

Received: 21.01.2026

Revised: 08.06.2026

Accepted: 12.06.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.4.151-161

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF UNIT CELL ROTATION ON THE DEFORMATION OF POROUS PERIODIC STRUCTURES UNDER COMPRESSION

M. P. Varygina

*Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
53 Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russia*

 <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-5198-4893>  vmp@ict.nsc.ru

Email: vmp@ict.nsc.ru

Address for correspondence: pr-t Mira, 53, Krasnoyarsk, 660049, Russia

Tel.: +7 (391) 227-2912

Sandwich structures with triply periodic minimal surfaces, characterized by periodic geometry and minimal surface area, offer a combination of high physical and mechanical properties and adaptability to various design requirements. These structures are promising for application in the aerospace and automotive industries, civil engineering, and biomedical engineering. Finite element analysis is an essential tool for assessing the load-bearing capacity and mechanical behavior of such structures. This paper presents the results of numerical modeling of the stress-strain state of structures with a spatial infill in the form of regularly repeating unit cells representing surfaces with zero mean curvature. Numerical models are constructed for Schoen IWP surfaces and Schwarz primitives, including the creation and regularization of the facet geometry of a unit cell with a given relative density, and the generation of structural elements of periodic structures. The influence of the orientation and size of the unit cell on the mechanical behavior of structures under compression is considered. The stiffness efficiency depending on the topology of the structures is analyzed.

Keywords: triply periodic minimal surfaces, finite element model, Schwarz primitives, Schoen IWP, stress-strain state, sandwich panels

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education for the FRC ICT.

References

1. Hossain, M.S., Hossain, M.M., and Nilufar, S. An overview of additive manufacturing of triply periodic minimal surfaces (TPMS) structures. *Polymers*, 2025, 17 (24), 3307. DOI: 10.3390/polym17243307.
2. Kamantsev, I.S., Golodnov, A.I., Sukhova, M.R., Kornienko, O.Yu., and Belikov, S.V. Fracture behavior of grid structures with periodic and quasiperiodic designs. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2023, 6, 78–89. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.078-089. Available at: http://dream-journal.org/issues/content/article_420.html
3. Akhmetshin, L.R. Deformation properties of a metamaterial under changes in the sizes of the tetrachiral structure elements. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2024, 5, 79–87. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.079-087. Available at: http://dream-journal.org/issues/2024-5/2024-5_460.html

4. Yu, Z., Savinov, R., Matura, M., Zhang, P., and Shi, J. Current research status on advanced lattice structures for impact and energy absorption applications: a systematic review. *Thin-Walled Structures*, 2025, 215 (A), 113940. DOI: 10.1016/j.tws.2025.113490.
5. Zhang, H., Zhao, J., Xu, C., Huo, R., and Niu, Q. Improving energy absorption in structures using tubular TPMS structure optimization and printing strategies. *Composite Structures*, 2026, 377, 119820. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119820.
6. Gao, N., Zhang, Z., Deng, J., Guo, X., Cheng, B., and Hou, H. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. *Advanced Materials Technologies*, 2022, 7, 2100698. DOI: 10.1002/admt.202100698.
7. Zhang, X., Wang, J., Li, M., and Zhang, X. Nonlinear 3D vibration isolator with multilevel triply periodic minimal surface structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2026, 309, 110990. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.110990.
8. Beer, M. and Rybár, R. Optimisation of heat exchanger performance using modified gyroid-based TPMS structures. *Processes*, 2024, 12, 2943. DOI: 10.3390/pr12122943.
9. Khan, N. and Riccio, A. A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: current trends and future directions. *Progress in Aerospace Sciences*, 2024, 149, 101021. DOI: 10.1016/j.paerosci.2024.101021.
10. Niutta, C.B., Ciardello, R., and Tridello, A. Experimental and numerical investigation of a lattice structure for energy absorption: application to the design of an automotive crash absorber. *Polymers*, 2022, 14 (6), 1116. DOI: 10.3390/polym14061116.
11. Contreras, N., Zhang, X., Hong, H., and Hernández, F. Application of elastic metamaterials/meta-structures in civil engineering: a review. *Composite Structures*, 2024, 327, 117663. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117663.
12. Kazim, M., Pal, A. and Goswami, D. Mechanical metamaterials for bioengineering: in vitro, wearable, and implantable applications. *Advanced Engineering Materials*, 2025, 27, 2401806. DOI: 10.1002/adem.202401806.
13. Tang, T., Wang, L., Zhu, M., Zhang, H., Dong, J., Yue, W., and Xia, H. Topology optimization: a review for structural designs under statics problems. *Materials*, 2024, 17, 5970. DOI: 10.3390/ma17235970.
14. Nale, A. and Chiozzi, A. Multiscale topology optimization with embedded TPMS architected materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 295, 110204. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.110204.
15. Gao, S., Sun, Y., Xi, L., Zhao, T., Huang, Y., He, R., Kang, X., and Li, Y. Recent advances in machine learning-assisted design of additive manufacturing metastructures: a review. *Composite Structures*, 2025, 372, 119525. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119525.
16. Yan, Z., Zhang, J., Zhang, R., Liu, Z., Luo, G., Shen, Z., and Shen, Q. Machine learning-driven optimization for multi-performance trade-offs in triply periodic minimal surface lattice metamaterials. *Thin-Walled Structures*, 2026, 218 (B), 114040. DOI: 10.1016/j.tws.2025.114040.
17. Varygina, M.P. Numerical analysis of deformation under compression of structures based on triply periodic minimal surfaces. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2024, 4, 47–56. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.4.047-056. Available at: http://dream-journal.org/issues/content/article_455.html
18. Schwarz, H.A. *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1890, 357 p.
19. Schoen, A.H. Infinite Periodic Minimal Surfaces without Self-Intersections, NASA, Washington, DC, 1970, 92 p.
20. Raju, S.K.K. and Onkar, P.S. Lattice_Karak: lattice structure generator for tissue engineering, lightweighting and heat exchanger applications. *Software Impacts*, 2022, 14, 100425. DOI: 10.1016/j.simpa. 2022.100425.

21. Al-Ketan, O. and Abu Al-Rub, R.K. MSLattice: a free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces. *Material Design & Processing Communications*, 2021, 3 (6), e205. DOI: 10.1002/mdp2.205.
22. Bean, P., Lopez-Anido, R.A., and Vel, S. Numerical modeling and experimental investigation of effective elastic properties of the 3D printed gyroid infill, 2022, 12, 2180. DOI: 10.3390/app12042180.
23. Piedra, S., Gómez-Ortega, A., and Pérez-Barrera, J. Prediction of flow properties of porous triply periodic minimal surface (TPMS) structures. *Fluids*, 2023, 8 (12), 312. DOI: 10.3390/fluids8120312.
24. Lysak, G.V. and Lysak, I.A. *Osnovy sozdaniya geometricheskikh modeley v Ansys SpaceClaim* [The Basics of Creating Geometric Models in Ansys SpaceClaim. Teaching Aid]. TPU Publ., Tomsk, 2024, 101 p. (In Russian).
25. Lee, H.-H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2023: Theory, Applications, Case Studies*, SDC Publications, 2023, 614 p.

Подана в журнал 21.01.2026
УДК 539.32
DOI: 10.17804/2410-9908.2026.4.151-161

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОВОРОТА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЯЧЕЕК НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ СЖАТИИ

М. П. Варыгина

*Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий»,
пр-т Мира, д. 53, Красноярск, 660049, Россия*

 <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-5198-4893>  vmp@ict.nsc.ru

Электронная почта: vmp@ict.nsc.ru
Адрес для переписки: пр-т Мира, д. 53, Красноярск, 660049, Россия
Тел.: +7 (391) 227-29-12

Сэндвич-структуры с трижды периодическими минимальными поверхностями, характеризующиеся периодической геометрией и минимальной площадью поверхности, сочетают в себе высокие показатели физико-механических характеристик и адаптивность к различным конструкционным требованиям. Эти структуры являются перспективными для применения в аэрокосмической и автомобильной промышленности, гражданском строительстве и биомедицинской инженерии. Конечно-элементный анализ является необходимым инструментом при оценке несущей способности и механического поведения таких структур. В данной работе представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций с пространственным заполнением в виде регулярно повторяющихся элементарных ячеек, представляющих собой поверхности с нулевой средней кривизной. Для поверхностей IWP Шоэна и примитивов Шварца построены численные модели, включающие создание и регуляризацию фасетной геометрии элементарной ячейки с заданной относительной плотностью, генерацию элементов конструкций периодических структур. Рассмотрено влияние ориентации и размера элементарной ячейки на механическое поведение конструкций при сжатии. Выполнен анализ жесткостной эффективности в зависимости от топологии структур.

Ключевые слова: трижды периодические минимальные поверхности, конечно-элементная модель, примитивы Шварца, поверхности Шоэна, напряженно-деформированное состояние, сэндвич-панели

1. Введение

Инновации в технологиях аддитивного производства позволяют с высокой точностью создавать конструкции со сложной контролируемой геометрией на основе периодических структур с улучшенными механическими свойствами [1–3]. Такие конструкции, основанные на использовании повторяющихся элементарных ячеек трижды периодических минимальных поверхностей (Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS), являются более перспективными по сравнению с традиционными сетчатыми структурами [4]. TPMS представляют собой поверхности с нулевой средней кривизной и периодичностью в трех пространственных направлениях. Топологии TPMS определяются математическими функциями, что позволяет точно контролировать их геометрические параметры.

Конструкции на основе TPMS обладают малым весом, высокой пористостью, способностью к эффективному поглощению энергии и ударных нагрузок, звуковых волн и вибрации [5–7]. Кроме того, благодаря высокой удельной поверхности они значительно улучшают

теплопроводность и распределение теплового потока в каналах охлаждения и теплообменниках [8]. Конструкции на основе TPMS находят широкое применение в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении и гражданском строительстве [9–11]. В области биомедицины они открывают уникальные возможности для применения в тканеинженерных технологиях для регенеративной медицины, создания структурированных тканей, носимых и имплантируемых устройств, таких как костные имплантаты, мембраны и стенты [12].

При оценке несущей способности и механического поведения конструкций важную роль играет численный анализ, результаты которого могут быть использованы для принятия решения о выборе оптимальной конфигурации конструкции при соблюдении заданных ограничений по массе. В последнее время широко распространены исследования топологической оптимизации периодических структур [13, 14], в том числе с использованием достижений искусственного интеллекта [15, 16].

Возможность проектирования структур TPMS с различной толщиной, пористостью, удельной площадью поверхности, размером и ориентацией элементарных ячеек позволяет адаптировать механические свойства конструкций под требования конкретных приложений. В работе [17] изучалось влияние топологии, размера и толщины стенки элементарной ячейки на механические характеристики. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования пористых периодических структур на основе примитива Шварца (Schwarz Primitive) [18] и минимальных поверхностей IWP Шоэна (Schoen I-graph Wrapped Package) [19] с целью определения влияния ориентации элементарных ячеек на их деформационные свойства под действием распределенной сжимающей нагрузки.

2. Постановка задачи и методы решения

Рассматриваются конструкции, построенные на основе пористых периодических элементарных ячеек двух типов TPMS: IWP Шоэна [19] и примитив Шварца [18]. Эти поверхности могут быть описаны с использованием метода, основанного на неявных функциях:

$$|f(x, y, z)| \leq t, \quad (1)$$

где t – параметр линии уровня. Неявные функции $f_i(X, Y, Z)$ и $f_p(X, Y, Z)$, описывающие поверхности IWP и примитива, соответственно, имеют вид

$$f_i(X, Y, Z) = 2(\cos X \cos Y + \cos Y \cos Z + \cos X \cos Z) - (\cos 2X + \cos 2Y + \cos 2Z),$$

$$f_p(X, Y, Z) = \cos X + \cos Y + \cos Z,$$

где $X = 2\pi x/a$; $Y = 2\pi y/a$; $Z = 2\pi z/a$; a – размер элементарной единичной ячейки.

При $t = 0$ уравнение $f(x, y, z) = 0$ описывает поверхность нулевой толщины, которая делит область элементарной кубической ячейки на два подпространства одинакового объема. Изменение константы линии уровня t перемещает поверхность вдоль ее нормали, изменяя объем разделяемых подобластей. Неравенство $|f(x, y, z)| \leq t$ позволяет построить элементарную ячейку в виде оболочки (рис. 1).

Меньшему значению t соответствует меньшая толщина стенки элементарной ячейки. Таким образом, параметр t напрямую влияет на относительную плотность структуры ρ' , определяемую как доля объема материала, который занимает структура: $\rho' = V/a^3$, где V – объем структуры. Для заданных размеров элементарной ячейки с помощью метода минимизации можно выполнить поиск параметра t , при котором относительная плотность конструкции составляет заданное значение. Сохранение одинакового объема позволит проводить сравнение уровня напряжений и жесткости конструкций на основе различных структур TPMS. Методом золотого сечения были найдены параметры t , при которых относительная плотность структур $\rho' = 0,5$: для IWP Шоэна $t_i = 1,85$, для примитивов Шварца $t_p = 0,87$.

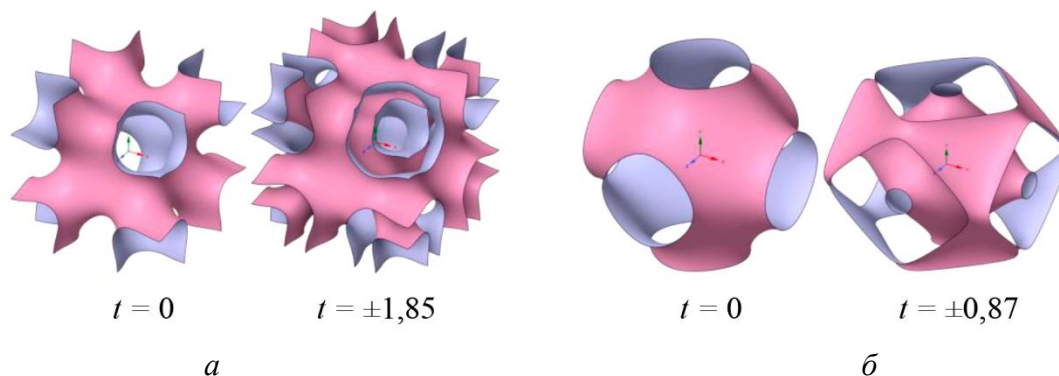


Рис. 1. Поверхности и оболочки TPMS: IWP Шоэна (а), примитив Шварца (б)

В исследованиях анализируются пористые периодические структуры, составленные из элементарных ячеек IWP Шоэна и примитивов Шварца, расположенные между двумя пластинами толщиной 4 мм. Подготовка геометрии для численных расчетов осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе на основе программ для автоматической генерации структур TPMS [20, 21] генерируются stl-файлы поверхностей IWP Шоэна и примитивов Шварца с заданными размерами элементарных ячеек и относительной плотностью. В силу кубической симметрии рассматриваемых минимальных поверхностей достаточно построить 1/8 часть элементарной ячейки.

Поскольку программы для построения минимальных поверхностей не оптимизированы для численных расчетов, сгенерированная фасетная геометрия может содержать ряд элементов, форма которых может оказаться непригодной для проведения конечно-элементного анализа, как отмечается в работах [22, 23]. Для решения этой проблемы на втором этапе для получения качественной конечно-элементной сетки проводится регуляризация фасетной геометрии с использованием инструментов сглаживания и перераспределения узлов сетки с минимальным отклонением от исходной геометрии. В результате регуляризации средствами программного обеспечения Ansys SpaceClaim [24] элементы принимают форму, близкую к равносторонним треугольникам, без острых углов [17]. Начиная со второго этапа подготовка геометрии в Spaceclaim происходит в автоматизированном режиме за счет использования сценариев, разработанных на скриптовом языке SpaceClaim.

На третьем этапе с помощью инструмента отражения в трех направлениях достраивается единая элементарная ячейка. Таким образом, узлы конечно-элементной сетки на границах элементарных ячеек оказываются согласованными.

На четвертом этапе копированием нескольких элементарных ячеек в трех направлениях генерируется пористая периодическая структура. При размере элементарной ячейки $a = 10$ мм число повторяющихся ячеек N вдоль осей координат X , Y , Z равно $8 \times 2 \times 2$, при увеличении размера ячейки до 20 мм число повторений ячеек сокращается в два раза в каждом направлении, $N = 4 \times 1 \times 1$. Размер периодической структуры составляет $S = 80 \times 20 \times 20$ мм³. В табл. 1 представлен внешний вид исследуемых структур при различных размерах элементарной ячейки.

Для каждой из структур в табл. 1 варьировали угол поворота элементарной ячейки вокруг оси X от 0° до 45° с шагом 15° . Для построения геометрии периодических структур с отличной от нуля ориентацией элементарных ячеек число повторяющихся ячеек N вдоль осей Y и Z на предыдущем этапе увеличивается. Затем полученная структура поворачивается на заданный угол и с помощью разделяющих плоскостей отсекается до заданного размера S . На последнем этапе за счет добавления пластин конструкции приобретают форму сэндвич-панелей. В табл. 2 представлен внешний вид торцевой части исследуемых конструкций при различных размерах и углах поворотов элементарной ячейки.

Таблица 1

Элементарные ячейки и периодические структуры TPMS

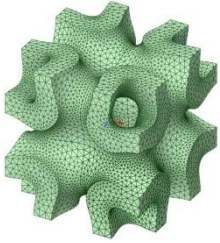
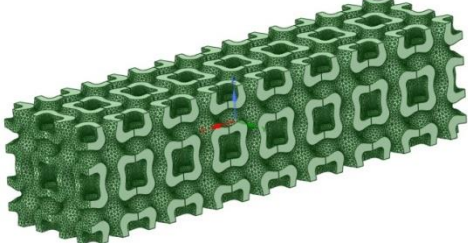
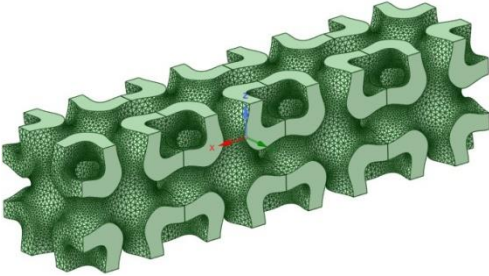
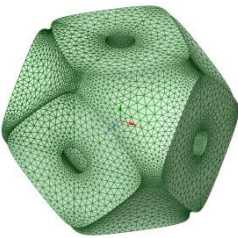
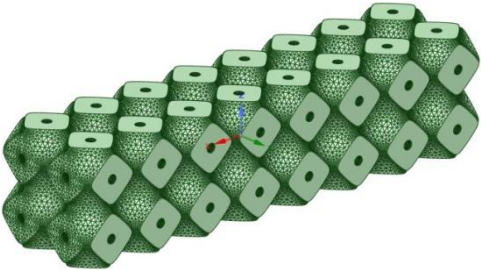
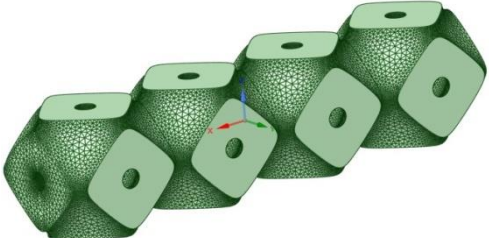
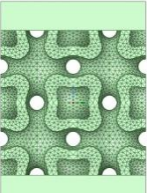
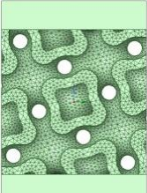
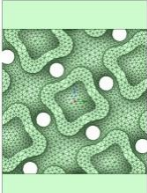
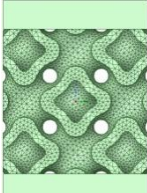
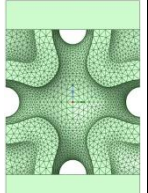
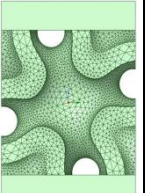
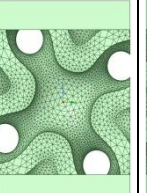
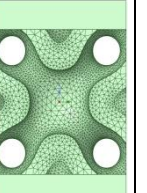
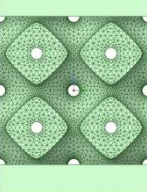
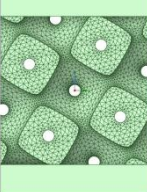
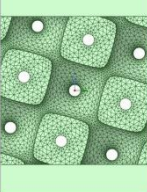
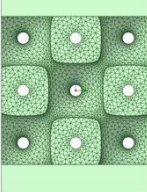
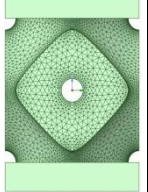
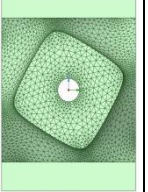
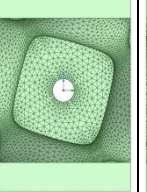
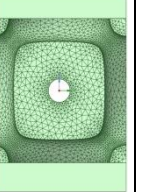
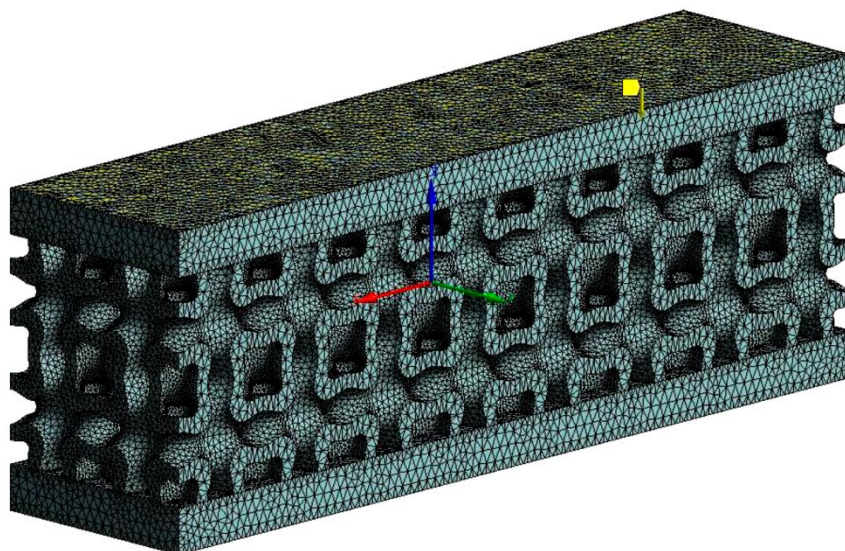
Размер ячейки, число ячеек		$a = 10,$ $N = 8 \times 2 \times 2$	$a = 20,$ $N = 4 \times 1 \times 1$
Элементарная ячейка		Периодическая структура	
IWP			
			

Таблица 2

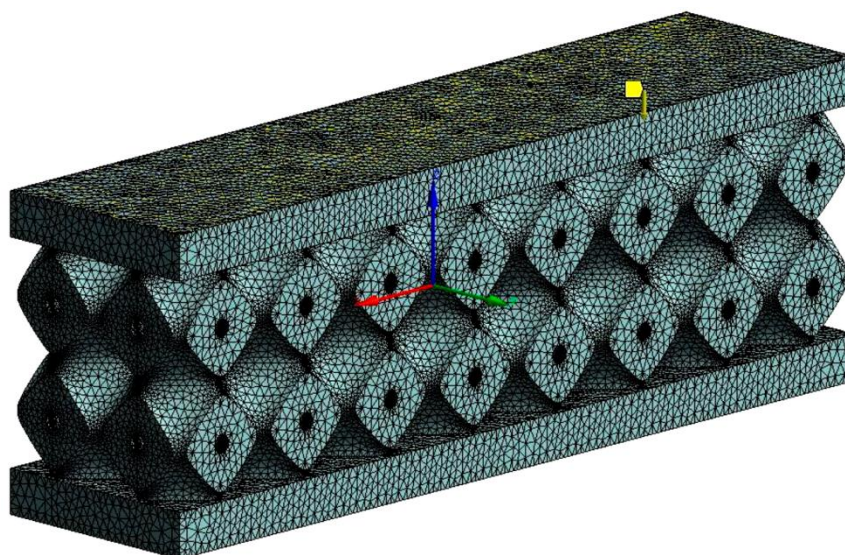
Внешний вид торцевой части структур при различных размерах и углах поворота
элементарной ячейки

a	10 мм				20 мм			
Угол	0°	15°	30°	45°	0°	15°	30°	45°
IWP								
Примитив								

Численный анализ механического поведения периодических структур при сжатии проводили средствами пакета прикладных программ инженерного анализа Ansys [25]. На рис. 2 представлены конечно-элементные модели рассматриваемых структур с размером элементарной ячейки 10 мм и углом поворота 0°. Нижняя пластина зафиксирована. Верхняя пластина перемещается на 1 мм вниз по оси Z под действием распределенной сжимающей нагрузки. Размер конечных элементов – 0,5 мм.



a



б

Рис. 2. Конечно-элементная модель структур TPMS, $a = 10$ мм, угол поворота 0° :
IWP Шюэна (*a*), примитив Шварца (*б*)

Для описания механического поведения структур выбрана модель упругого материала с параметрами, близкими к параметрам фотополимерной смолы, определенными экспериментально: модуль Юнга $E = 1943$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,43$.

3. Результаты и обсуждение

Численные расчеты показывают, что повышенный уровень напряжений наблюдается на границах между элементарными ячейками в местах с наименьшей площадью сечений (табл. 3). Для примитивов значения максимальных напряжений выше, чем для IWP. Наибольшие значения эквивалентных напряжений достигаются для структур с поворотом элементарных ячеек на 15° для двух типов TPMS. Концентрация напряжений возникает в местах резкого изменения геометрии, прежде всего в сечениях, ослабленных отверстиями.

Таблица 3

Поля эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа: $a = 10$

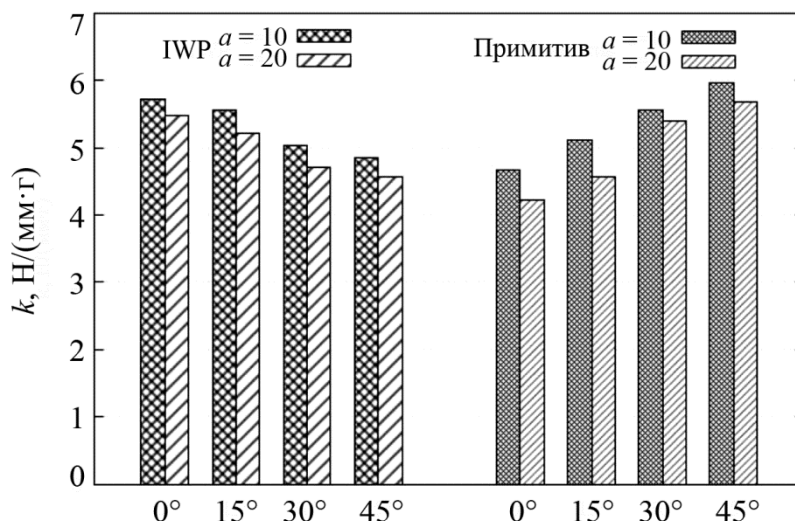
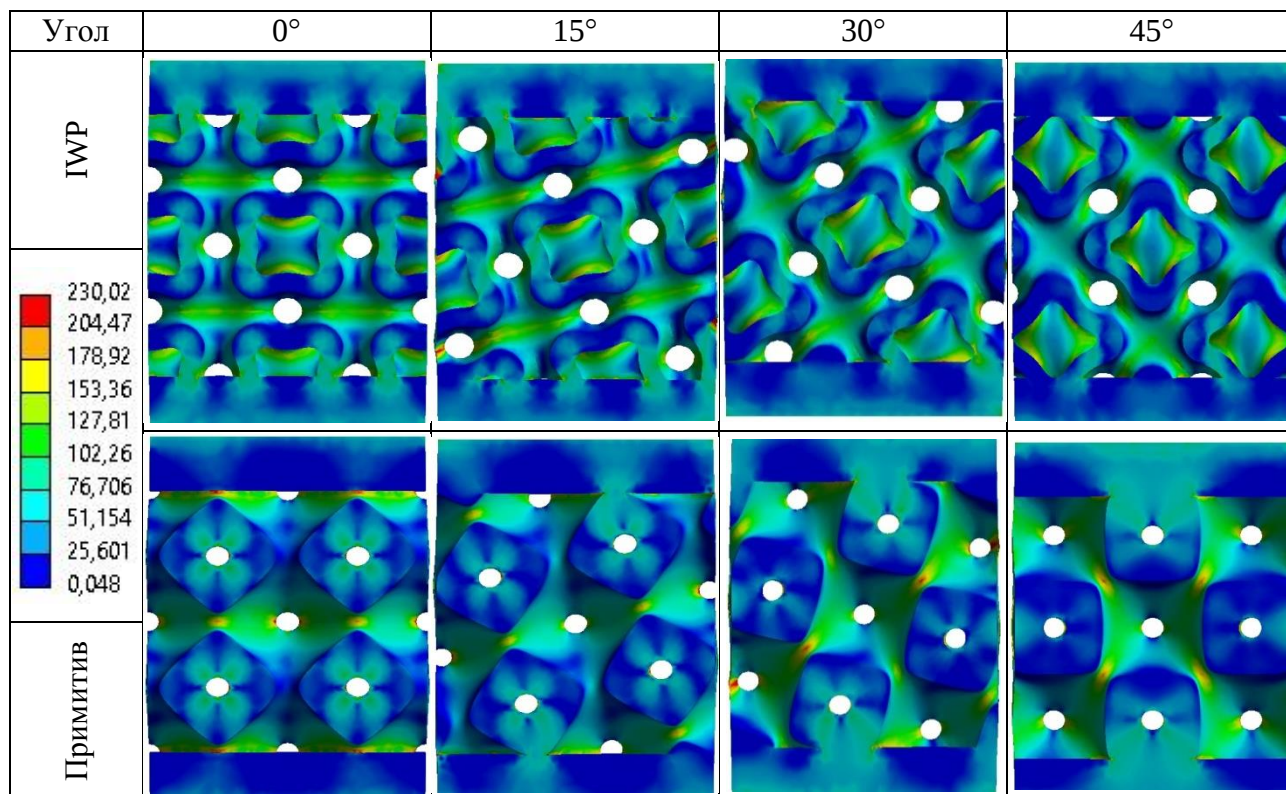


Рис. 3. Удельная жесткость структур на основе IWP Шоэна и примитивов Шварца

Для оценки эффективности различных структур с вариацией параметров можно ввести коэффициент, характеризующий удельную жесткость структуры, который определяется как отношение силы к произведению перемещения на массу структуры (рис. 3). Согласно полученным результатам, максимальное значение коэффициента жесткостной эффективности достигается для структуры на основе примитива Шварца при повороте элементарной ячейки размером 10 мм на 45°. Наиболее податливой является структура на основе примитива при размере элементарной ячейки 20 мм и ориентации 0°. При ориентации ячеек в 0° структуры на основе поверхностей IWP Шоэна более жесткие, чем структуры на основе примитива Шварца. С увеличением угла поворота ячеек струк-

туры на основе примитива Шварца становятся более жесткими, в отличие от структур на основе поверхностей Шюэна. Для всех типов структур жесткость уменьшается с увеличением размера ячейки.

4. Заключение

Результаты численного моделирования периодических структур свидетельствуют о выраженной зависимости их жесткости при сжатии от типа, размера и ориентации элементарной ячейки. Для рассматриваемых типов минимальных поверхностей при уменьшении размера элементарной ячейки жесткость периодической структуры увеличивается. При ориентации элементарной ячейки в 0° структура на основе поверхностей IWP является наиболее жесткой, однако при повороте элементарной ячейки на 45° при сохранении одинакового объема наиболее жесткой оказывается структура на основе примитива Шварца. При увеличении угла поворота ячеек жесткость структур на основе примитива Шварца увеличивается, а на основе поверхностей IWP Шюэна – уменьшается. Полученные результаты дают понимание того, как различные формы структур TPMS ведут себя при сжатии и могут служить ориентиром для выбора конфигурации периодической структуры, соответствующей заданным механическим характеристикам.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Литература

1. Hossain M. S., Hossain, M. M., Nilufar S. An overview of additive manufacturing of triply periodic minimal surfaces (TPMS) structures // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17 (24). – P. 3307. – DOI: 10.3390/polym17243307.
2. Fracture behavior of grid structures with periodic and quasiperiodic designs / I. S. Kamantsev, A. I. Golodnov, M. R. Sukhova, O. Yu. Kornienko, S. V. Belikov // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – Iss. 6. – P. 78–89. – DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.078-089. – URL: http://dream-journal.org/issues/content/article_420.html
3. Akhmetshin L. R. Deformation properties of a metamaterial under changes in the sizes of the tetrachiral structure elements // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2024. – Iss. 5. – P. 79–87. – DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.079-087. – URL: http://dream-journal.org/issues/2024-5/2024-5_460.html
4. Current research status on advanced lattice structures for impact and energy absorption applications: a systematic review / Z. Yu, R. Savinov, M. Matura, P. Zhang, J. Shi // *Thin-Walled Structures*. – 2025. – Vol. 215 (A). – 113940. – DOI: 10.1016/j.tws.2025.113490.
5. Improving energy absorption in structures using tubular TPMS structure optimization and printing strategies / H. Zhang, J. Zhao, C. Xu, R. Huo, Q. Niu // *Composite Structures*. – 2026. – Vol. 377. – 119820. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119820.
6. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review / N. Gao, Z. Zhang, J. Deng, X. Guo, B. Cheng, H. Hou // *Advanced Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 7. – 2100698. – DOI: 10.1002/admt.202100698.
7. Nonlinear 3D vibration isolator with multilevel triply periodic minimal surface structures / X. Zhang, J. Wang, M. Li, X. Zhang // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2026. – Vol. 309. – P. 110990. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.110990.
8. Beer M., Rybár R. Optimisation of heat exchanger performance using modified gyroid-based TPMS structures // *Processes*. – 2024. – Vol. 12. – 2943. – DOI: 10.3390/pr12122943.

9. Khan N., Riccio A. A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: current trends and future directions // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2024. – Vol. 149. – 101021. – DOI: 10.1016/j.paerosci.2024.101021.
10. Niutta C. B., Ciardello R., Tridello A. Experimental and numerical investigation of a lattice structure for energy absorption: application to the design of an automotive crash absorber // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14 (6). – 1116. – DOI: 10.3390/polym14061116.
11. Application of elastic metamaterials/meta-structures in civil engineering: a review / N. Contreras, X. Zhang, H. Hao, F. Hernández // *Composite Structures*. – 2024. – Vol. 327. – 117663. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117663.
12. Kazim M., Pal A., Goswami D. Mechanical metamaterials for bioengineering: in vitro, wearable, and implantable applications // *Advanced Engineering Materials*. – 2025. – Vol. 27. – 2401806. – DOI: 10.1002/adem.202401806.
13. Topology optimization: a review for structural designs under statics problems / T. Tang, L. Wang, M. Zhu, H. Zhang, J. Dong, W. Yue, H. Xia // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – 5970. – DOI: 10.3390/ma17235970.
14. Nale A., Chiozzi A. Multiscale topology optimization with embedded TPMS architected materials // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2025. – Vol. 295. – 110204. – DOI: doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.110204.
15. Recent advances in machine learning-assisted design of additive manufacturing metastructures: a review / S. Gao, Y. Sun, L. Xi, T. Zhao, Y. Huang, R. He, X. Kang, Y. Li // *Composite Structures*. – 2025. – Vol. 372. – 119525. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119525.
16. Machine learning-driven optimization for multi-performance trade-offs in triply periodic minimal surface lattice metamaterials / Z. Yan, J. Zhang, R. Zhang, Z. Liu, G. Luo, Z. Shen, Q. Shen // *Thin-Walled Structures*. – 2026. – Vol. 218. – P. 114040. – DOI: 10.1016/j.tws.2025.114040.
17. Varygina M. P. Numerical analysis of deformation under compression of structures based on triply periodic minimal surfaces // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2024. – Iss. 4. – P. 47–56. – DOI: 10.17804/2410-9908.2024.4.047-056. – URL: http://dream-journal.org/issues/content/article_455.html
18. Schwarz H. A. *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*. – Berlin, Heidelberg : Springer, 1890. – 357 p.
19. Schoen A. H. *Infinite Periodic Minimal Surfaces without Self-Intersections*. – National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, 1970. – 92 p.
20. Raju S. K. K., Onkar P. S. Lattice_Karak: lattice structure generator for tissue engineering, lightweighting and heat exchanger applications // *Software Impacts*. – 2022. – Vol. 14. – 100425. – DOI: 10.1016/j.simpa. 2022.100425.
21. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R. K. MSLattice: a free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces // *Material Design & Processing Communications*. – 2021. – Vol. 3 (6). – e205. – DOI: 10.1002/mdp2.205.
22. Bean Ph., Lopez-Anido R. A., Vel S. Numerical modeling and experimental investigation of effective elastic properties of the 3D printed gyroid infill // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (4). – P. 2180. – DOI: 10.3390/app12042180.
23. Piedra S., Gómez-Ortega A., Pérez-Barrera J. Prediction of flow properties of porous triply periodic minimal surface (TPMS) structures // *Fluids*. – 2023. – Vol. 8 (12). – 312. – DOI: 10.3390/fluids8120312.
24. Лысак Г. В., Лысак И. А. Основы создания геометрических моделей в ANSYS SpaceClaim : учебно-методическое пособие. – Томск : ТПУ, 2024. – 101 с.
25. Lee H.-H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2023: Theory, Applications, Case Studies*. – SDC Publications, 2023. – 614 p.