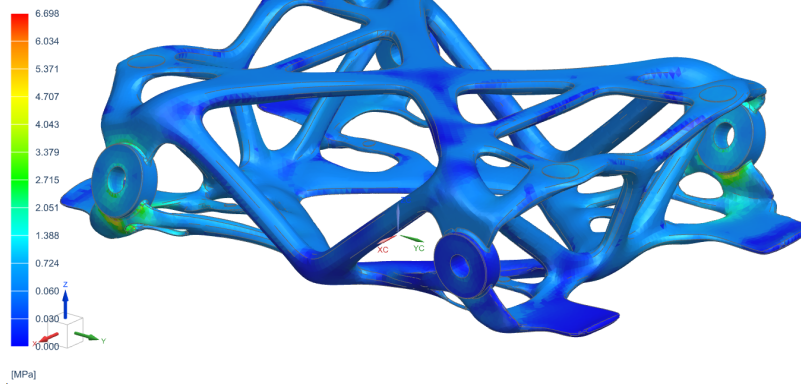


Рисунок 3.4 – Эквивалентные напряжения при движении по косогору

25 kg_x_b_sim2 : tyag Результат
Subcase - Statics 1, Статический шаг 1
Напряжение - По элементам, По Максимуму
Min : 0.000, Max : 14.16, Единицы = МПа
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

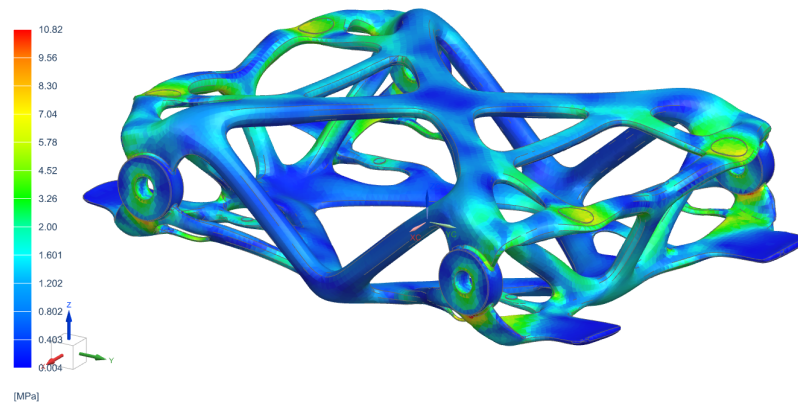


Рисунок 3.5 – Эквивалентные напряжения при тяговом режиме

25 kg_x_b_sim2 : Solution 2 Результат
Subcase - Statics 1, Статический шаг 1
Напряжение - По элементам, По Максимуму
Min : 0.000, Max : 14.16, Единицы = МПа
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

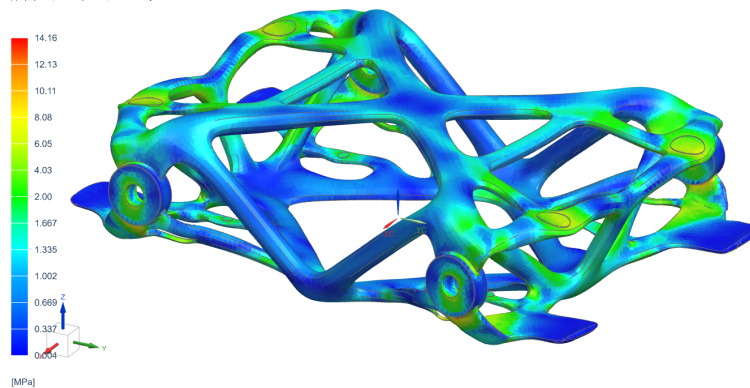


Рисунок 3.6 – Эквивалентные напряжения при перегрузке 3G

4 Анализ результатов топологической оптимизации

Расчёты пластиковых конструкций часто проводят по допускаемым напряжениям, составляющим 50% от предела текучести материала, чтобы обеспечить запас прочности и учесть возможное воздействие факторов, таких как ползучесть, температурные колебания и влагопоглощение, которые могут снизить механические характеристики пластика с течением времени [10]. Этот подход гарантирует долговечность и стабильность конструкции, снижая риск деформаций и поломок при длительных статических или динамических нагрузках.

Коэффициент запаса несущей системы транспортного средства можно найти из выражения (1):

$$k_{\text{зап}} = \frac{[\sigma_T]}{\sigma_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где: $\sigma_{\text{max}} = 14,16$ МПа – максимальное расчетное напряжение среди всех рассмотренных режимов нагружения;

$[\sigma_T] = 20$ МПа – предел текучести материала. В случае с полиамидами следует брать 50% от предела текучести материала.

Тогда из выражения (2) получим:

$$k_{\text{зап}} = \frac{20}{14,16} = 1,41. \quad (2)$$

Полученный коэффициент запаса говорит о том, что оптимизированная несущая система работоспособна при данных режимах нагружения и может быть использована в реальных конструкциях.

Изготавливать полученную несущую систему предлагается в виде разборной конструкции, как представлено на рисунке 4.1. Также возможна переработка конструкции с изменением пространства проектирования для соблюдения условия собираемости, как представлено на рисунке 4.2.

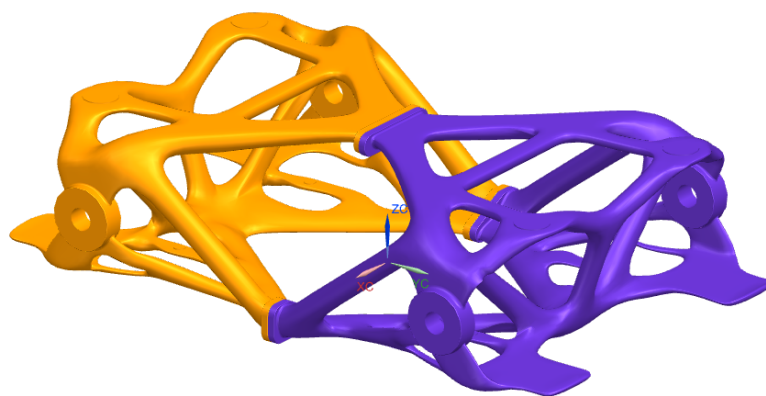


Рисунок 4.1 – Разборная несущая система

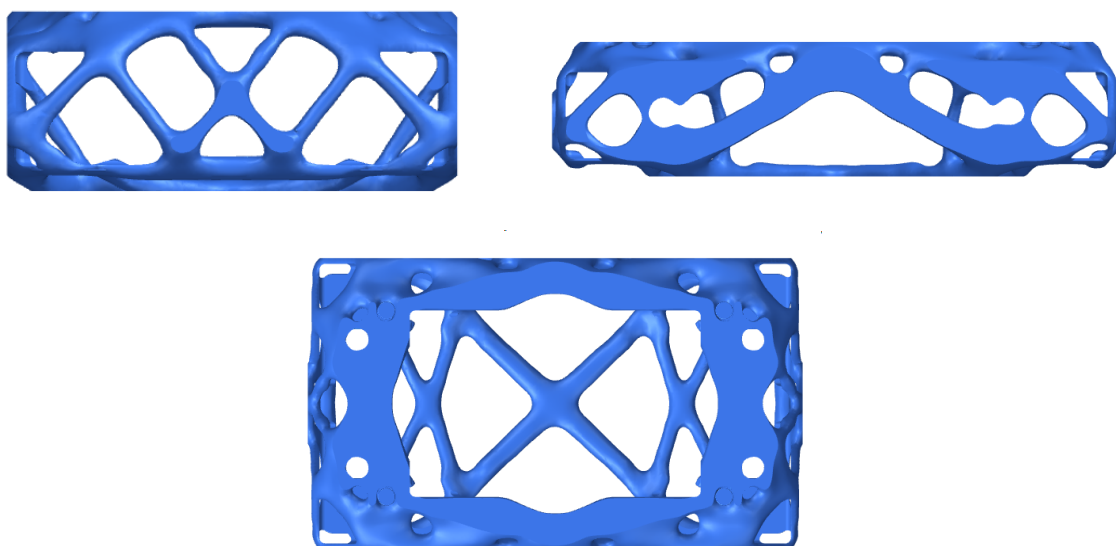


Рисунок 4.2 – Несущая система с измененным пространством проектирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование топологической оптимизации несущей системы колесного робота с целью доказательства возможности применения полиамидных материалов в качестве конструкционных для подобных элементов. Сформулирована и решена задача топологической оптимизации при заданных ограничениях массы и двух основных нагрузочных режимах эксплуатации.

В результате оптимизации получены конструкции с пределами массы 6 и 9 кг, соответствующие критериям максимальной жесткости. Проведенные проверочные расчеты прочности в четырех эксплуатационных режимах показали достаточный коэффициент запаса, подтверждающий работоспособность конструкции из полиамида PA11.

Предложена конструктивная реализация в виде разборной системы и даны рекомендации по изменению проектного пространства для упрощения сборки. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения конструкционных пластмасс для изготовления легких и прочных несущих систем колесных роботов, позволяя снизить массу конструкции и повысить эффективность производства.

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует высокий потенциал использования полиамидов в инженерных конструкциях мобильной робототехники и формирует основу для дальнейшего внедрения подобных решений в промышленный дизайн и серийное производство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковалева И. Л., Кункевич Д. П., Напрасников В. В., Полозков Ю. В., Чваньков А. А. Топологическая оптимизация конструктивной геометрии легковесных деталей // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. №3. С. 50-55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/topologicheskaya-optimizatsiya-konstruktivnoy-geometrii-legkovesnyh-detaley> (дата обращения: 03.03.2025).

2. Bendsoe, M. P. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method / M. P. Bendsoe, N. Kikuchi // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1988. – Vol. 7 P. 197-224.

3. 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. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-topologicheskoy-optimizatsii-konstruktsiy-primenyayuschiesya-v-aerokosmicheskoy-otrasli> (дата обращения: 03.06.2025).

4. Косых Павел Андреевич, Азаров Андрей Валерьевич Теория и анализ методов топологической оптимизации // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. №4 (136). С. 20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-i-analiz-metodov-topologicheskoy-optimizatsii> (дата обращения: 01.07.2025).

5. Махмутов Р. Г., Кутлугаллямов Г. Г., Гарифуллин В. И. ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КРОНШТЕЙНА АВИАДВИГАТЕЛЯ В ANSYSMECHANICAL // Форум молодых ученых. 2019. №12 (40). С. 518-524 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/topologicheskaya-optimizatsiya-kronshteyna-aviadvigatelya-v-ansysmechanical> (дата обращения: 01.07.2025).

6. Сорокин Дмитрий Владимирович, Бабкина Людмила Алексеевна, Бразговка Ольга Владимировна Проектирование элементов конструкций различного назначения на основе топологической оптимизации //

Космические аппараты и технологии. 2022. №2 (40) с. 61-82. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-elementov-konstruktsiy-razlichnogo-naznacheniya-na-osnove-topologicheskoy-optimizatsii> (дата обращения: 01.07.2025).

7. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 391 с.

8. Designerdata.nl. Polyamide 11 [Электронный ресурс]. URL: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polyamide-11> (дата обращения: 01.07.2025).

9. Maas SA, Ellis BJ, Rawlins DS, Weiss JA. Finite element simulation of articular contact mechanics with quadratic tetrahedral elements. *J Biomech.* 2016 Mar 21;49(5):659-667. doi: 10.1016/j.jbiomech.2016.01.024. Epub 2016 Feb 6. PMID: 26900037; PMCID: PMC4801678.

10. Quadrant. *Каталог конструкционных пластмасс* [Электронный ресурс]. – Минск: ООО «Фторотех», 2020. – 68 с. – URL: <https://www.ftorotex.by/upload/iblock/0b8/Каталог%20конструкционных%20пластмасс%20QUADRANT.pdf>, свободный. (Дата обращения: 30.06.2025).

Referents

1. Kovaleva I. L., Kunkevich D. P., Naprasnikov V. V., Polozkov Yu. V., Chvankov A. A. Topological Optimization of the Structural Geometry of Lightweight Parts // *Systems Analysis and Applied Informatics.* 2022. No. 3. Pp. 50–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/topologicheskaya-optimizatsiya-konstruktivnoy-geometrii-legkovesnyh-detaley> (accessed: 03.03.2025).

2. Bendsoe, M. P., Kikuchi, N. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* 1988. Vol. 7. Pp. 197–224.

3. Bashin K. A., Torsunov R. A., Semenov S. V. Methods of Topological Optimization of Structures Used in the Aerospace Industry // Bulletin of PNIPU. Aerospace Engineering. 2017. No. 4 (51). Pp. 51–61. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-topologicheskoy-optimizatsii-konstruktsiy-primenyayuschiesya-v-aerokosmicheskoy-otrasli> (accessed: 03.06.2025).
4. Kosykh Pavel Andreevich, Azarov Andrey Valerevich. Theory and Analysis of Topological Optimization Methods // Engineering Journal: Science and Innovation. 2023. No. 4 (136). P. 20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-i-analiz-metodov-topologicheskoy-optimizatsii> (accessed: 01.07.2025).
5. Makhmutov R. G., Kutlugallyamov G. G., Garifullin V. I. Topological Optimization of an Aircraft Engine Bracket in ANSYS Mechanical // Forum of Young Scientists. 2019. No. 12 (40). Pp. 518–524. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/topologicheskaya-optimizatsiya-kronshteyna-aviadvigatelya-v-ansysmechanical> (accessed: 01.07.2025).
6. Sorokin Dmitry Vladimirovich, Babkina Lyudmila Alekseevna, Brazgovka Olga Vladimirovna. Design of Structural Elements for Various Purposes Based on Topological Optimization // Spacecraft and Technologies. 2022. No. 2 (40). Pp. 61–82. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-elementov-konstruktsiy-razlichnogo-naznacheniya-na-osnove-topologicheskoy-optimizatsii> (accessed: 01.07.2025).
7. Larin V. V. Theory of Motion of All-Wheel-Drive Wheeled Vehicles. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2010. – 391 p.
8. Designerdata.nl. Polyamide 11 [Electronic resource]. URL: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polyamide-11> (accessed: 01.07.2025).
9. Maas S. A., Ellis B. J., Rawlins D. S., Weiss J. A. Finite Element Simulation of Articular Contact Mechanics with Quadratic Tetrahedral Elements. J Biomech.

2016 Mar 21;49(5):659–667. doi: 10.1016/j.jbiomech.2016.01.024. Epub 2016 Feb 6. PMID: 26900037; PMCID: PMC4801678.

10. Quadrant. Catalog of Engineering Plastics [Electronic resource]. – Minsk: LLC “Ftorotech”, 2020. – 68 p. – URL: <https://www.ftorotex.by/upload/iblock/0b8/Каталог%20конструкционных%20пластмасс%20QUADRANT.pdf>, open access. (Accessed: 30.06.2025).