

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ИЗДЕЛИЯ С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТРЕХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА

Г. С. Русских, С. В. Шалыгин

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Работа посвящена оптимизации массы образца, полученного методом 3D печати с сохранением механической прочности и жесткости. Предложен алгоритм оптимизации его внутренней структуры, в основе — использование изоповерхностей эквивалентных напряжений, полученных на предварительно рассчитанном напряженно-деформированном состоянии образца в упругой изотропной постановке. Численным моделированием в ANSYS Workbench получены результаты, показывающие работоспособность оптимизированной конструкции на примере задачи трехточечного изгиба. Приведено сравнение результатов численного моделирования оптимизированного и монолитного образцов в упругой изотропной постановке.

Ключевые слова: аддитивные технологии, оптимизация внутренней структуры, напряженно-деформированное состояние, 3D печать, механические свойства, снижение массы.

Введение

Для авиационных конструкций снижение массы конструкции при сохранении параметров прочности и жесткости является одним из ключевых показателей эффективности. Апробированные на данный момент математические методы оптимизации прочности и жесткости изделий, полученные методом 3D печати, обладают рядом преимуществ. Однако данные оптимизационные алгоритмы мало применимы к самой распространенной и доступной технологии 3D печати — технологии послойного наплавления полимеров (FDM/FFF). Последние исследования, посвященные данной проблеме — разработке методов получения изделий с помощью метода послойного наплавления, обладающих оптимальными механическими свойствами, с точки зрения их дальнейшей эксплуатации, представлены в работе [1]. Вопросы, связанные с механической прочностью образцов и изделий, изготовленных с применением 3D печати, рассматривающие проблемы по оптимизации внутренней структуры изделий, без учета вида нагружения, рассмотрены в работах [2–3]. Возможности стабильной реализации печатных моделей с учетом сохранения сложной формы конечного изделия, без использования вспомогательных технологических приемов, таких как подержки и увеличенные юбки, для повышения адгезии модели к столу 3D принтера рассмотрены в работах [4–7]. Теоретические исследования 3D печатных образцов, с учетом различных технологических показателей, непосредственно влияющих на их механическую прочность, и сравнение теоретических и экспериментальных результатов анизотропной модели вязкоупругой деформации для PLA-пластика, описаны в работах [8, 9].

Ввиду вышперечисленного, актуальна задача разработки алгоритма формирования внутренней

структуры изделия, полученного методом послойного наплавления из термопластичных материалов (FDM/FFF), с учетом напряженно-деформированного состояния.

Теория

Предлагаемый подход к оптимизации внутренней структуры изделия основан на предварительно рассчитанном напряженно-деформированном состоянии (НДС) твердого тела в упругой изотропной постановке.

Внутренняя структура формируется на основе полученных изоповерхностей эквивалентных напряжений, формирующих внутренние несущие элементы, обеспечивающие прочность конструкции, и поперечных силовых элементов, обеспечивающих заданную жесткость, построенных на основе закона Парето. Предварительно рассчитанное НДС твердого тела предполагается получить в ANSYS Workbench. Внутренними средствами определить изоповерхности эквивалентных напряжений и использовать их в качестве геометрии, формирующей несущие элементы.

Алгоритм построения внутренней структуры можно описать следующим образом:

- построение центральной части, обеспечивающей прочность и жесткость в осевом поперечном сечении образца исходя из гипотезы равных деформаций;
- определение шага и необходимой площади оставшихся элементов внутреннего наполнения с учетом пропорциональности напряжений и закона Парето;
- представление изоповерхностей нормальных напряжений в виде элементов внутренней структуры для связи ранее построенных элементов, для обеспечения жесткости в целом.

Построение центральной части. Исходя из гипотезы равных деформаций центральная часть оптимизированной конструкции должна обеспечивать жесткость и прочность образца в условиях нагружения поперечной силой, которая, в свою очередь, в данной постановке задачи в ANSYS Workbench может быть определена как реакция опоры по оси Y. Исходя из этого для построения центральной части можно принять последнюю как стержень, работающий на сжатие, с осевым сжимающим усилием, равным F_y . Для определения поперечного сечения стержня можно воспользоваться условиями прочности и жесткости для задач осевого растяжения сжатия (рис. 1).

Итак, примем стержень прямоугольного поперечного сечения со стороной $h = 16$ мм, равной ширине образца, работающим на сжатие, продольное усилие сжатия $F_y = 54,094$ Н. Относительное удлинение, принятое по гипотезе равных деформаций, принимаем равным максимальной деформации монолитного $\varepsilon_{\max} = 1,0538$ мм допускаемые напряжения, принимаем равным максимальным напряжениям в полнотелом образце $\sigma_{\max} = 10,017$ МПа Модуль упругости материала $E = 1628$ МПа.

Условие прочности можно записать в виде [10]:

$$\sigma_{\max} = \frac{|N|}{A} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где $N = F_y$ — продольное усилие сжатия; для площади поперечного сечения, обеспечивающей прочность, из выражения (1), получим:

$$A = \frac{F_y}{\sigma_{\max}} = \frac{5,4002 \cdot 10^{-4} \text{ Н}}{0,16 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}} = 5,4002 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Учитывая известную сторону сечения, найдем вторую исходя из необходимой площади:

$$A = b \cdot h;$$

$$b = \frac{A}{h} = \frac{5,4002 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{0,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 3,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Условие жесткости, исходя из гипотезы равных деформаций, при центральном растяжении сжатии

$$\varepsilon_{\max} \leq [\varepsilon]. \quad (2)$$

В выражении (2) представим $\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{Nl}{EA}$, тогда выражение (2) примет вид:

$$\frac{N}{EA} \leq [\varepsilon]. \quad (3)$$

Из предельного неравенства (3) требуемая площадь поперечного сечения для обеспечения жесткости:

$$A = \frac{[\varepsilon]N}{E} = \frac{1,0538 \text{ мм} \cdot 54,094 \text{ Н}}{1628 \text{ МПа}} = 3,51 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Учитывая известную сторону сечения, найдем вторую исходя из необходимой площади:

$$A = b \cdot h;$$

$$b = \frac{A}{h} = \frac{3,51 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{0,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 0,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

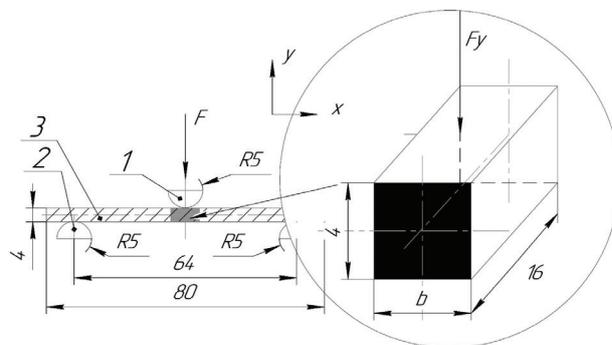


Рис. 1. Расчетная схема для центральной части оптимизированной структуры, работающей на сжатие: 1 — нагружающий пуансон; 2 — опоры образца; 3 — образец для испытаний на изгиб

Fig. 1. Design diagram for the central part of the optimized structure working in compression: 1 — loading punch; 2 — the sample support; 3 — the sample for bending test

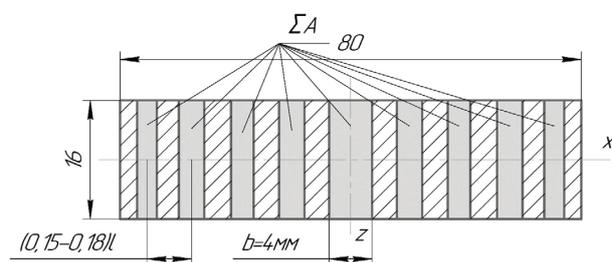


Рис. 2. Схема расположения площадей поперечных сечений вертикальных структур в центральном сечении образца в плоскости XOZ

Fig. 2. The circuit arrangement of cross-sectional areas of vertical structures in the central section of the sample in the plane XOZ

Окончательно примем для стороны поперечного сечения большую из двух и с учетом кратности размера, диаметра сопла, печатающей головки установки аддитивного производства (установки АП)

$$b = 4 \text{ мм}.$$

Определение шага и необходимой площади оставшихся элементов внутреннего заполнения. Для обеспечения прочности и жесткости, исходя из учета уже полученной ширины центрального элемента, предлагается несущую площадь оставшихся элементов принять с учетом пропорциональности напряжений и закона Парето [11]. Пусть 20 % площади неоптимизированного образца обеспечивает его прочность и жесткость, исходя из чего сумма поперечных сечений всех вертикальных элементов должна быть не менее 20 % от площади образца, равной $\sum A \geq 0,2 \cdot h \cdot l = 0,2 \cdot 16 \cdot 80 = 256 \text{ мм}^2$ (рис. 2). Распределение шага вертикальных структур предлагается принять пропорционально шагу изоповерхностей нормальных напряжений, который, в свою очередь, равен $b \sim (0,15 \dots 0,18)l$ — данные значения соответствуют шагу распределения напряжений неоптимизированного образца.

Для связи ранее построенных элементов, для обеспечения изгибной жесткости, предлагается изоповерхности нормальных напряжений непосредственно спроецировать на центральную плоскость образца в продольном его сечении. Исходя из этого можно построить сплайны, связывающие верти-

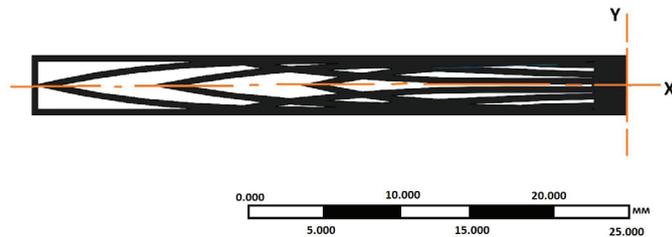


Рис. 3. Сечение образца с оптимизированной внутренней структурой
Fig. 3. The cross section of the sample with an optimized internal structure

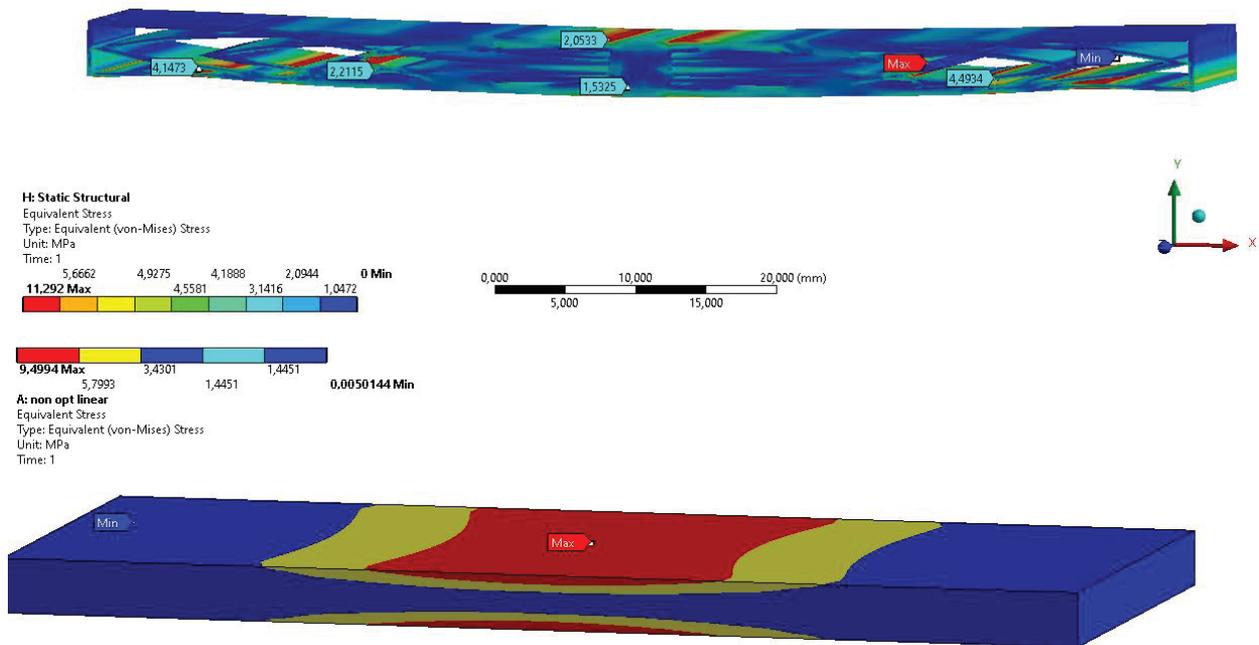


Рис. 4. Эпюра эквивалентных напряжений образца с оптимизированной внутренней структурой (сверху) и монолитного образца (снизу)
Fig. 4. The diagram of the equivalent stress of the sample with an optimized internal structure (top) and a monolithic sample (below)

кальные проекции плоскостей элементов, полученных при расчете общей площади распределения по закону Парето, и изоповерхностей эквивалентных напряжений. Далее, для обеспечения равномерного распределения упругих характеристик по всей оптимизированной структуре используем шаг разбиения для площадей поперечного сечения вертикальных структур, полученный ранее. Каждый из слайнов-проекций изоповерхностей напряжений разобьем на пропорциональные расстояния. Соединив полученные точки, имеем «силовую» структуру образца (рис. 3), гипотетически обеспечивающую прочность и жесткость в данных условиях нагружения, с учетом критерия минимальной жесткости осевого поперечного сечения, для обеспечения пропорциональных напряжений относительно не оптимизированного образца. Для верификации используем в ANSYS Mechanical численное моделирование монолитного и оптимизированного образцов на примере трехточечного изгиба.

Эксперименты

Для численного моделирования принят образец по ГОСТ Р 56805-2015 [12] из акрилутиденстирола. Данный стандарт является аналогом стандарта ASTM

D790-03 [13] с той разницей, что последний не используется для испытаний материалов с анизотропными свойствами. Расчетная модель, включающая в себя размеры образца, условия нагружения и граничные условия, была сформирована в ANSYS Workbench для материалов класса II. КЭ-расчет проводился в изотропной постановке, материал образца из стандартных библиотек ANSYS Workbench Acrylonitrile Butadiene Styrene Highimpact, Injection Molding (акрил бутадиен стирол литейный) с упругими характеристиками модуль Юнга $E=1628$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu=0,40890$. Материал опор и нагружающего пуансона конструкционная сталь с упругими характеристиками модуль Юнга $E=2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu=0,300$. Контакты «образец-опора», «образец нагружающий пуансон» — скользящие, с трением, допускающие большие перемещения. Скорости перемещения пуансона 1 мм/мин. Оптимизированный образец был подвергнут аналогичному нагружению. Эпюра эквивалентных напряжений образца представлена на рис. 4.

Видно, что распределение напряжений стало равномерным, основные точки, где напряжения наиболее высокие, это концентраторы напряжений, получившиеся в результате построения геометрии внутренней структуры.

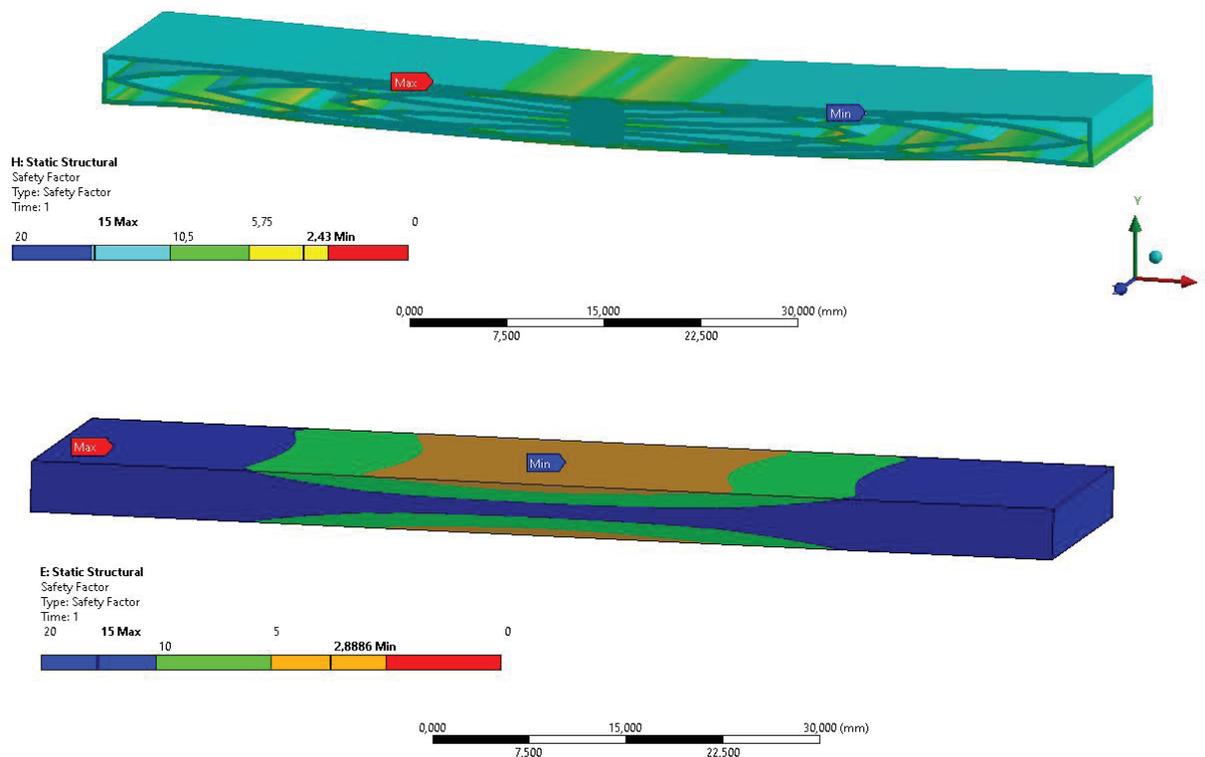


Рис. 5. Эпюры распределения запаса прочности для монолитного образца (снизу) и образца с оптимизированной внутренней структурой (сверху)
 Fig. 5. Diagrams of the safety factor distribution for a monolithic specimen (bottom) and a specimen with an optimized internal structure (top)

Таблица 1. Сравнительные характеристики для двух образцов
 Table 1. Comparative characteristics of two samples

Вид образца	Деформации по оси X, ϵ , мм	Эквивалентные напряжения по Мизесу, $\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Запас прочности, минимальный K, %	Масса образца, m , г
Монолитный	1,0538	10,017	289	10,2
Оптимизированный	1,0013	11,262	243	3,68

Выводы

Характер работы материала образца можно представить в виде двух эпюр запаса прочности (рис. 5) для монолитного образца (снизу). Видно, что значительная часть материала не несет нагрузку, для образца с оптимизированной внутренней структурой распределение материала в теле образца обеспечивает прочность и жесткость почти всего объема.

Общие данные, полученные при численном моделировании, представлены в табл. 1.

Заключение

Результаты численного моделирования показывают работоспособность выбранного алгоритма. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о преимуществе оптимизированного образца: при снижении массы сохраняется прочность и жесткость образца. Данная структура может быть создана при применении FDM печати. Для практического применения предлагаемой методики необходим учет анизотропии и пластических деформаций, возникающих в процессе нагружения образца.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90077/20.

Список источников

- Zhang X., Xia Y., Wang J. [et al.]. Medial axis tree — an internal supporting structure for 3D printing // Computer Aided Geometric Design. 2015. Vol. 35–36. P. 149–162. DOI: 10.1016/j.cagd.2015.03.012.
- Павлюк Б. Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-388-392.
- Fodran E., Koch M., Menon U. Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles // International Solid Freeform Fabrication Symposium. 1996. P. 419–442.
- Stava O., Vanek J., Benes B. [et al.]. Stress relief: improving structural strength of 3D printable objects // ACM Transactions on Graphics. 2012. Vol. 31, no. 4. 48. DOI: 10.1145/2185520.2185544.
- Prévost R., Whiting E., Lefebvre S. [et al.]. Make it stand: balancing shapes for 3D fabrication // ACM Transactions

on Graphics. 2013. Vol. 32, no. 4. 81. DOI: 10.1145/2461912.2461957.

6. Tianyun Y., Zichen D., Kai Z. [et al.]. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 163. P. 393–402. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.025.

7. Ahn S.-H., Montero M., Odell D. [et al.]. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS // Rapid Prototyping Journal. 2002. Vol. 8, Issue 4. P. 248–257. DOI: 10.1108/13552540210441166.

8. Fayazbakhsh K., Movahedi M., Kalman J. The impact of defects on tensile properties of 3D printed parts manufactured by fused filament fabrication // Materials Today Communications. 2019. Vol. 18. P. 140–148. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2018.12.003.

9. Кондрашов С. В., Пыхтин А. А., Ларионов С. А. [и др.]. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.

10. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2 т. Москва: Наука, 1970. Т. 1. 492 с.

11. Кох Р. Принцип 80/20 / пер. с англ. О. Епимахова. Москва: Эксмо, 2012. 443 с. ISBN 978-5-699-51703-9.

12. ГОСТ Р 56805-2015. Композиты полимерные. Методы определения механических характеристик при изгибе. Введ. 2015–27–11. Москва: Стандартинформ, 2016. 18 с.

13. ASTM D790-03. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

РУССКИХ Григорий Серафимович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы теории механики и автоматического управления».

SPIN-код: 1057-2344

AuthorID (РИНЦ): 600867

ORCID: 0000-0001-5495-6997

AuthorID (SCOPUS): 57191032330

ResearcherID: L-9913-2013

Адрес для переписки: rgs@omgtu.ru

ШАЛЫГИН Семен Витальевич, ассистент кафедры «Основы теории механики и автоматического управления».

SPIN-код: 4990-5420

AuthorID (РИНЦ): 1102289

ORCID: 0000-0002-2297-2025

ResearcherID: AAI-1817-2021

Адрес для переписки: skb.omgtu@gmail.com

Для цитирования

Русских Г. С., Шалыгин С. В. Алгоритм формирования внутренней структуры изделия с учетом напряженно-деформированного состояния на примере трехточечного изгиба // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С. 80–85. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-80-85.

Статья поступила в редакцию 10.02.2021 г.

© Г. С. Русских, С. В. Шалыгин

THE ALGORITHM FOR GENERATING INTERNAL STRUCTURE OF PRODUCT CONSIDERING STRESS-STRAIN ON EXAMPLE THREE-POINT BENDING

G. S. Russkikh, S. V. Shalygin

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

An algorithm is proposed for optimizing the internal structure of a sample obtained by 3D printing, while maintaining the mechanical strength and rigidity. The basis is the pre-calculated stress-strain state of the sample in an elastic isotropic setting. Numerical simulation results are obtained showing the performance of the optimized design using the example of the three-point bending problem. Comparison of the results of numerical modeling, optimized and monolithic samples, in elastic isotropic formulation is presented.

Keywords: additive technologies, internal structure optimization, stress-strain state, 3D printing, mechanical properties, weight reduction.

Acknowledgments

The reported study is funded by RFBR, project number 20-31-90077/20.

References

1. Zhang X., Xia Y., Wang J. [et al.]. Medial axis tree — an internal supporting structure for 3D printing // *Computer Aided Geometric Design*. 2015. Vol. 35 — 36. P. 149 — 162. DOI: 10.1016/j.cagd.2015.03.012. (In Engl.).
2. Pavlyuk B. Ph. Osnovnyye napravleniya v oblasti razrabotki polimernykh funktsional'nykh materialov [The main directions in the field of development of polymeric functional materials] // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii. Aviation Materials and Technologies*. 2017. No. S. P. 388 — 392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392. (In Russ.).
3. Fodran E., Koch M., Menon U. Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles // *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 1996. P. 419 — 442. (In Engl.).
4. Stava O., Vanek J., Benes B. [et al.]. Stress relief: improving structural strength of 3D printable objects // *ACM Transactions on Graphics*. 2012. Vol. 31, no. 4. 48. DOI: 10.1145/2185520.2185544. (In Engl.).
5. Prévost R., Whiting E., Lefebvre S. [et al.]. Make it stand: balancing shapes for 3D fabrication // *ACM Transactions on Graphics*. 2013. Vol. 32, no. 4. 81. DOI: 10.1145/2461912.2461957. (In Engl.).
6. Tianyun Y., Zichen D., Kai Z. [et al.]. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 163. P. 393 — 402. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.025. (In Engl.).
7. Ahn S.-H., Montero M., Odell D. [et al.]. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS // *Rapid Prototyping Journal*. 2002. Vol. 8, Issue 4. P. 248 — 257. DOI: 10.1108/13552540210441166. (In Engl.).
8. Fayzabakhsh K., Movahedi M., Kalman J. The impact of defects on tensile properties of 3D printed parts manufactured by fused filament fabrication // *Materials Today Communications*. 2019. Vol. 18. P. 140 — 148. DOI: 10.1016/j.jmtcomm.2018.12.003. (In Engl.).
9. Kondrashov S. V., Pykhtin A. A., Larionov S. A. [et al.]. Vliyaniye tekhnologicheskikh rezhimov FDM-pechati i sostava ispol'zuyemykh materialov na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki FDM-modeley (obzor) [Influence of the technological FDM-modes of the press and structure of used

materials on physic-mechanical characteristics of FDM-models (review)] // *Trudy VIAM. Proceedings of VIAM*. 2019. No. 10 (82). P. 34 — 49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49. (In Russ.).

10. Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoy sredy* [Continuum mechanics]. In 2 vols. Moscow, 1970. Vol. 1. 492 p. (In Russ.).

11. Kokh R. Printsip 80/20 [The 80/20 Principle] / trans. from Engl. O. Epimakhov. Moscow, 2012. 443 p. ISBN 978-5-699-51703-9. (In Russ.).

12. GOST R 56805-2015. *Kompozity polimernyye. Metody opredeleniya mekhanicheskikh kharakteristik pri izgibe* [Polymer composites. Methods for determining mechanical characteristics in bending]. Moscow, 2016. 18 p. (In Russ.).

13. ASTM D790-03. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. (In Engl.).

RUSKIKH Gregory Serafimovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Fundamentals of Theory of Mechanics and Automatic Control Department.

SPIN-code: 1057-2344

AuthorID (RSCI): 600867

ORCID: 0000-0001-5495-6997

AuthorID (SCOPUS): 57191032330

ResearcherID: L-9913-2013

Address for correspondence: rgs@omgtu.ru

SHALYGIN Semyon Vitaliyevich, Assistant of Fundamentals of Theory of Mechanics and Automatic Control Department.

SPIN-code: 4990-5420

AuthorID (RSCI): 1102289

ORCID: 0000-0002-2297-2025

ResearcherID: AAI-1817-2021

Address for correspondence: skb.omgtu@gmail.com

For citations

Russkikh G. S., Shalygin S. V. The algorithm for generating internal structure of product considering stress-strain on example three-point bending // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 80 — 85. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-80-85.

Received February 10, 2021.

© G. S. Russkikh, S. V. Shalygin