Ежов, А.Д. Оценка влияния технологии аддитивного изготовления топологически оптимизированных изделий из фотополимерных смол на анизотропию их механических свойств / А.Д. Ежов, И.В. Котович, В.П. Киселёв // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 2. – С. 16–23. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.02

Perm Polytech Style: Ezhov A.D., Kotovich I.V., Kiselev V.P. Influence of additive manufacturing technology of topologically op-timized products from photopolymer resins on the anisotropy of their mechanical properties. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 2, pp. 16-23. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.02

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 2, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.02
УДК 620.172:539.424

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ НА АНИЗОТРОПИЮ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

А.Д. Ежов, И.В. Котович, В.П. Киселёв

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 10 ноября 2023 г.
Одобрена: 10 апреля 2024 г.
Принята к публикации:
21 мая 2024 г.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, прочность, топологическая оптимизация, анизотропия, механические свойства, испытания на разрушение, SolidWorks, ANSYS.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается задача обеспечения прочности и минимальной массы при конструировании изделий, производимых с использованием аддитивных технологий. Авторы исследовали возможность применения топологической оптимизации в системах автоматизированного проектирования для создания оптимизированной модели с необходимой прочностью при минимальной массе. В рамках работы проведена топологическая оптимизация кронштейна, изготовление его образцов методами аддитивного производства и прочностные испытания. Процесс определения оптимальных значений проводился с помощью конечно-элементного анализа посредством программного обеспечения SolidWorks и ANSYS. Результаты расчета показывают, что оптимизированная модель сохраняет около 20 % массы исходной и обладает необходимыми механическими характеристиками. В частности, избыточный запас прочности снижен в 2,5 раза, что является приемлемым для данного кронштейна. Последующая верификация моделей проводится через испытания на разрушение изделий, произведенных по аддитивным технологиям – методом наплавления нити и стереолитографией. Для учета анизотропии материала была изготовлена серия образцов, ориентированных под разными углами к направлению построения. Испытания проводились на испытательном стенде для одновременного двухосного растяжения, что соответствует проектным нагрузкам на кронштейн. Увеличение растягивающей нагрузки на образец осуществлялось до его разрушения. В ходе работы выявлено наличие анизотропии механических свойств, а также исследованы результаты оптимизации в различных программных пакетах. Результаты прочностных испытаний позволяют сделать два вывода. Во-первых, в связи с анизотропией материала прочностные свойства значительно зависят от ориентации кронштейна при аддитивном изготовлении. Во-вторых, кронштейн, оптимизированный посредством программного пакета SolidWorks, в целом показал лучшие прочностные свойства для различных ориентаций при изготовлении. Также, что вполне ожидаемо, образцы, полученные стереолитографией, показали меньшую анизотропию, чем образцы, полученные методом наплавления нити. В заключение отметим, что применение аддитивных технологий для создания оптимизированных форм требует учета технологии печати и анизотропии свойств, а также выбора соответствующего программного обеспечения.

© **Ежов Алексей Дмитриевич** – к. т. н., доц., инженер каф. 204 «Авиационно-космическая теплотехника», e-mail: ezhovad@mai.ru.
Котович Илья Всеволодович – асп. каф. 602 «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий», e-mail: kotovichiv@mai.ru.
Киселёв Владимир Павлович – асс. каф. 204 «Авиационно-космическая теплотехника», e-mail: kiseljovvp@mai.ru.

Alexey D. Ezhov – PhD in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Aerospace Thermal Engineering, e-mail: ezhovad@mai.ru.
Ilya V. Kotovich – Postgraduate, Department of Design and Durability of Aviation, Rocket and Space, e-mail: kotovichiv@mai.ru.
Vladimir P. Kiselev – Assistant, Department of Aerospace Thermal Engineering, e-mail: kiseljovvp@mai.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

INFLUENCE OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF TOPOLOGICALLY OPTIMIZED PRODUCTS FROM PHOTOPOLYMER RESINS ON THE ANISOTROPY OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES

A.D. Ezhov, I.V. Kotovich, V.P. Kiselev

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 10 November 2023
Approved: 10 April 2024
Accepted for publication:
21 May 2024

Keywords:

additive technologies, strength, topological optimization, anisotropy, mechanical properties, fracture testing, SolidWorks, ANSYS.

ABSTRACT

This article discusses the problem of ensuring strength and minimum mass in the design of products manufactured using additive technologies. The authors investigated the possibility of using topological optimization in computer-aided design systems to create an optimized model with the necessary strength at a minimum weight. As part of the work, the topological optimization of the bracket, the production of its samples by additive manufacturing methods and strength tests were carried out. The optimal values were found via finite element analysis using the SolidWorks and ANSYS software. The calculation results show that the optimized model retains about 20 % of the original mass and has the necessary mechanical characteristics. In particular, the excess safety margin is reduced by 2.5 times, which is acceptable for this bracket. The subsequent verification of the models is carried out through destruction tests of the products manufactured using additive technologies, i.e. the method of filament deposition and stereolithography. To account for the anisotropy of the material, a series of samples oriented at different angles to the direction of construction was made. The tests were carried out on a test bench for simultaneous biaxial stretching, which corresponds to the design loads on the bracket. An increase in the tensile load on the sample was carried out before its destruction. In the course of the work, the presence of anisotropy of mechanical properties was revealed, and optimization results in various software packages were studied. The results of strength tests allow us to draw two conclusions. Firstly, due to the anisotropy of the material, the strength properties significantly depend on the orientation of the bracket during additive manufacturing. Secondly, the bracket, optimized by means of the SolidWorks software package, generally showed the best strength properties for various orientations during manufacturing. Also, which is quite expected, the samples obtained by stereolithography showed less anisotropy than the samples obtained by the method of filament deposition. In conclusion, it is noted that the use of additive technologies to create optimized forms requires considering printing technologies and anisotropy of properties, as well as the choice of appropriate software.

Введение

Задача обеспечения прочности и минимальной массы является одной из важнейших и актуальных проблем при конструировании сложных систем [1; 2]. Практически в любой сфере промышленного производства существует тенденция использования наиболее современных и прогрессивных методов изготовления различных изделий, что связано со стремлением не только повысить надежность и качество изготавливаемой продукции, но и снизить ее стоимость и ресурсоемкость. Аддитивные технологии, в отличие от традиционных, являются экономически выгодными и ресурсоэффективными способами изготовления, поскольку представляют собой методы производства, основанные на поэтапном формировании изделия путем послойного наращивания материала на основу [3–5]. В случае же традиционного производства возникает необходимость либо в отсечении всего «лишнего» у заготовки для будущего изделия, если используется обработка резанием, либо в создании форм для литья или штампов для штамповки [6–8]. При этом на данные способы накладываются существенные ограничения на сложность геометрии деталей, а процессы изготовления проигрывают и в ресурсоемкости, и в трудоемкости. С помощью аддитивных технологий появляется возможность избавиться от этих недостатков, поскольку материал расходуется более рационально, нет необходимости в создании дополнительных форм и штампов и, зачастую, отсутствует необходимость в проведении финишной обработки готового изделия. Более того, такой метод производства практически не ограничивается сложностью геометрии изготавливаемого тела. В роли материала печати может выступать как металлы, так и неметаллы [9–11].

При печати пластиком наиболее распространены две технологии: послойное наплавление пластмассовой нити (FDM) и стереолитография (SLA). У этих методик есть общая особенность, вызванная тем, что процесс печати осуществляется послойным наращиванием и это неизбежно вызывает анизотропию механических свойств [12–18].

1. Выбор модели для анализа, расчет механических характеристик

В рамках данной работы проводилась топологическая оптимизация кронштейна (рис. 1). Топологическая оптимизация дает существенное снижение массы при сохранении или умеренном снижении прочности и жесткости, что особенно важно в авиационной технике [19–22].

Образцы кронштейна были изготовлены посредством аддитивных технологий FDM и SLA с использованием топологической оптимизации в системах автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks и ANSYS. Целью исследования являлось проведение сравнительного анализа характеристик как исходной заготовки и полученной оптимизированной детали, так и характеристик оптимизированных деталей, полученных в рассмотренных САПР.

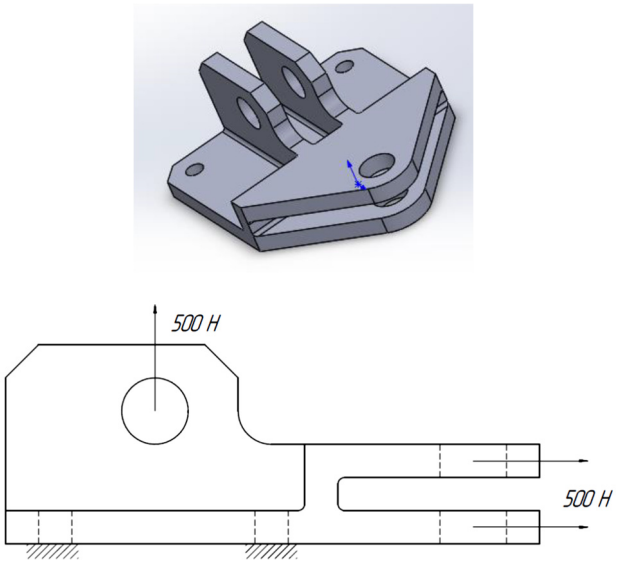


Рис. 1. Исходная модель кронштейна и схема силового нагружения

Fig. 1. Initial model of the bracket and force loading diagram

После создания конечно-элементной модели и установки граничных условий получено поле напряжений фон Мизеса в конструкции исходного кронштейна (рис. 2).

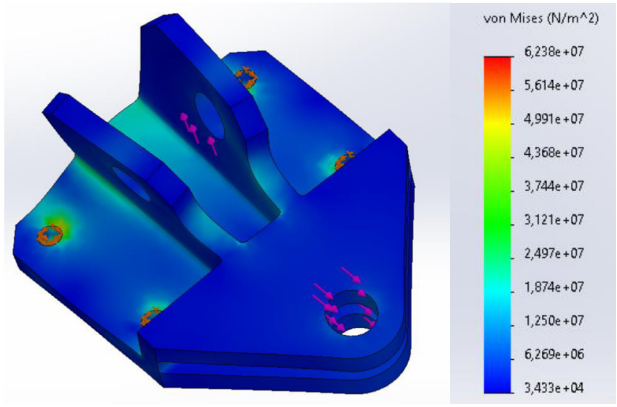


Рис. 2. Поле напряжений в конструкции исходного кронштейна (масштаб деформаций 1:121,42)

Fig. 2. Stress field in the design of the original bracket (deformation scale 1:121.42)

Расчет исходной конструкции в программном пакете SolidWorks показал:

– коэффициент запаса прочности изделия – 4,4;

– предел текучести по фон Мизесу – $2{,}75 \cdot 10^8$ Н/м^2;

– максимальное возникающее перемещение – $8{,}681 \cdot 10^{-3}$ мм;

– деформация – $1{,}751 \cdot 10^{-4}$ мм.

Современные средства проектирования позволяют не только проводить исследования и расчеты на прочность деталей различной геометрии, а также прогнозировать степень их деформирования, но и содержат в себе программные алгоритмы оптимизации. В инженерной практике для этих целей применяются такие программные продукты, как ANSYS и SolidWorks [23–27]. В общем случае из модели-заготовки удаляются лишние части конструкции, отсутствие которых практически не изменяет жесткость исходного тела. В результате работы такого алгоритма формируется оптимизированная модель сложной геометрии, которая будет отвечать требованиям жесткости и прочности при минимальной массе, но при этом будет сложна в изготовлении традиционными методами, а значит, потребует применения аддитивных технологий в производстве [28].

После ввода всех ограничений и наложения условий, а также после создания сеточной модели итерационное проектирование исследуемого компонента продолжается до достижения необходимой точности при заданных ограничениях. В случае топологической оптимизации рассмотренного кронштейна осуществлено 76 итераций, в результате которых определены оптимальные значения жесткости и массы [3, 29, 30]. В результате оптимизации получается совершенно новая модель, сгенерированная алгоритмом, которая сохранила 20 % своей первоначальной массы (рис. 3).



Рис. 3. Конечно-элементная модель оптимизированной детали

Fig. 3. Finite element model of the optimized part

Результаты прочностного расчета в программном пакете SolidWorks:

– коэффициент запаса прочности изделия – 1,4;

– предел текучести по фон Мизесу – $2{,}75 \cdot 10^8$ Н/м^2;

– максимальное возникающее перемещение – 1,316 мм;

– деформация – $2{,}772 \cdot 10^{-2}$ мм.

Для валидации результатов топологической оптимизации аналогичным образом проводилось исследование

в системе инженерного анализа ANSYS, где за основу взята модель кронштейна, нагруженная силами в узлах крепления согласно схеме силового нагружения (рис. 1). В результате оптимизации получена модель, сгенерированная алгоритмом, которая сохранила 20 % своей первоначальной массы (рис. 5).

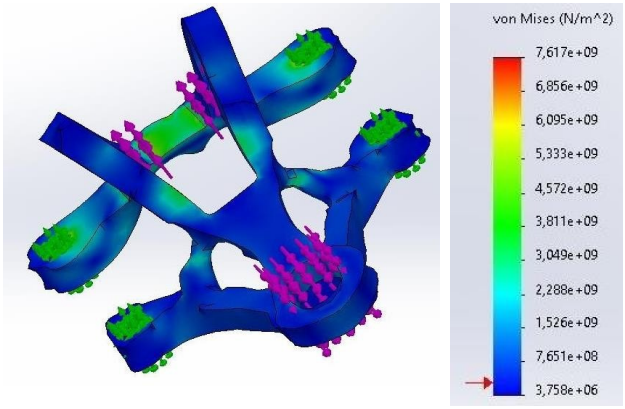


Рис. 4. Поле напряжений в конструкции оптимизированного кронштейна (масштаб деформаций 1:7,7053)

Fig. 4. Stress field in the design of an optimized bracket (deformation scale 1:7.7053)

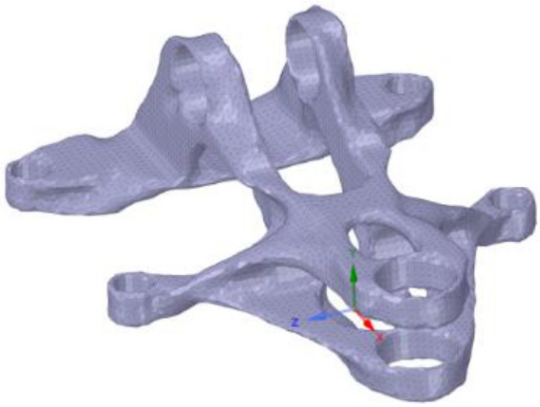


Рис. 5. Геометрическая модель оптимизированной детали в системе инженерного анализа ANSYS

Fig. 5. Geometric model of an optimized part in the ANSYS engineering analysis system

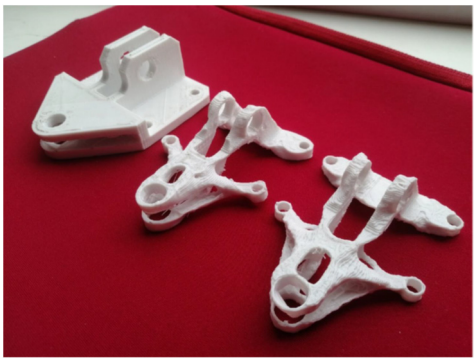
2. Верификация результатов и исследование анизотропии механических свойств

Для верификации результатов, полученных численным моделированием в программных пакетах SolidWorks и ANSYS, проведены статические испытания на разрушение кронштейнов. Детали кронштейнов изготовлены с применением аддитивных технологий FDM и SLA (рис. 6).

Поскольку процесс аддитивной печати – это послойный процесс изготовления детали, то для оценки технологически обусловленной анизотропии механических свойств изделия, изготовлены несколько образцов, которые были установлены под разными углами к подложке в процессе печати (рис. 7).



a



b

Рис. 6. Детали кронштейнов изготовлены с применением аддитивных технологий SLA (*a*) и FDM (*b*)

Fig. 6. Bracket parts are manufactured using additive technologies SLA (*a*) and FDM (*b*)

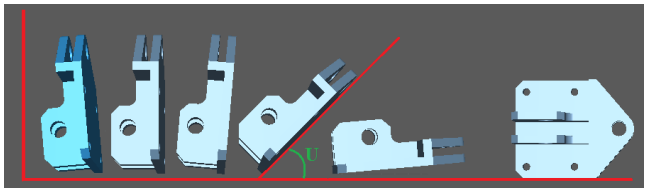


Рис. 7. Варианты углов печати кронштейна

Fig. 7. Options for bracket printing angles

Испытания на разрушение кронштейнов выполнены на специально разработанном и изготовленном стенде для малонагруженного двухосного растяжения. Кронштейн фиксировался при помощи четырех болтов к раме стенда, далее происходило плавное статическое нагружение в двух направлениях. Фиксация роста нагрузки осуществлялась про помощи тензодатчиков и видеозаписи эксперимента.

Для испытаний изготовлены от 3 до 9 кронштейнов каждого типа и для каждого угла печати. Осредненные результаты испытаний представлены в табл. 1, 2.

Результаты испытаний, а также характер форм разрушения кронштейнов (рис. 8) говорят о наличии существенной анизотропии свойств. В первую очередь это связано с особенностями послойного построения изделия методом SLA и направленной укладки нити при использовании метода FDM.

Результаты испытаний и формы разрушения оптимизированного кронштейна в программных пакетах Solidworks и ANSYS представлены в табл. 3 и на рис. 9 и свидетельствуют о существенных различиях в методах топологической оптимизации, применяемых в данных САПР.

Таблица 1

Результаты испытания исходного кронштейна, изготовленного по технологии SLA

Table 1

Test results of the original bracket manufactured using SLA technology

Параметр	Значение					
Угол	5°	45°	85°	90°	⊥90°	⊥95°
Масса, г	48,61	47,39	47,47	47,09	47,61	47,81
Разрушающая нагрузка, кгс	194,4	206,2	202,2	191,9	108,0	85,8
Запас прочности	3,8	4,03	3,95	3,75	2,11	1,68

Таблица 2

Результаты испытания исходного кронштейна, изготовленного по технологии FDM

Table 2

Test results of the original bracket manufactured using FDM technology

Параметр	Значение				
Угол	0°	45°	90°	⊥45°	⊥90°
Масса, г	46,66	46,02	47,65	47,17	47,58
Разрушающая нагрузка, кгс	47,8	132,6	227,7	98,8	85,2
Запас прочности	0,93	2,59	4,45	1,93	1,66



a *b*

Рис. 8. Формы разрушения кронштейна, изготовленного методом SLA (*a*) и FDM (*b*)

Fig. 8. The forms of destruction of the bracket made by the SLA (*a*) and FDM (*b*) method

Таблица 3

Результаты испытания оптимизированного кронштейна SolidWorks/ANSYS

Table 3

SolidWorks/ANSYS optimized bracket test results

Параметр	Значение											
Угол	5°		45°		85°		90°		⊥90°		⊥95°	
САПР для оптимизации (SolidWorks / ANSYS)	SW	AN	SW	AN	SW	AN	SW	AN	SW	AN	SW	AN
Масса, г	11,61	10,85	11,47	10,84	11,41	10,84	11,41	10,72	11,41	10,65	11,63	10,88
Разрушающая нагрузка, кгс	57,3	48,93	69,8	53,6	90,7	56,2	87,22	62,33	85,13	66,38	52,13	53,9
Запас прочности	1,12	0,96	1,37	1,05	1,77	1,1	1,71	1,22	1,66	1,3	1,02	1,05



a *b*

Рис. 9. Формы разрушения оптимизированного кронштейна Solidworks (*a*) и ANSYS (*b*)

Fig. 9. Failure modes of the optimized bracket Solidworks (*a*) and ANSYS (*b*)

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что к применению аддитивных технологий для изготовления топологически оптимизированных форм конструкций нужно подходить весьма аккуратно, учитывая технологию печати и возможную анизотропию механических свойств. Также стоит отметить, что существующие программные пакеты по топологической оптимизации дают существенно различные результаты [23]. Применительно к рассматриваемому кронштейну при снижении массы исходной модели кронштейна в среднем на 80 % модель кронштейна, оптимизированная в пакете SolidWorks, показала лучшие результаты прочностных испытаний в сравнении с моделью, оптимизированной в ANSYS.

Библиографический список

1. Куприянова, Я.А. Формирование конструктивно-технологического решения аэродинамического руля с использованием топологической оптимизации / Я.А. Куприянова, С.Г. Парафесь // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 5.

2. Zhu, L. Light-weighting in aerospace component and system design / L. Zhu, N. Li, P.R.N. Childs // Propulsion and Power Research. – 2018. – Vol. 7, no. 2. – P. 103–119.

3. Косых, П.А. Теория и анализ методов топологической оптимизации / П.А. Косых, А.В. Азаров // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 4.

4. Беседина, К.С. Применение аддитивных технологий при получении изделий из полимерных материалов (обзор) / К.С. Беседина, Н.А. Лавров, В.В. Барсков // Известия СПбГТИ (ТУ). – 2018. – Т. 44, № 70. – С. 56–63.

5. Фролова, А.Б. История, текущее состояние и перспективы развития аддитивных технологий / А.Б. Фролова, А.И. Шигапов // Научные известия. – 2022. – № 29. – С. 198–201.

6. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015.

7. Баева, Л.С. Современные технологии аддитивного изготовления объектов / Л.С. Баева, А.А. Маринин // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 7–12.

8. Аддитивные технологии: учебное пособие / А.И. Рудской, А.А. Попович, А.В. Григорьев, Д.Е. Каледина. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2017. – 251 с.

9. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы.

10. Современные способы переработки термопластов / Г.Н. Петрова, С.А. Ларионов, А.Е. Сорокин, Ю.А. Сапего // Труды ВИАМ. – 2017. – Т. 11, № 59. – С. 56–72.

11. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей / Л.А. Магеррамова, Ю.А. Ножницкий, С.А. Волков, М.Е. Волков, В.Ж. Чепурнов, С.В. Белов, И.С. Вербанов, С.В. Заикин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18, № 3. – С. 83–98.

12. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts / C.S. Lee, S.G. Kim, H.J. Kim, S.H. Ahn // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 187–188. – P. 627–630.

13. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS / S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P.K. Wright // Rapid Prototyping Journal. – 2002. – Vol. 8, no. 4. – P. 248–257.

14. Ziemian, C. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling / C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian // Mechanical Engineering. – 2012. – P. 159–180.

15. Mechanical Anisotropy and Surface Roughness in Additively Manufactured Parts Fabricated by Stereolithography (SLA) Using Statistical Analysis / S.A. Shanmugasundaram, J. Razmi, J. Mian, L. Ladani // Materials. – 2020. – Vol. 13, no. 11.

16. Composite 3D printing for the small size unmanned aerial vehicle structure / A.V. Azarov, F.K. Antonov, M.V. Golubev, A.R. Khaziev, S.A. Ushanov // Composites Part B. – 2019. – No. 169. – P. 157–163.

17. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS / S.H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P.K. Wright // Rapid Prototyping. – 2002. – Vol. 8, no. 4. – P. 248–257.

18. Sælen, R.L. Mechanical behaviour and constitutive modelling of an additively manufactured stereolithography polymer / R.L. Sælen, O.S. Hopperstad, A.H. Clausen // Mechanics of Materials. – 2023. – Vol. 185, no. 104777.

19. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing / G. Shi, C. Guan, D. Quan, D. Wu, L. Tang, T. Gao // Chinese Journal of Aeronautics. – 2020. – Vol. 33, no. 4. – P. 1252–1259.

20. Комаров, В.А. Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы / В.А. Комаров // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, № 2 (24). – С. 191–206.

21. Sigmund, O. Topology optimization approaches: A comparative review / O. Sigmund, K. Maute // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2013. – Vol. 48, no. 6. – P. 1031–1055.

22. Kirthana, S. Finite Element Analysis and Topology Optimization of Engine Mounting Bracket / S. Kirthana, M.K. Nizamuddin // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, no. 9. – P. 19277–19283.

23. Сравнительно-сопоставительное исследование программных комплексов трехмерного численного моделирования путем анализа результатов топологической оптимизации изделий ракетно-космической техники / А.Л. Галиновский, А.С. Филимонов, Ю.В. Баданина, А.И. Долгих // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – Т. 1, № 754. – С. 42–51.

24. Topology optimization of connecting rod using ansys workbench 18.1 / K. Archana, Y. Anantha Reddy, P. Naveena, K. Sai Anusha // Internatioonal Journal of Creative Research Thoughts. – 2020. – Vol. 8, no. 5. – P. 1659–1668.

25. Мягков Л.Л., Чирский С.П. Реализация топологической оптимизации методом BESO в среде ANSYS APDL и ее применение для оптимизации формы шатуна тепловозного дизеля / Л.Л. Мягков, С.П. Чирский // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 11. – С. 38–48.

26. Satya Hanush, S. Topology optimization of aerospace part to enhance the performance by additive manufacturing process / S. Satya Hanush, M. Manjaiah // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 62, no. 14. – P. 7373–7378.

27. Slavov, S. Optimizing Weight of Housing Elements of Two-stage Reducer by Using the Topology Management Optimization Capabilities Integrated in SOLIDWORKS: A Case Study / S. Slavov, M. Konsulova-Bakalova // Machines. – 2019. – Vol. 7, no. 9.

28. Шапошников, С.Н. Проектирование кронштейна крепления оптического солнечного датчика космического аппарата с использованием топологической оптимизации / С.Н. Шапошников, Е.А. Кишов, Л.Д. Зимнякова // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2021. – № 66. – С. 98–105.

29. Башин, К.А. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли / К.А. Башин, Р.А. Торсунов, С.В. Семенов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 51. – С. 51–61.

30. Боровиков, А.А. Топологическая оптимизация переходного отсека КА / А.А. Боровиков, С.М. Таненбаум // Аэрокосмический научный журнал. – 2016. – № 5. – С. 16–30.

References

1. Kupriyanova Ya.A., Parafes S.G. Formirovanie konstruktivno-tekhnologicheskogo resheniia aerodinamicheskogo rulia s ispol'zovaniem topologicheskoi optimizatsii [Formation of design technological solution for the aerodynamic rudder using topological optimization] // Engineering Journal: Science and Innovation, № 5, 2023.

2. Zhu L., Li N., Childs P.R.N. Light-weighting in aerospace component and system design // Propulsion and Power Research, Vol. 7, No. 2, 2018. pp. 103-119.

3. Kosykh P.A., Azarov A.V. Teoriia i analiz metodov topologicheskoi optimizatsii [Theory and analysis of the topology optimization methods] // Engineering Journal: Science and Innovation, No 4, 2023.

4. Besedina K.S., Lavrov N.A., Barskov V.V. Primenenie additivnykh tekhnologii pri poluchenii izdelii iz polimernykh materialov (obzor) [Application of additive technologies in production of articles from polymeric materials (review)] // Bulletin of St PbSIT(TU), Vol. 44, No 70, 2018. pp. 56-63.

5. Frolova A.B., Shigapov A.I. Istoriia, tekushchee sostoianie i perspektivy razvitiia additivnykh tekhnologii [History, current status and development prospects of additive technologies] // Nauchnye izvestiia, No 29, 2022. pp. 198-201.

6. Zlenko M.A., Nagaitsev M.V., Dovbysh V.M. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii. Posobie dlia inzhenerov [Additive technologies in mechanical engineering. Manual for engineers]. Moscow: FSUE “NAMI”, 2015.

7. Baeva L.S., Marinin A.A. Sovremennye tekhnologii additivnogo izgotovleniia ob"ektov [Modern technologies of additive manufacturing of objects] // Vestnik of MSTU, Vol. 17, No 1, 2014. pp. 7-12.

8. Rudskoi A.I., Popovich A.A., Grigor'ev A.V., Kaledina D.E. Additivnye tekhnologii: uchebnoe posobie [Additive technologies: a textbook]. Saint-Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University Publishing, 2017. 251 p.

9. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Additive manufacturing – General principles.

10. Petrova G.N., Larionov S.A., Sorokin A.E., Sapego Yu.A. Sovremennye sposoby pererabotki termoplastov [Modern methods of processing thermoplastics] // Proceedings of VIAM, Vol. 11, No 59, 2017. pp. 56-72.

11. Magerramova L.A., Nozhnitsky Yu.A., Volkov S.A., Volkov M.E., Chepurnov V.Zh., Belov S.V., Verbanov I.S., Zaikin S.V.. Perspektivy primeneniia additivnykh tekhnologii dlia sozdaniia detalei i uzlov aviatsionnykh gazoturbinnykh dvigatelei i priamotochnykh vozdushno-reaktivnykh dvigatelei [Prospects of application of additive technologies to develop parts and components of gas turbine engines and ramjets] // VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, Vol. 18, No 3, 2019. pp 81-98.

12. Lee C.S., Kim S.G., Kim H.J., Ahn S.H. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts // Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, 2007. pp. 627-630.

13. Ahn S., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P.K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS // Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, No. 4, 2002. pp. 248-257.

14. Ziemian C., Sharma M., Ziemian S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling // Mechanical Engineering, 2012. pp. 159-180.

15. Shanmugasundaram S.A., Razmi J., Mian J., Ladani L. Mechanical Anisotropy and Surface Roughness in Additively Manufactured Parts Fabricated by Stereolithography (SLA) Using Statistical Analysis // Materials, Vol. 13, No. 11, 2020.

16. Azarov A.V., Antonov F.K., Golubev M.V., Khaziev A.R., Ushanov S.A. Composite 3D printing for the small size unmanned aerial vehicle structure // Composites Part B, No. 169, 2019. pp. 157-163.

17. Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P.K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS // Rapid Prototyping, Vol. 8, No. 4, 2002. pp. 248-257.

18. Sælen R.L., Hopperstad O.S., Clausen A.H. Mechanical behaviour and constitutive modelling of an additively manufactured stereolithography polymer // Mechanics of Materials, Vol. 185, No. 104777, 2023.

19. Shi G., Guan C., Quan D., Wu D., Tang L., Gao T. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing // Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 33, No. 4, 2020. pp. 1252-1259.

20. Komarov V.A. Proektirovanie silovykh additivnykh konstruktsii: teoreticheskie osnovy [Theoretical basis for design of load-bearing structures produced using additive technologies] // Ontology of designing, Vol. 7, No 2 (24), 2017. pp. 191-206.

21. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches: A comparative review // Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 48, No. 6, 2013. pp. 1031-1055.

22. Kirthana S., Nizamuddin M.K. Finite Element Analysis and Topology Optimization of Engine Mounting Bracket // Materials Today: Proceedings, Vol. 5, No. 9, 2018. pp. 19277-19283.

23. Galinovsky A.L., Filimonov A.S., Badanina Yu.V., Dolgikh A.I. Sravnitel'no-sopostavitel'noe issledovanie programmnykh kompleksov trekhmernogo chislennogo modelirovaniia putem analiza rezul'tatov topologicheskoi optimizatsii izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki [Comparative Correlation Study of Software Systems for Three-Dimensional Numerical Simulation by Analyzing Results of the RST Product Topological Optimization] // BMSTU Journal of Mechanical Engineering, Vol. 1, No 754, 2023. pp. 42-51.

24. Archana K., Anantha Reddy Y., Naveena P., Sai Anusha K. Topology optimization of connecting rod using ansys workbench 18.1 // Internatioonal Journal of Creative Research Thoughts, Vol. 8, No. 5, 2020. pp. 1659-1668.

25. Myagkov L.L., Chirskii S.P. Realizatsiia topologicheskoi optimizatsii metodom BESO v srede ANSYS APDL i ee primenenie dlia optimizatsii formy shatuna teplovoznogo dizelia [The Implementation of the BESO Method for Topology Optimization in ANSYS APDL and its Application for Optimization of the Connecting Rod Shape of a Locomotive Diesel Engine] // BMSTU Journal of Mechanical Engineering, No 11, 2018. pp. 38-48.

26. Satya Hanush S., Manjaiah M. Topology optimization of aerospace part to enhance the performance by additive manufacturing process // Materials Today: Proceedings, Vol. 62, No. 14, 2022. pp. 7373-7378.

27. Slavov S., Konsulova-Bakalova M. Optimizing Weight of Housing Elements of Two-stage Reducer by Using the Topology Management Optimization Capabilities Integrated in SOLIDWORKS: A Case Study // Machines, Vol. 7, No. 9, 2019.

28. Shaposhnikov S.N., Kishov E.A., Zimnyakova L.D. Proektirovanie kronshteina krepleniia opticheskogo solnechnogo datchika kosmicheskogo apparata s ispol'zovaniem topologicheskoi optimizatsii [Design of the mounting bracket for the optical solar sensor of the spacecraft] // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, No 66, 2021. pp. 98-105.

29. Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V. Metody topologicheskoi optimizatsii konstruktsii, primeniaiushchiesia v aerokosmicheskoi otrasli [Topology optimization methods in aerospace industry] // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, No 51, 2017. pp. 51-61.

30. Borovikov A.A., Tenenbaum S.M. Topologicheskaya optimizaciya perekhodnogo otseka KA [Topological optimization of the spacecraft transfer compartment]. Aerospace Scientific Journal. No. 5, 2016, pp. 16-30.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Financing. The study was not sponsored.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.