



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-20-26

УДК 629.1

Научная статья

## Топологическая оптимизация детали «Серьга»

Н.В. Камардина, Р.М. Гусейнов, И.К. Данилов, В.Н. Коноплёв, К.А. Иванов, А.С. Жарко, Г.М. Полищук

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

### История статьи:

Поступила в редакцию: 22 апреля 2020 г.

Доработана: 14 мая 2020 г.

Принята к публикации: 15 мая 2020 г.

### Ключевые слова:

аддитивные технологии, топологическая оптимизация, деталь «Серьга», САПР

Последние десятилетия активного развития компьютерных технологий и программного обеспечения, к примеру системы автоматизированного проектирования (САПР), инновационные машиностроительные предприятия уменьшают вес и трудоемкость изготовления деталей, а также поднимают надежность и качество своих изделий. Учитывая различные требования спроса потребителей, передовые компании при проектировании используют технологию топологической оптимизации. Популярность данного метода для эффективного проектирования изделий быстро растет благодаря непрерывно увеличивающимся вычислительной мощности компьютеров и возможностям программ. В настоящее время некоторые программы имеют модуль топологической оптимизации, который позволяет проектировать модель изделия с нуля, указав лишь параметры рабочих поверхностей детали. С помощью этого модуля также можно оптимизировать конструкцию, снизив вес исходного тела в рамках граничных условий (при этом сохранить деформацию, прочность исходной детали и т. д.). На выходе чаще всего образуется сложная объемная конструкция. В настоящем исследовании на примере детали «Серьга» топологическая оптимизация применялась для решения следующей задачи: при сохранении прочностных характеристик уменьшить массу изделия относительно прототипа и после проведения проверочного расчета выполнить анализ проделанной работы, дав оценку данной методике.

## Введение

Использование метода топологической оптимизации для эффективного проектирования изде-

лий быстро растет, благодаря непрерывно возрастающим вычислительной мощности компьютеров и возможностям программ. Одна из первых отраслей, которая начала применять данную технологию в разработках, – аэрокосмическая промышленность. Но со временем и другие области, такие как автомобильная, нефтегазовая, военная промышленность, которым требуются легкие и надежные детали, начали использовать имеющиеся технологии и возможности. В статье Д.Д. Попова, Н.А. Самойленко, С.В. Семенов, А.А. Балакирев, А.Ю. Головкин «Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД» авторы пишут: «Топологическая оптимизация – это численный метод, который позволяет изменить форму рассматриваемого элемента или объекта путем изменения его геометрии. Данный метод является математической задачей,

Камардина Наталья Валерьевна, студентка департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, 1032142655@rudn.ru

Гусейнов Руслан Мукайлович, аспирант департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Данилов Игорь Кеворкович, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7142-7461>, Scopus Author ID: 57210770802, eLIBRARY SPIN-код: 1633-2700, AuthorID: 659686.

Коноплёв Владимир Николаевич, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1662-6254>, Scopus Author ID: 57206670076, eLIBRARY SPIN-код: 3876-1534, AuthorID: 491560.

Иванов Кирилл Аркадьевич, студент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Жарко Андрей Сергеевич, студент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Полищук Георгий Максимович, профессор департамента механики и механики Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор.

© Камардина Н.В., Гусейнов Р.М., Коноплёв В.Н., Данилов И.К., Иванов К.А., Жарко А.С., Полищук Г.М., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

основная цель которой состоит в поиске распределения материала по площади или объему» [1]. Этот способ позволяет оригинально подойти к проектированию и предложить решения, выходящие за имеющиеся рамки опыта и подхода к проектированию конструктора. Однако главным недостатком данного приема является возможность появления несвязанных между собой объемов исходного тела [1], поэтому инженерный опыт будет всегда востребован для оценки результатов, определения ограничений и выбора оптимальных решений. Одним из благоприятных факторов использования деталей, спроектированных топологической оптимизацией, является эффективное употребление вторичного сырья различных металлов. Уменьшение веса компонентов помогает значительно снизить общую массу изделия, к чему стремится современное машиностроение для того, чтобы поднять экономические характеристики своего товара.

Многие компании боятся использовать такую методику, потому что им не хватает опыта работы с данной технологией и они сомневаются в правильности результатов. Поэтому основной целью является предоставление знаний о теоретических основах использования топологической оптимизации и информации о том, как выполнить оптимизацию с помощью коммерческого программного обеспечения моделирования ANSYS. Цель также состоит в том, чтобы выполнить расчетное исследование изменения жесткости конструктивно подобно маятника «Серьга» подвески мотоцикла путем уменьшения массы детали с помощью SIMP-метода (Solid Isotropic Material with Penalization) топологической оптимизации [1], а также в оценке простоты использования.

## 1. Теория топологической оптимизации

Топологическая оптимизация – это мощный метод оптимизации для оценки и расширения пространственных решений и повышения креативности при проектировании и определении размеров несущих конструкций, направленный на поиск оптимально использованного материала в заданном расчетном пространстве, которое отвечает указанным требованиям по жесткости, перемещению и граничным условиям. Иными словами, топологическая оптимизация направлена на поиск оптимально нагруженного материала для назначенной нагрузки и граничных условий. Для расчета используют метод конечных элементов. Суть данного подхода заключается в том, что каждому ко-

нечному элементу присваивается относительная плотность, несущая вклад в общую матрицу жесткости. Решением задачи топологической оптимизации в данных условиях является распределение условной плотности в области проектирования [2].

Существует несколько видов ограничений при топологической оптимизации: по прочностным характеристикам, по объему, по податливости, по перемещению, а также по их сочетаниям.

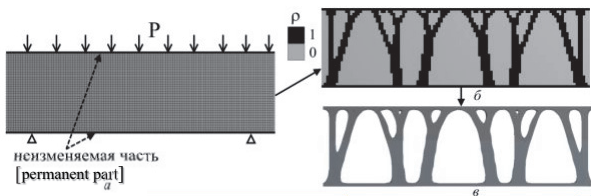
Задачи процесса топологической оптимизации можно разделить на несколько условных этапов:

- составление технических требования к изделию;
- формулирование концепции конструкции детали;
- топологическая оптимизация детали по поставленному техническому требованию;
- прочностной расчет полученной конструкции, учитывая нагрузки и технические требования, включая анализ технологичности изготовления детали (нередко оптимизированные детали невозможно или дорого изготовить, в этом случае может помочь ввод дополнительных ограничений на оптимизацию детали);
- анализ окончательной оптимальной конструкции.

Существует проблема решений оптимизации. Если рассматривать любую точку в заданном пространстве с учетом дискретности используемых математических моделей, то в ней либо есть материал, либо он отсутствует. В результате чего страдает процесс оптимизации. Для решения этой проблемы современные программы используют алгоритм промежуточной плотности. Часто применяется готовое решение педализации для твердого изотропного тела – SIMP [2]. Этот метод связывает плотность тела с модулем упругости тела, благодаря чему помогает решить вышеупомянутую проблему [3–6].

При топологической оптимизации «Серьги» в граничных условиях будут изменены не только масса и объем тела, но и форма. В качестве образца применения принципа топологической оптимизации на рис. 1 изображен пример определения оптимальной конструкции опоры, нагруженной распределенной нагрузкой с минимальной массой. На рис. 1, а показаны граничные условия, нагрузки, а также области проектирования и неизменяемых частей модели. На рис. 1, б приведено распределение условной плотности, соот-

ветствующей минимальной потенциальной энергии деформирования, где темным цветом выделены зоны, условная плотность которых соответствует 1, светлым – со значениями условной плотности близкими к 0 (эта величина всегда положительна). На рис. 1, в продемонстрирована полученная итоговая модель [2].



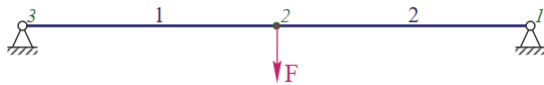
**Рис. 1.** Постановка задачи топологической оптимизации (а), распределение условной плотности (б) и полученная твердотельная модель (в) [2]  
**[Figure 1.** Statement of the topological optimization problem (a), conditional density distribution (б), and the resulting solid-state model (в) [2]]

Подробное описание методов топологической оптимизации можно найти в статьях [2; 6–12].

## 2. Топологическая оптимизация конструкции детали «Серьга»

Задача исследования – разработать модель детали «Серьга» облегченной оптимизированной формы для тестового испытания с минимальной массой и сохранением прочностных характеристик.

К центральному отверстию детали прикладывалась нагрузка ( $F$ ) размером 750 Н, при этом два крайних отверстия (1, 3) жестко закреплены (рис. 2.)



**Рис. 2.** Распределение нагрузки  
**[Figure 2.** The load distribution]

Работы по оптимизации выполняются в три этапа:

1) прочностной расчет «Серьги» под заданную нагрузку и заключение о возможности ее оптимизации по массе (в случае положительного заключения осуществляются топологическая оптимизация компоновочного объема и разработка САД-модели);

2) прочностной расчет разработанной детали и доработка (если это необходимо);

3) проверочный прочностной расчет доработанного рычага.

В ходе исследования была разработана модель «Серьги» в САД-системе с применением технологии топологической оптимизации (образец 2) и облегчением путем удаления материала (образец 1) (рис. 3).

В качестве материала для изготовления компонента рассматривался пластик полиамид PA12-L 1600, механические свойства которого приведены в таблице.

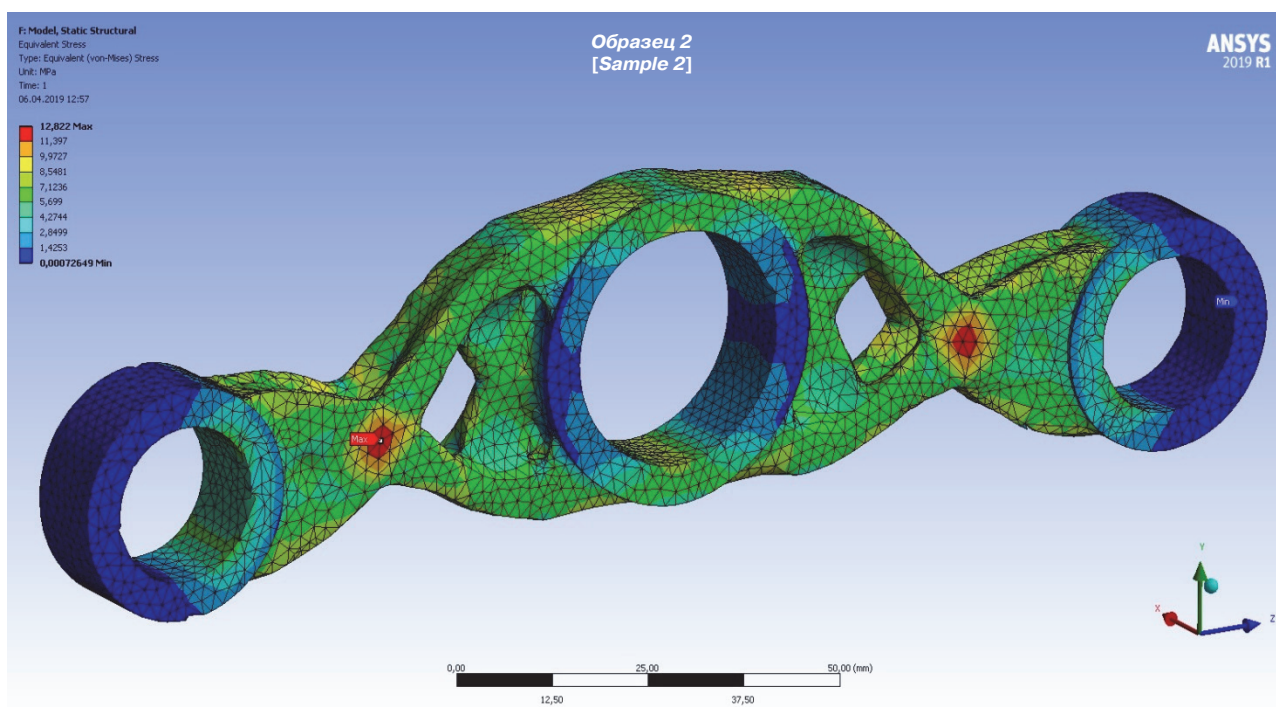
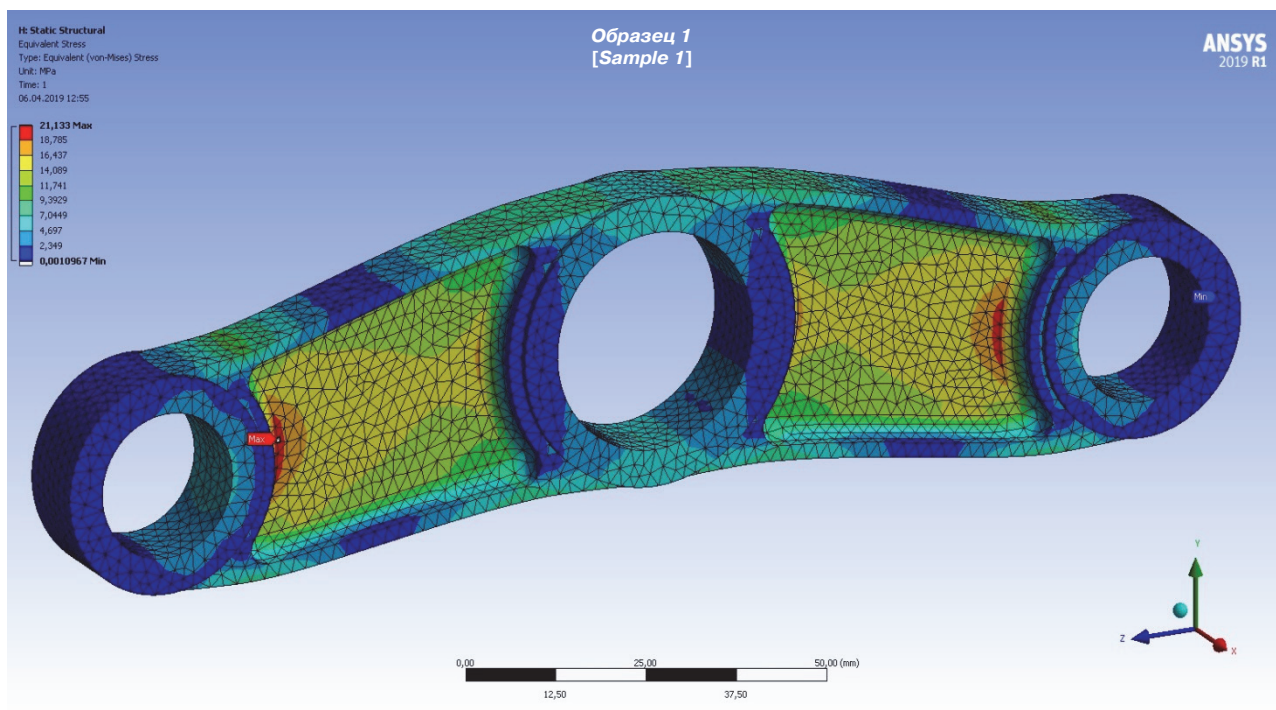
Таблица

**Механические свойства пластика полиамида PA12-L 1600 [13]**  
**[Table. Mechanical properties of plastic polyamide PA12-L 1600 [13]]**

Свойства [Properties]	Значения [Values]
Плотность, кг/м <sup>3</sup> [Density of parts, kg/m <sup>3</sup> ]	950
Предельная плотность, МПа [Tensile strength, MPa]	46
Модуль упругости при изгибе, МПа [Flexural modulus, MPa]	1300
Модуль упругости при растяжении, МПа [Tensile modulus, MPa]	1602
Прочность на изгиб, МПа [Flexural strength, MPa]	46,3
Предел прочности, МПа [Tensile strength, MPa]	46
Удлинение при разрыве [Elongation break]	не менее 36 %



**Рис. 3.** Исходная модель исследуемой «Серьги»  
**[Figure 3.** Initial model of the investigated “Earring”]



**Рис. 4.** Результаты топологической оптимизации исследуемой «Серьги» [14]  
[Figure 4. Results of topological optimization of the investigated “Earring” [14]]

По результатам топологической оптимизации, представленным на рис. 4, смещения при нагрузке 750 Н удовлетворяют требованиям. Жесткость в оптимизированной детали сохранилась,

а напряжение уменьшилось. Выигрыш в массе составляет 24 %, при этом прочность возросла в 25 %. Таким образом, оптимизация считается успешной.

## Заключение

В статье была отражена тема топологической оптимизации с базовой теорией и практическим применением в программной среде ANSYS. Использование данной методики для разработки детали может показаться, на первый взгляд, не вполне понятным из-за трудных математических алгоритмов, предназначенных для сложных деталей и узлов. Однако приведенный в статье наглядный пример приложения этой технологии в будущем поможет другим специалистам использовать данные навыки в своей работе. Применение методики топологической оптимизации позволяет уменьшить массу детали при сохранении ее жесткостных и прочностных характеристик [1]. Анализ полученных результатов показал пригодность применения топологической оптимизации при проектировании детали «Серьга»; более того, методика помогла существенно повысить характеристики детали.

Объединение новых подходов к проектированию и технологий производства, наряду с использованием новых материалов, может способствовать существенному повышению характеристики деталей, узлов и изделий в целом [2; 15].

## Список литературы

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. Ч. 1. С. 42–51.
2. Васильев Б.Е., Магеррамов Л.А. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 3. Ч. 1. С. 139–147.
3. Bendsoe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods and applications. Springer-Verlag, 2003. Pp. 370–375.
4. Боровиков А.А., Тененбаум С.М. Топологическая оптимизация переходного отсека КА // Аэрокосм. науч. журн. 2016. № 5. С. 16–30.
5. Французов А.В., Шаповалов Я.И., Вдовин Д.С. Применение метода топологической оптимизации в задачах проектирования грузоподъемной техники // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2 (42). С. 99–108.

6. Шестаков Д. Применение Generative Design для оптимизации конструкции кронштейна авиадвигателя // Аддитивные технологии. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/primenenie-generative-design-dlya-optimizacii-konstrukcii-kronshteyna-aviadvigatelya> (дата обращения: 12.06.2019 г.).

7. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 51–61.

8. Кротких А.А., Максимов П.В. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 1 (55). С. 91–94.

9. Bruns T. A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid – void topology optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2005, December. Vol. 30. Pp. 428–436.

10. Jiao H., Zhou Q., Fan S., Li Yu. A new hybrid topology optimization method coupling ESO and SIMP method // Lecture Notes in Electrical Engineering Proceedings of China. Modern Logistics Engineering, 2014. Pp. 373–384.

11. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches – a comparative review// Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013, December. Vol. 48. Pp. 1031–1055.

12. Koga J., Koga J., Homma S. Checkerboard problem to topology optimization of continuum structures. Saitama: Saitama University, 2013. Pp. 10–15.

13. Prodways Group. URL: <https://www.prodways.com> (дата обращения: 21.03.2020 г.).

14. Ansys. URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения: 28.03.2020 г.).

15. Максимов П.В., Фетисов К.В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 9 (51). Ч. 2. С. 58–60.

## Для цитирования

Камардина Н.В., Гусейнов Р.М., Данилов И.К., Коноплев В.Н., Иванов К.А., Жарко А.С., Полищук Г.М. Топологическая оптимизация детали «Серьга» // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 20–26. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-20-26>

## Topological optimization of the “Earring” element

Natalia V. Kamardina, Ruslan M. Guseynov, Igor K. Danilov,  
Vladimir N. Konoplev, Kirill A. Ivanov, Andrey S. Zharko, Georgy M. Polishchuk

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

### Article history:

Received: April 22, 2020

Revised: May 14, 2020

Accepted: May 15, 2020

### Keywords:

additive technologies, topological optimization, “Earring” element, CAD

In recent decades, computer technologies and software such as computer-aided design (CAD) have been actively developing. Thanks to this, modern machine-building enterprises increase the reliability and quality of their products while reducing their weight and complexity of manufacturing. In order to meet numerous requirements, leading companies are increasingly using topological optimization tools at various design stages. The use of this method for effective product design is growing rapidly, due to the continuously increasing computing power of computers and software capabilities. Modern software for topological optimization allows to design the shape of the part from scratch, setting only the conditions for fixing and touching surfaces, and also allows to improve existing structures by reducing their weight based on the set restrictions (equal strength with the original part, equal deformation, preservation of natural frequency, etc.). However, the result of topological optimization is often a complex spatial structure. Using the example of the “Earring” element, a topological optimization of the structure was performed to ensure that the strength requirements were met and that the minimum mass was obtained. As a result of optimization, the design of a reduced weight compared to the prototype is obtained. The results of the verification calculation showed the sufficiency of the values of the strength reserves of the final design of the “Earring”.

### References

1. Popova DD, Samoilenko NA, Semenov SV, Bakirev AA, Golovkin AYu. Primenenie metoda topologicheskoi optimizatsii dlya umen'sheniya massy konstruktivno podobnogo kronshteina truboprovoda aviatsionnogo GTD [Pipeline aviation gas turbine engine]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of PNIPU. Aerospace Engineering]*. 2018;(55–1):42–51. (In Russ.)

2. Vasiliev BE, Maharramov LA. Analiz vozmozhnosti primeneniya topologicheskoi optimizatsii pri proektirovani neokhlazhdaemykh rabochikh lopatok turbin [Analysis

of the possibilities of applying topological optimization in the design of uncooled turbine blades]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University]*. 2015;14(3–1): 139–147. (In Russ.)

3. Bendsoy MP, Sigmund O. *Optimization of topology: theory, methods and applications*. Springer Verlag; 2003. p. 370–375.

4. Borovikov AA, Tenenbaum SM. Topologicheskaya optimizatsiya perekhodnogo otseka KA [Topological optimization of the spacecraft transition compartment]. *Aerokosmicheskii nauchnyi zhurnal [Aerospace Scientific Journal]*. 2016;(5):16–30. (In Russ.)

5. Frantsuzov AV, Shapovalov YI, Vdovin DS. Primenenie metoda topologicheskoi optimizatsii v zadachakh proektirovaniya gruzopod"emnoi tekhniki [Application of the method of topological optimization in the problems of designing lifting equipment]. *Izvestiya vuzov. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki [News of universities. Volga region. Technical science]*. 2017;2(42):99–108. (In Russ.)

6. Shestakov D. Primenenie Generative Design dlya optimizatsii konstruktivno kronshteina aviadvigatelya [Application of Generative Design to optimize the design of the aircraft engine bracket]. *Additivnye tekhnologii [Additive technologies]*. Available from: <https://additiv-tech.ru/publications/primeneniye-generative-design-dlya-optimizatsii->

*Natalia V. Kamardina*, student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University, 1032142655@rudn.ru  
*Ruslan M. Guseynov*, postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University.

*Igor K. Danilov*, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7142-7461>, Scopus Author ID: 57210770802, eLIBRARY SPIN-code: 1633-2700, AuthorID: 659686.

*Vladimir N. Konoplev*, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1662-6254>, Scopus Author ID: 57206670076, eLIBRARY SPIN-code: 3876-1534, AuthorID: 491560.

*Kirill A. Ivanov*, student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University.

*Andrey S. Zharko*, student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University.

*Georgy M. Polishchuk*, Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor.

konstrukcii-kronshteyna-aviadvigatelya (accessed: June 12, 2019). (In Russ.)

7. Bashin KA, Torsunov RA, Semenov SV. Metody topologicheskoi optimizatsii konstruksii, primenyayushchiesya v aerokosmicheskoi otrasli [Methods of topological optimization of structures used in the aerospace industry]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering]*. 2017;(51):51–61. (In Russ.)

8. Krotkikh AA, Maksimov PV. Issledovanie i modifikatsiya metoda topologicheskoi optimizatsii SIMP [Research and modification of parameters of topological optimization SIMP]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Scientific Researcher Journal]*. 2016; 1(55):91–94. (In Russ.)

9. Bruns T. A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid – void topology optimization. *Structural and interdisciplinary optimization*. 2005;30:428–436.

10. Jiao H, Zhou Q, Fan S, Li Yu. A new hybrid methodology for optimizing topology, combining the ESO and SIMP method. *Lecture Notes in Electrical Engineering Proceedings of China*. Modern Logistics Engineering; 2014. p. 373–384.

11. Sigmund O, Maut K. Optimization of the structure topology approaches: a comparative review. *Structural and interdisciplinary optimization*. 2013;48:1031–1055.

12. Koga J, Koga J, Homma S. *The task of a chessboard to optimize the topology of continuum structures*. Saitama, Japan: University of Saitama; 2013. p. 10–15.

13. Prodways Group. Available from: <https://www.prodways.com> (accessed: March 21, 2020).

14. Ansys. Available from: <https://www.ansys.com> (accessed: March 28, 2020).

15. Maksimov PV, Fetisov KV. Analiz metodov dorabotki konechno-elementnoi modeli posle topologicheskoi optimizatsii [Analysis of the methods of refinement of the finite element model after topological optimization]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Scientific Researcher Journal]*. 2016;9(51–2): 58–60. (In Russ.)

#### For citation

Kamardina NV, Guseynov RM, Danilov IK, Konoplev VN, Ivanov KA, Zharko AS, Polishchuk GM. Topological optimization of the “Earring” element. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):20–26. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-20-26> (In Russ.)