

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.763

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31406>



А.Э. Абдрахманова ✉, А.В. Сотов, А.И. Зайцев, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ abdrahmanova.an@yandex.ru

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР ИЗ ТЕРМОПОЛИУРЕТАНА ТПУ 95А С УПРАВЛЯЕМОЙ ПОРИСТОСТЬЮ ДЛЯ ПРОТЕЗНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ 3D-ПЕЧАТЬЮ

Аннотация. Функционально-градиентные материалы с управляемой пористостью на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии в сочетании с 3D-печатью открывают новые возможности для создания персонализированных протезных лайнеров переменной жесткости. В работе представлены исследования механических свойств ячеистых структур из термополиуретана ТПУ 95А, изготовленных 3D-печатью (FDM-технология), для применения в функционально-градиентных протезных лайнерах. Проведены циклические испытания на сжатие трех топологий – гироида, поверхности Шварца (Primitive) и сотовой структуры – при пористости 40 и 75% (размер ячейки 10 мм). Установлено, что минимальная печатаемая толщина стенки составляет 0,8 мм без дефектов. По результатам исследований топология гироида продемонстрировала наилучшие результаты модуля упругости, что составило 17 МПа для 40% пористости ячеек и 10 МПа для 75% пористости. Сотовая структура показала наименьшую жесткость и анизотропию. Полученные данные подтверждают возможность создания градиента жесткости за счет варьирования пористости гироидной структуры, что перспективно для персонализированных протезных изделий с оптимизированным распределением нагрузки.

Ключевые слова: аддитивное производство, функционально-градиентный материал, переменная жесткость, трижды периодические поверхности минимальной энергии, персональное протезирование.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка новых функциональных материалов, интеллектуальных конструкций и технологий их создания методами аддитивного производства на основе современных подходов моделирования и прогнозирования свойств» (Соглашение № 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>).

Для цитирования:

Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И., Попович А.А. Механические свойства ячеистых структур из термополиуретана ТПУ 95а с управляемой пористостью для протезных изделий переменной жесткости, полученных 3D-печатью // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31406>



A.E. Abdrakhmanova ✉, *A.V. Sotov*, *A.I. Zaytsev*, *A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ abdrakhmanova.an@yandex.ru

MECHANICAL PROPERTIES OF CELLULAR STRUCTURES MADE OF THERMOPOLYURETHANE TPU 95A WITH CONTROLLED POROSITY FOR PROSTHETIC DEVICES OF VARIABLE STIFFNESS, OBTAINED BY 3D PRINTING

Abstract. Functional gradient materials with controlled porosity based on triple periodic minimum surfaces combined with 3D printing open up new possibilities for creating personalized prosthetic liners with variable stiffness. This paper presents research on the mechanical properties of cellular structures made of TPU 95A thermoplastic polyurethane, manufactured using 3D printing (FDM technology), for use in functionally graded prosthetic liners. Cyclic compression tests were performed on three topologies – gyroid, Schwarz surface (Primitive) and honeycomb structure – at porosities of 40 and 75% (cell size 10 mm). It was found that the minimum printable wall thickness is 0.8 mm without defects. According to the research results, the gyroid topology demonstrated the best elastic modulus results, which amounted to 17 MPa for 40% cell porosity and 10 MPa for 75% porosity. The honeycomb structure showed the lowest stiffness and anisotropy. The data obtained confirm the possibility of creating a stiffness gradient by varying the porosity of the gyroid structure, which is promising for personalized prosthetic devices with optimized load distribution.

Keywords: additive manufacturing, functionally graded material, variable stiffness, triple periodic minimum surfaces, personalized prosthetics.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004 “Development of new functional materials, intelligent structures and technologies for their creation using additive manufacturing methods based on modern approaches to modeling and predicting properties”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Citation:

Abdrakhmanova A.E., Sotov A.V., Zaytsev A.I., Popovich A.A., Mechanical properties of cellular structures made of thermopolyurethane TPU 95a with controlled porosity for prosthetic devices of variable stiffness, obtained by 3D printing, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 79–89, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31406>

Введение. Актуальные тенденции протезирования нижних конечностей направлены на преодоление ключевых проблем пациентов через внедрение инноваций. Это достигается благодаря повышению эффективности конструкции, применению мультиматериальных компонентов и внедрению аддитивного производства. У пациентов после ампутации в поздние сроки реабилитации нередко наблюдаются поражения кожных тканей. Их основная причина – локальные напряжения, вызванные нарушением распределения давления и тангенциальных (сдвиговых) напряжений в сочетании с нестабильностью объема культы [1, 2]. Протезный вкладыш (лайнер) служит важным элементом протезного изделия. Располагаясь между жесткой культеприемной гильзой и ампутированной культей, он выполняет критическую роль в распределении нагрузки. Его механические свойства, особенно материал и толщина, напрямую влияют на передачу напряжения, защиту мягких тканей и общую функциональность протеза [3].

Возросший интерес к ячеистым структурам в сочетании с более специализированным программным обеспечением для проектирования дал старт развитию функционально-градиентным материалам (ФГМ) с управляемой пористостью. Среди пористых ФГМ особый интерес представляют структуры на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ). Свойство минимальной поверхности заключается в локальной минимизации ее площади: любой сколь угодно малый ее фрагмент имеет наименьшую площадь при заданной границе. Геометрия ТППМЭ считается одной из самых сложных и не имеющих аналогов. Особый интерес представляют минимальные поверхности, обладающие кристаллической структурой и демонстрирующие трехмерную трижды периодическую регулярность. На основе данных структур можно получить материал с градиентным изменением физико-механических свойств путем изменения пористости. ТППМЭ широко распространены в природе, например, они встречаются в крыльях бабочек, хитиновом покрове ракообразных и растениях [4]. Семейство ТППМЭ отличается большим разнообразием и включает поверхности Шварца (Primitive, Diamond, Hexagonal), Шена (I-WP, Gyroid), Невиуса и прочие типы.

Ключевыми преимуществами проектирования пористого ФГМ на основе ТППМЭ являются:

- 1) возможность точного математического описания геометрической модели, что обеспечивает высокую повторяемость и предсказуемость свойств;
- 2) контроль регулировки функциональных первичных характеристик, таких как пористость или удельная площадь поверхности;
- 3) строгая взаимосвязь между геометрией и свойствами пористой структуры, что открывает широкие возможности для адаптации материалов под конкретные эксплуатационные задачи [5].

В результате оптимизированного проектирования решетчатой структуры становится возможным задавать градиент с различной жесткостью в одном изделии по требованию. Технология 3D-печати представляет собой эффективный способ реализации таких структур благодаря возможности создания изделий со сложной и индивидуализированной геометрией. Более того, такой метод позволяет создавать изделия с кастомизированной внутренней топологией, что способствует увеличению прочностных характеристик с возможностью облегчения конструкции для решения конкретных функциональных задач [6].

Широкая применимость ФГМ на основе ТППМЭ демонстрируется для биологических применений, в основном связанных с регенерацией костных тканей и уменьшением экранирования напряжений, что облегчается благодаря отсутствию острых граней и легкой остеоинтеграции живых клеток в имплант, а также контролируемой жесткости [7–10]. Но в последние годы на потенциал ФГМ обратили внимание исследователи в области протезирования нижних конечностей для решения проблем переменной жесткости протезного изделия с необходимостью равномерного распределения давления на гетерогенные ткани ампутированной конечности [11–14].

На основе исследований в области разрабатываемых ФГМ с переменной жесткостью для области протезирования посредством АП ключевую роль в выборе технологии играет метод создания градиента. Существуют два принципиально разных подхода к созданию градиента жесткости в материале посредством АП:

- 1) управление пористостью [15, 16],
- 2) изменение химического состава [17–19].

Однако проектирование и изготовление изделия из ФГМ с пористой структурой методами АП сопряжено с рядом сложностей. Характерная анизотропия свойств может оказывать значительное влияние на механическое поведение изготавливаемых структур. Кроме того, возможное отклонение между теоретической и фактической плотностями структуры, наличие участков расплавления и пустот, практические пределы пористостей изготавливаемых структур – все это неизбежно оказывает влияние на вес, энергопроводность и упругий отклик [20].

Целью работы является установление количественных зависимостей между топологией, пористостью и модулем упругости ячеистых структур из ТПУ 95А, напечатанных по технологии послойного наплавления материала (FDM), для обоснованного проектирования функционально-градиентных протезных лайнеров нижних конечностей. В рамках исследования определены модули упругости ячеистых структур различных топологий (гироид, поверхность Шварца, сотовая структура) при варьировании объемной пористости, что позволяет восполнить существующий пробел в понимании связи «структура—свойства» для данного класса материалов и технологии производства.

Материалы и методы исследования

В данной работе были использованы три разных типа топологии ячеек. Для испытаний на сжатие были выбраны трижды периодические минимальные поверхности. ТППМЭ-структуры демонстрируют ряд таких уникальных свойств, как высокая удельная прочность, малый удельный вес и высокая энергопоглощающая способность. Из всех возможных вариантов ТППМЭ-структур были выбраны гироид и Шварц-примитив (рис. 1). Также для сравнения была выбрана двумерная сотовая структура. На основе вышеуказанных топологий были смоделированы образцы размером 20×20×20 мм с размером единичной ячейки 10 мм. Варьируемым параметром являлась толщина стенки: минимальная толщина составила 0,5 мм. Моделирование образцов осуществлялось в программном пакете nTopology.

Образцы изготавливались из коммерчески доступного филамента марки ТПУ 95А производства компании BASF (Германия), где А – твердость по Шор, по FDM-технологии на 3D-принтере K1 производства компании Creality (Китай).

Оценка минимальной и максимальной допустимой пористости была проведена на тестовой печати образцов с топологией гироида. Для этого были подготовлены 9 моделей с различной толщиной стенок: 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 мм. Размер единичной ячейки, тип топологии и размеры образцов не изменялись, но изменялась пористость образцов.

Методика циклического сжатия образцов соответствовала стандарту ГОСТ ISO 7743-2013. Все тесты были выполнены на разрывной машине Zwick/Roell Z100 с нагрузкой до 100 кН. Были испытаны ячеистые образцы кубической формы (30×30×30 мм), имеющие топологии «гироид», «Шварц-примитив» и «сотовая», а для сравнения использовался образец без пор (рис. 2).

Условия испытания задавались скоростью деформирования 10 мм/м до уровня 25%. Нагружение осуществлялось по оси Z в направлении, перпендикулярном слоям 3D-печати. Схема испытания была циклической (нагрузка—разгрузка), и каждый образец прошел через четыре полных цикла. Расчет модуля упругости проводился по следующему уравнению:

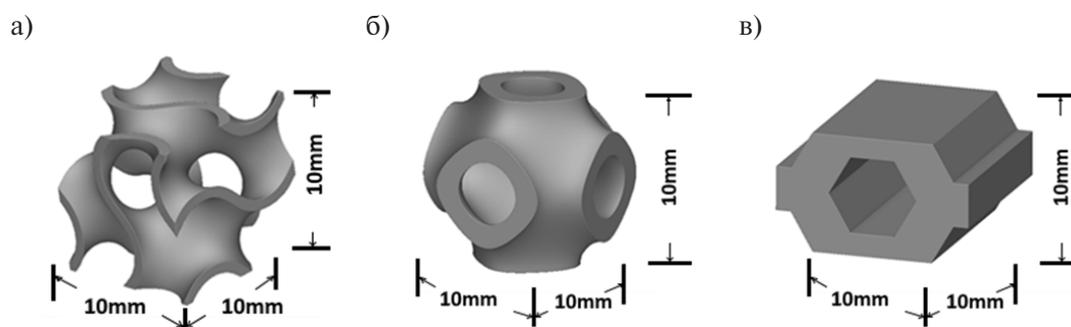


Рис. 1. Внешний вид элементарной ячейки исследуемых ячеистых образцов:

а) топология гироида ТППМЭ; б) топология Шварц-примитив ТППМЭ; в) двумерная сотовая топология

Fig. 1. Appearance of the unit cell of the studied cellular samples:

а) TPMS topology of gyroid; б) TPMS topology of the Schwarz primitive; в) two-dimensional honeycomb topology

$$E = \frac{F_{0,1}}{S\varepsilon_{0,1}}, \quad (1)$$

где F – сила, действующая на образец при сжатии; H ; S – площадь поперечного сечения образца, мм²; ε – деформация образца.

Результаты и обсуждение

Методом тестовой печати и последующего визуального контроля (рис. 3) для материала ТПУ 95А с гироидной топологией был определен диапазон допустимой толщины стенки.

Визуальный контроль и микрофотографии зафиксировали дефекты печати – деляминацию и образование пор на всех образцах, где толщина стенки не достигала 0,8 мм. Таким образом, нижний предел пористости (75%) был определен по минимальной технологичной толщине стенки в 0,8 мм. Верхний же предел (40%) установлен ввиду искажения топологии ячейки, выявленного при САПР-моделировании и сделавшего такие структуры непригодными для исследования. Следовательно, для сравнительного анализа топологий методом FDM был утвержден диапазон пористости от 40 до 75%.

Для оценки упругопрочностных характеристик было проведено четырехцикловое испытание на сжатие. Испытуемая группа включала шесть ячеистых образцов (по два на каждый тип топологии: 40 и 75% пористости, рис. 2) и один образец без пористости для контроля. По данным испытаний построены кривые «деформация–усилие» и определены значения модуля упругости. График циклического испытания для сплошного образца представлен на рис. 4.

Расчетный модуль упругости для сплошного полимера ТПУ 95А составил 43 МПа. Для других образцов также получены кривые цикловых испытаний и произведены расчеты модуля упругости для каждого типа топологии и пористости, результаты представлены в табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют об обратной зависимости между пористостью и модулем упругости: снижение первой приводит к увеличению второго. При этом динамика изменения модуля для разных топологий имеет индивидуальный характер.

Во всем диапазоне пористостей минимальный модуль упругости был зафиксирован у сотовой структуры. При сжатии ее ячейки деформировались путем складывания перпендикулярно направлению нагрузки (рис. 5). Эта характерная черта обусловлена двумерностью структуры, обеспечивающей жесткость в плоскости, но низкую сопротивляемость поперечным деформациям. Это делает их менее эластичными и более хрупкими при нагрузках, направленных вне плоскости.

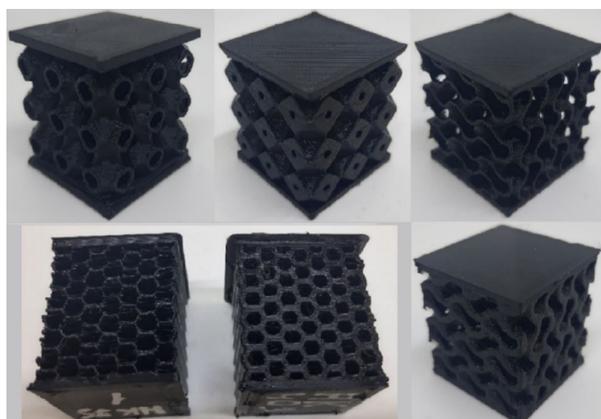


Рис. 2. Печатные образцы 30×30×30 мм для испытаний на циклическое сжатие на основе исследуемых топологий
Fig. 2. 30×30×30 mm printed samples for cyclic compression tests based on the studied topologies

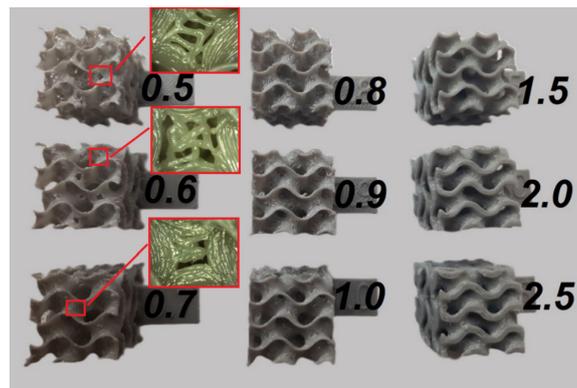


Рис. 3. Тестовые образцы 20×20×20 мм с увеличением толщины стенки ячеек от 0,5 до 2,5 мм
 Fig. 3. Test samples 20×20×20 mm with an increase in cell wall thickness from 0.5 to 2.5 mm

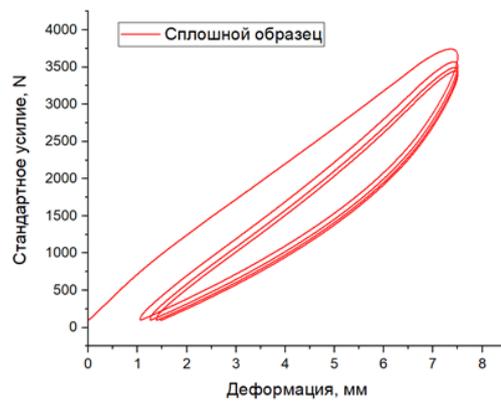


Рис. 4. График цикловых испытаний на сжатие сплошного образца
 Fig. 4. Graph of cyclic compression tests of a solid sample

Таблица 1

Расчетные модули упругости исследуемых топологий и пористостей ячеистых образцов
 Table 1
Calculated elastic moduli of the studied topologies and porosities of cellular samples

Пористость, %	Модуль упругости E, МПа		
	Гироид	Шварц-примитив	Сотовая структура
75	10	2	0,9
40	17	13	12

Все исследуемые топологии, за исключением сотовой, в процессе сжатия приобретали бочкообразную форму, а их ячейки компактировались по направлению действия силы. Среди всех пористых структур гироид показал оптимальное сочетание упругости и прочности.

Заключение

В рамках работы проведено исследование механического поведения ячеистых структур, полученных FDM-технологией из полимера ТПУ 95А, с перспективой создания на их основе

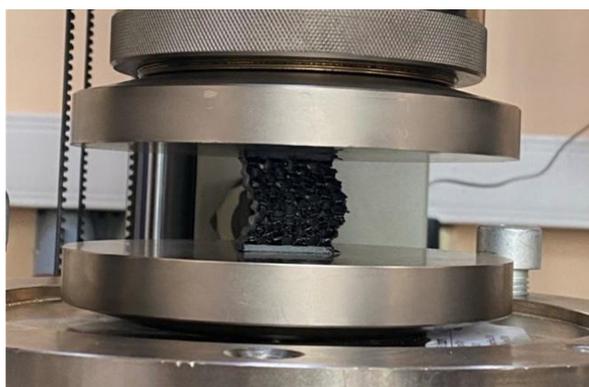


Рис. 5. Характер деформирования топологии сот
 Fig. 5. Behavior of honeycomb topology deformation

ФГМ переменной жесткости для области протезирования нижних конечностей. Были изучены три типа топологий: гироид, поверхность Шварца и сотовые. Результаты показали, что гироидная конфигурация обладает оптимальным комплексом механических свойств благодаря изотропному строению в трехмерном направлении и способности равномерно перераспределять напряжения. В отличие от нее, сотовые структуры, ввиду выраженной двумерной природы и низкой поперечной жесткости, продемонстрировали наименьшие показатели.

Несмотря на полученные результаты работы, существуют некоторые ограничения для создания ФГМ.

Результаты исследования могут быть специфичны для материала ТПУ 95А и FDM-технологии. Для других материалов и методов производства выводы могут отличаться. Влияние дефектов, возникающих при аддитивном производстве, на механические свойства требует дополнительного изучения. Также существует необходимость учета более сложных условий эксплуатации, таких как циклические нагрузки и агрессивные среды.

Данная работа может быть полезна для дальнейшей разработки элемента изделия на основе функционально-градиентного полимерного материала, такого как вкладыш протеза, с учетом реальных условий эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Cagle J.C., Reinhall P.G., Allyn K.J., McLean J., Hinrichs P., Hafner B.J., Sanders J.E. A finite element model to assess transtibial prosthetic sockets with elastomeric liners, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 56 (2018) 1227–1240. DOI: 10.1007/s11517-017-1758-z
- [2] Zhaojian Meng, Duo Wai-Chi Wong, Ming Zhang, Aaron Kam-Lun Leung. Analysis of compression/release stabilized transfemoral prosthetic socket by finite element modelling method, *Medical Engineering & Physics*, 83 (2020) 123–129. DOI: 10.1016/j.medengphy.2020.05.007
- [3] Cherif A.A., Abdelmadjid M., El Sallah Z.M., Ali B., Yaylacı M., Abderahmane S., Özdemir M.E., Dizdar A., Yaylacı E.U., Güvercin Y. Comparative study by FEM of different liners of a transfemoral amputated lower limb, *Scientific Reports*, 15 (2025) 31878. DOI: 10.1038/s41598-025-15974-x
- [4] Al-Ketan O., Abu Al-Rub R.K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices, *Advanced Engineering Materials*, 21 (10) (2019) 1900524. DOI: 10.1002/adem.201900524
- [5] Pugliese R., Graziosi S. Biomimetic scaffolds using triply periodic minimal surface-based porous structures for biomedical applications, *SLAS technology*, 28 (3) (2023) 165–182. DOI: 10.1016/j.slant.2023.04.004

- [6] **Devin K.M., Tang J., Hamilton A.R., Moser D., Jiang L.** Assessment of 3D printed mechanical metamaterials for prosthetic liners, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 238 (3) (2024) 348–357. DOI: 10.1177/09544119231225529
- [7] **Wakjira Y., Cioni A., Lemu H.G.** Current status of the application of additive-manufactured TPMS structure in bone tissue engineering, *Progress in Additive Manufacturing*, 10 (2024) 1085–1102. DOI: 10.1007/s40964-024-00714-w
- [8] **A.P. Mall, V.V. Bhandarkar, G. Mandaloi, P. Tandon,** An overview of design and development of biomimetic bone scaffolds using heterogeneous TPMS lattice structures, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32 (2025) 2429–2456. DOI: 10.1007/s11831-024-10212-5
- [9] **N.D.D. Reddy G.G., Penumakala P.K., Narala S.K.R.** Compressive response of additively manufactured Ti–6Al–4V Triply Periodic Minimal Surface structures with different unit cell designs for biomedical implant applications, *Materials Today Communications*, 44 (2025) 112013. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112013
- [10] **Mahmoud D., Elbestawi M.A.** Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review, *Journal of Manufacturing and materials Processing*, 1 (2) (2017) 13. DOI: 10.3390/jmmp1020013
- [11] **Brown N., Owen M.K., Garland A., DesJardins J.D., Fadel G.M.** Design of a single layer metamaterial for pressure offloading of transtibial amputees, *Journal of Biomechanical Engineering*, 143 (5) (2021) 051001. DOI: 10.1115/1.4049887
- [12] **Moeinnia H.** Optimized design and 3D printing of custom prosthetics utilizing wearable pressure mapping systems, Ph. D. thesis, Burnaby, Canada: Simon Fraser University (SFU), 2025.
- [13] **Sotov A., Abdrakhmanova A., Zaytsev A., Popovich A.** Additive manufacturing of functional gradient thermoplastic composite using fused deposition modelling and coextrusion continuous fibres, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 137 (2025) 3587–3601. DOI: 10.1007/s00170-025-15376-3
- [14] **Rouf S., Malik A., Raina A., Ul Haq M.I., Naveed N., Zolfagharian A., Bodaghi M.** Functionally graded additive manufacturing for orthopedic applications, *Journal of Orthopaedics*, 33 (2022) 70–80. DOI: 10.1016/j.jor.2022.06.013
- [15] **Plesec V., Harih G.** Bioinspired design of 3D-printed cellular metamaterial prosthetic liners for enhanced comfort and stability, *Biomimetics*, 9 (9) (2024) 540. DOI: 10.3390/biomimetics9090540
- [16] **Borikar G.P., Patil A.R., Kolekar S.B.** Additively manufactured lattice structures and materials: present progress and future scope, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24 (2023) 2133–2180. DOI: 10.1007/s12541-023-00848-x
- [17] **De Dominicis F.** Design and analysis of multi-material interfaces between rigid and flexible components in prosthetic manufacturing using FDM 3D printing technology, Mag. Thesis, Milan: Politecnico di Milano (Polimi), 2023.
- [18] **Sengeh D.M., Herr H.** A variable-impedance prosthetic socket for a transtibial amputee designed from magnetic resonance imaging data, *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 25 (3) (2013) 129–137.
- [19] **Jindal P., Prakash P., Bassal H., Singh P., Din M.A.M., Barnett C.T., Breedon P.** Two-material-based transtibial socket designs for enhanced load-bearing capacity using FEA, *Prosthesis*, 7 (2) (2025) 30. DOI: 10.3390/prosthesis7020030
- [20] **Gado M.G., Al-Ketan O., Aziz M., Al-Rub R.A., Ookawara S.** Triply periodic minimal surface structures: Design, fabrication, 3D printing techniques, state-of-the-art studies, and prospective thermal applications for efficient energy utilization, *Energy Technology*, 12 (5) (2024) 2301287. DOI: 10.1002/ente.202301287

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АБДРАХМАНОВА Анна Эдуардовна – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: abdrahmanova.an@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4494-7300>

СОТОВ Антон Владимирович – ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: sotovanton@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

ЗАЙЦЕВ Александр Ильич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-8365>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

REFERENCES

[1] J.C. Cagle, P.G. Reinhall, K.J. Allyn, J. McLean, P. Hinrichs, B.J. Hafner, J.E. Sanders, A finite element model to assess transtibial prosthetic sockets with elastomeric liners, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 56 (2018) 1227–1240. DOI: 10.1007/s11517-017-1758-z

[2] Zhaojian Meng, Duo Wai-Chi Wong, Ming Zhang, Aaron Kam-Lun Leung, Analysis of compression/release stabilized transfemoral prosthetic socket by finite element modelling method, *Medical Engineering & Physics*, 83 (2020) 123–129. DOI: 10.1016/j.medengphy.2020.05.007

[3] A.A. Cherif, M. Abdelmajid, Z.M. El Sallah, B. Ali, M. Yaylacı, S. Abderahmane, M.E. Özdemir, A. Dizdar, E.U. Yaylacı, Y. Güvercin, Comparative study by FEM of different liners of a transfemoral amputated lower limb, *Scientific Reports*, 15 (2025) 31878. DOI: 10.1038/s41598-025-15974-x

[4] O. Al-Ketan, R.K. Abu Al-Rub, Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices, *Advanced Engineering Materials*, 21 (10) (2019) 1900524. DOI: 10.1002/adem.201900524

[5] R. Pugliese, S. Graziosi, Biomimetic scaffolds using triply periodic minimal surface-based porous structures for biomedical applications, *SLAS technology*, 28 (3) (2023) 165–182. DOI: 10.1016/j.slast.2023.04.004

[6] K.M. Devin, J. Tang, A.R. Hamilton, D. Moser, L. Jiang, Assessment of 3D printed mechanical metamaterials for prosthetic liners, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 238 (3) (2024) 348–357. DOI: 10.1177/09544119231225529

[7] Y. Wakjira, A. Cioni, H.G. Lemu, Current status of the application of additive-manufactured TPMS structure in bone tissue engineering, *Progress in Additive Manufacturing*, 10 (2024) 1085–1102. DOI: 10.1007/s40964-024-00714-w

[8] A.P. Mall, V.V. Bhandarkar, G. Mandaloi, P. Tandon, An overview of design and development of biomimetic bone scaffolds using heterogeneous TPMS lattice structures, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32 (2025) 2429–2456. DOI: 10.1007/s11831-024-10212-5

- [9] **G.G. N.D.D. Reddy, P.K. Penumakala, S.K.R. Narala**, Compressive response of additively manufactured Ti–6Al–4V Triply Periodic Minimal Surface structures with different unit cell designs for bio-medical implant applications, *Materials Today Communications*, 44 (2025) 112013. DOI: 10.1016/j.mt-comm.2025.112013
- [10] **D. Mahmoud, M.A. Elbestawi**, Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review, *Journal of Manufacturing and materials Processing*, 1 (2) (2017) 13. DOI: 10.3390/jmmp1020013
- [11] **N. Brown, M.K. Owen, A. Garland, J.D. DesJardins, G.M. Fadel**, Design of a single layer metamaterial for pressure offloading of transtibial amputees, *Journal of Biomechanical Engineering*, 143 (5) (2021) 051001. DOI: 10.1115/1.4049887
- [12] **H. Moeinnia**, Optimized design and 3D printing of custom prosthetics utilizing wearable pressure mapping systems, Ph. D. thesis, Burnaby, Canada: Simon Fraser University (SFU), 2025.
- [13] **A. Sotov, A. Abdrakhmanova, A. Zaytsev, A. Popovich**, Additive manufacturing of functional gradient thermoplastic composite using fused deposition modelling and coextrusion continuous fibres, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 137 (2025) 3587–3601. DOI: 10.1007/s00170-025-15376-3
- [14] **S. Rouf, A. Malik, A. Raina, M.I. Ul Haq, N. Naveed, A. Zolfagharian, M. Bodaghi**, Functionally graded additive manufacturing for orthopedic applications, *Journal of Orthopaedics*, 33 (2022) 70–80. DOI: 10.1016/j.jor.2022.06.013
- [15] **V. Plesec, G. Harih**, Bioinspired design of 3D-printed cellular metamaterial prosthetic liners for enhanced comfort and stability, *Biomimetics*, 9 (9) (2024) 540. DOI: 10.3390/biomimetics9090540
- [16] **G.P. Borikar, A.R. Patil, S.B. Kolekar**, Additively manufactured lattice structures and materials: present progress and future scope, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24 (2023) 2133–2180. DOI: 10.1007/s12541-023-00848-x
- [17] **F. De Dominicis**, Design and analysis of multi-material interfaces between rigid and flexible components in prosthetic manufacturing using FDM 3D printing technology, Mag. Thesis, Milan: Politecnico di Milano (Polimi), 2023.
- [18] **D.M. Sengeh, H. Herr**, A variable-impedance prosthetic socket for a transtibial amputee designed from magnetic resonance imaging data, *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 25 (3) (2013) 129–137.
- [19] **P. Jindal, P. Prakash, H. Bassal, P. Singh, M.A.M. Din, C.T. Barnett, P. Breedon**, Two-material-based transtibial socket designs for enhanced load-bearing capacity using FEA, *Prosthesis*, 7 (2) (2025) 30. DOI: 10.3390/prosthesis7020030
- [20] **M.G. Gado, O. Al-Ketan, M. Aziz, R.A. Al-Rub, S. Ookawara**, Triply periodic minimal surface structures: Design, fabrication, 3D printing techniques, state-of-the-art studies, and prospective thermal applications for efficient energy utilization, *Energy Technology*, 12 (5) (2024) 2301287. DOI: 10.1002/ente.202301287

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anna E. ABDRAKHMANOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
 E-mail: abdrahmanova.an@yandex.ru
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4494-7300>

Anton V. SOTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
 E-mail: sotovanton@yandex.ru
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

Alexander I. ZAYTSEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-8365>

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 04.11.2025; Одобрена: 25.11.2025; Принята: 05.12.2025.

Submitted: 04.11.2025; Approved: 25.11.2025; Accepted: 05.12.2025.