



Научная статья

УДК 539.3

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188836>

EDN: <https://www.elibrary.ru/VGXURN>

Влияние внутренней архитектуры на упругие свойства аддитивно изготавливаемых пористых структур

Евгения Эдуардовна Ильина^{1✉}, Леонид Борисович Маслов²

^{1, 2} Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,
Иваново, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

¹ tipm@ispu.ru✉, ORCID 0009-0000-6034-0814

² leonid-maslov@mail.ru, ORCID 0000-0002-7423-3996

Аннотация. Статья посвящена исследованию аддитивно изготавливаемых прототипов скаффолдов из полимерного материала методом послойной укладки (FDM-печать). Анализируются физические характеристики и упругие свойства разработанных пористых структур на основе скелетных и пластинчатых трижды периодических минимальных поверхностей из полилактида PLA+. Определение упругих и прочностных свойств образцов скаффолдов с заданными значениями пористости осуществлялось путем проведения испытаний на одноосное сжатие на открытом воздухе. Проведено сравнение с теоретическими значениями эффективных упругих модулей, полученных на ячейке периодичности метаматериала на основе трижды периодических минимальных поверхностей.

Ключевые слова: скаффолды, трижды периодические минимальные поверхности, аддитивные технологии, сжатие, модуль упругости

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20118, <https://rscf.ru/project/25-21-20118>

Для цитирования: Ильина Е.Э., Маслов Л.Б. Влияние внутренней архитектуры на упругие свойства аддитивно изготавливаемых пористых структур // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 3. С. 196–205. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188836>

Original article

Internal Architecture Effect on the Additively Manufactured Porous Structures Elastic Properties

Evgeniya E. Ilyina^{1✉}, Leonid B. Maslov²

^{1, 2} Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russian Federation

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

¹ tipm@ispu.ru✉, orcid 0009-0000-6034-0814

² leonid-maslov@mail.ru, orcid 0000-0002-7423-3996

© Ильина Е.Э., Маслов Л.Б., 2026

Abstract

This article considers physical-and-mechanical properties of the additively manufactured porous scaffolds based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) from the biocompatible polylactide PLA+. This study relevance stems from the need to create controlled porous structures for bone tissue replacement that could ensure mechanical support during regeneration and gradually degrade, freeing up space for a new bone.

The authors examine four types of the TPMS structures (Schwarz-P, Schwarz-D, I-WP, and Gyroid), modeled on skeletal and sheet lattices. Digital models were being developed in the nTop parametric computer-aided design system (nTopology Inc., USA) with a cell size of 4 mm and a porosity of $50 \pm 0.5\%$. Full-scale samples in the shape of the $12.7 \times 12.7 \times 25.4$ mm prisms were fabricated by the fused deposition modeling (FDM). The surface area, material volume, specific surface area, scaffold material density after printing, and effective scaffold density were being determined for the samples. Uniaxial compression tests were being conducted at a strain rate of 1 mm/min. The elastic modulus was determined from the linear portion of the stress-strain diagram. Additionally, tensile tests were performed on the solid samples to estimate the Young modulus of the base material after printing.

The obtained results demonstrated that the structure skeletal-to-sheet transition leads to the significant increase in the surface area, scaffold volume, and effective density. The elastic moduli of the most sheet samples (Schwarz-D, I-WP, Gyroid) are higher than those of their skeletal counterparts. The experimental data comparison with a previously performed theoretical computing allowed estimating the effective Young modulus of the additive material for each structure type. The obtained values are significantly lower than the modulus of the original polylactide and highly dependent on the type of the triply periodic minimal surface area, indicating a significant effect of both printing process and internal geometry on the elastic properties. It was established that the developed scaffolds were similar in elasticity and strength properties to the trabecular bone tissue, making them suitable for the cancellous bone replacing. The I-WP structures demonstrated the highest effective elastic modulus; however, printing such samples was associated with technological challenges. The authors proposes methods for the scaffold rigidity increasing, including application of the external fixation or composites creation with hydroxyapatite.

This work practical meaning lies in the parametric development of the scaffolds with predictable morphological and mechanical characteristics, which allows the time of development reduction and pass on to the targeted synthesis of the personalized implants. The obtained data can be applied in mathematical models of the bone tissue regeneration and in biomedical practice for the artificial bone substitutes development.

Keywords: scaffolds, triply periodic minimal surfaces, additive technologies, compression, elastic modulus

Funding: the research was finances by the Grant from the Russian Science Foundation No. 25-21-20118, <https://rscf.ru/project/25-21-20118/>

For citation: Ilyina E.E., Maslov L.B. Internal Architecture Effect on the Additively Manufactured Porous Structures Elastic Properties. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(3):196-205. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188836>

List of Figures

Fig. 1. Type of elementary cells based on TPMS: skeletal type (a), sheet type (b)

Fig. 2. Solid samples from the PLA obtained by the set fibers angle with the FDM-printing: the fibers orientation at 90°

Fig. 3. Stresses dependencies on the deformations for the of pieces from the TPMS-G skeleton-type sampling with 50% porosity and regressive lines, plotted on the linear sections of the deformation curves

Fig. 4. Values of the averaged elastic moduli for the samples with different types of internal structure

List of Tables

Table. Geometric characteristics of matic samples created on the basis of the elementary cells of various TPMS structures

Введение

Пористые структуры имеют широкий спектр применения в различных сферах современной науки и техники, где требуются особые свойства: малый вес, контролируемая проницаемость, высокая площадь удельной поверхности, биосовместимость и др. [1]. В аэрокосмической промышленности и машиностроении они дают возможность создавать легкие и при этом прочные

компоненты, снижая вес деталей без потери несущей способности. В биомеханике уникальным преимуществом пористых структур является их способность имитировать натуральную костную ткань. В химической промышленности пористые металлы и полимеры выступают в роли фильтров, носителей для катализаторов и мембран, используются в химических реакторах и энергетических установках.

Учитывая уникальность их применения, пористые объекты должны обладать специфическими геометрическими характеристиками, поэтому большую роль играют методы их создания. Традиционные методы изготовления, такие как выщелачивание частиц, газовое вспенивание, электроформование и др., приводят к созданию пористости со стохастической структурой, в которой форма, размеры, ориентация и взаимосвязи поровых каналов случайны [2, 3]. В таком случае настройка внутренней архитектуры является практически неконтролируемой.

Решением данной проблемы стали современные методы проектирования. Существуют группы ученых [4–6], которые отдают предпочтение стержневым решетчатым структурам, имитирующим пористость. Такие структуры обладают легко контролируемой архитектурой, достаточной механической прочностью и простотой технологического изготовления. Однако авторы подчеркивают и ряд сложностей и недостатков. В подобных структурах возможно возникновение анизотропии, т.е. механические свойства могут зависеть от приложения нагрузки вдоль или поперек стержней. Места стыков стержней являются концентраторами напряжений, что может привести к преждевременному разрушению несущей области под воздействием нагрузок [7]. Моделирование с помощью трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП) помогает избежать сложностей, возникающих при использовании стержневых систем [8–13]. Структуры, построенные на основе ТПМП, обладают ключевым свойством — контролируемым изменением морфометрических характеристик пористого объема: взаимосвязанности, размера, кривизны и формы поровых каналов; объема пористости; удельной площади поверхности [10]. Эти параметры непосредственно влияют на значения эффективных упругих свойств пористых объектов [9].

Реализовать с необходимой точностью геометрию такого типа позволяют аддитивные технологические процессы. Вид 3D-печати влияет на механические характеристики готового изделия, что подтверждается экспериментальными испытаниями подобных структур [12]. В статьях [14, 15] подробно описаны механизмы деформации различных типов аддитивно изготовленных ТПМП-структур и представлены численные параметры, устанавливающие связь между геометрией пористых объектов и их механическими характеристиками, полученными в ходе испытаний на растяжение, сдвиг и изгиб. В работах [16–19] описана зависимость механического поведения образцов из полимерного материала от ориентации нитей

при различных параметрах FDM-печати. Можно отметить, что в перечисленных работах большое влияние на механические характеристики образцов оказали метод расположения волокон в модели при печати, который контролировался с помощью ориентации и угла раstra экструдера, время, температура и высота слоя. Проводились как натурные, так и численные эксперименты в диапазоне нагрузок, соответствующих началу структурных разрушений.

Результаты испытаний, описанные в данной статье, посвящены исследованию скаффолдов из биосовместимого полилактида — несущих био-разлагаемых каркасов, служащих для успешного процесса регенерации в зоне перелома и созданных с помощью послойного наплавления. Определение основных параметров механических систем, выполненных из удовлетворяющего медицинским требованиям материала и обладающих необходимыми физико-механическими свойствами, является чрезвычайно актуальным. Данные параметры находят практическое применение в математических моделях, описывающих процессы в гетерогенных средах и регенерацию костной ткани в объеме био-резорбируемых скаффолдов. Одним из ведущих направлений исследований в механобиологии является изучение влияния внешнего механического стимула на скорость восстановления костной ткани в области перелома, в том числе и в случаях замещения обломков костной ткани скаффолдом. В работах авторов [20, 21] на основе теории порупругости разработана математическая модель, описывающая изменение физико-механических свойств основных морфотипов биологических тканей, участвующих в процессе регенерации кости, при наличии стационарной динамической нагрузки, и конечно-элементный алгоритм, реализующий модель в цифровом виде. В результатах было показано, что представленная модель регенерации костной ткани демонстрирует адекватное математическое поведение и обладает достаточной предсказательной способностью, что дает возможность ее дальнейшего развития и применения в биофизических исследованиях и биомедицинской практике [22].

Однако, несмотря на большое количество проводимых исследований в обозначенных областях, результаты остаются довольно разрозненными, так как учитывают модели, имеющие узкую специфику применения. Поэтому целями данного исследования являлись изучение методов проектирования структуры скаффолдов и определение физико-механических свойств получаемых образцов. Во внимание принималось также, что изменения, вносимые в уравнение выбранной трижды периодической минимальной поверхности, существенно влияют на

значения параметров, описывающих геометрию этой структуры. Это позволило оценить характер взаимосвязи физических и механических свойств с помощью цифровых и натуральных образцов, выполненных в виде моделей с упрощенной геометрией для уменьшения варьируемых параметров.

Материалы и методы

В данной статье значительное внимание уделяется исследованию свойств скаффолдов, аддитивно изготовленных из биоразлагаемого полимерного материала — коммерческого полилактида PLA+. Интерес к нему вызван тем, что он обладает биологическими свойствами [23, 24], необходимыми для изготовления медицинских изделий. Такой биополимер со временем деградирует, освобождая пространство для регенерации. Впоследствии кость полностью замещается зрелой костной тканью. Это решает проблему резорбции кости на границах вживления пористого имплантата за счет постепенного гашения эффекта экранирования, а также лишает необходимости повторного хирургического вмешательства для извлечения имплантата или лечения возникающих воспалительных процессов.

Несмотря на указанные преимущества, требуется определить, возможно ли достичь необходимых механических характеристик скаффолда, учитывая симбиоз физико-механических свойств чистого PLA+ и структуры пористости, выполненной на основе ТПМП. Разрабатываемые на основе ТПМП цифровые и натурные образцы позволяют оценить характер взаимосвязи физических и механических свойств между собой.

Геометрическое моделирование образцов скаффолдов

Опытные образцы скаффолдов разрабатывались в соответствии с требованиями стандарта ASTM D695 [38] в форме призмы с размерами $0,5 \times 0,5 \times 1,0$ дюйм ($12,7 \times 12,7 \times 25,4$ мм). Цифровые модели создавались в параметрической системе автоматизированного проектирования nTop (nTopology Inc., USA) с преобразованием в замкнутую сетку полигональных поверхностей, пригодную для аддитивного производства. Этот метод в 3D-графике позволяет проектировать совокупность вершин, ребер и граней, обычно треугольников и четырехугольников, образующую непрерывную оболочку трехмерного объекта.

На распределение материала внутри ячеистой структуры влияет тип неявных математических уравнений ТПМП, описывающих функции $f(x, y, z)$:

$$f(x, y, z) = \cos \frac{2\pi}{A} x + \cos \frac{2\pi}{A} y + \cos \frac{2\pi}{A} z; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} f(x, y, z) = & \sin \frac{2\pi}{A} x \cdot \sin \frac{2\pi}{A} y \cdot \sin \frac{2\pi}{A} z + \\ & + \sin \frac{2\pi}{A} x \cdot \cos \frac{2\pi}{A} y \cdot \cos \frac{2\pi}{A} z + \\ & + \cos \frac{2\pi}{A} x \cdot \sin \frac{2\pi}{A} y \cdot \cos \frac{2\pi}{A} z + \\ & + \cos \frac{2\pi}{A} x \cdot \cos \frac{2\pi}{A} y \cdot \sin \frac{2\pi}{A} z; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f(x, y, z) = & 2 \left(\cos \frac{2\pi}{A} x \cdot \cos \frac{2\pi}{A} y + \right. \\ & + \cos \frac{2\pi}{A} y \cdot \cos \frac{2\pi}{A} z + \cos \frac{2\pi}{A} z \cdot \cos \frac{2\pi}{A} x \left. \right) - \\ & - \cos \frac{2\pi}{A} x - \cos \frac{2\pi}{A} y - \cos \frac{2\pi}{A} z; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f(x, y, z) = & \sin \frac{2\pi}{A} x \cdot \cos \frac{2\pi}{A} y + \cos \frac{2\pi}{A} y \times \\ & \times \cos \frac{2\pi}{A} z + \sin \frac{2\pi}{A} z \cdot \cos \frac{2\pi}{A} x, \end{aligned} \quad (4)$$

где A — размер ячейки, моделируемой на основе трижды периодической минимальной поверхности.

Ячейки, моделируемые на основе данных уравнений, могут быть скелетного и пластинчатого типа. В скелетных решетках функции подчиняются равенству $f(x, y, z) + T = 0$, где T — параметр, регулирующий размер поры в ячейке периодической структуры за счет смещения поверхности от условного нулевого положения. Ячейки пластинчатого типа состоят из тонких изогнутых стенок, ограничивающих объем и формирующих сеть каналов одинаковой толщины. В таких решетках функции подчиняются равенству $f(x, y, z)^2 - T = 0$, где T — параметр, регулирующий размер поры в ячейке периодической структуры за счет толщины стенки в поровом канале.

Для исследования влияния внутренней архитектуры на упругие свойства скаффолдов рассматривались четыре типа поверхностей, моделируемых на основе соотношений (1)–(4): (1) — Schwarz-Primitive (P), (2) — Schwarz-Diamond (D), (3) — I-graph-wrapped package (I-WP), (4) — Gyroid (G) (рис. 1).

В моделях использовался размер ячейки, равный 4 мм, что обусловлено особенностями технологического процесса 3D-печати выбранного оборудования и укладывается в медицинский норматив. При варьировании параметра T можно добиться, чтобы значение пористости лежало в диапазоне от 80 до 90%. Подобный показатель может благотворно влиять на прорастание клеток и сосудов в ходе регенерации костной ткани, но и влечет за собой резкое падение механической прочности скаффол-

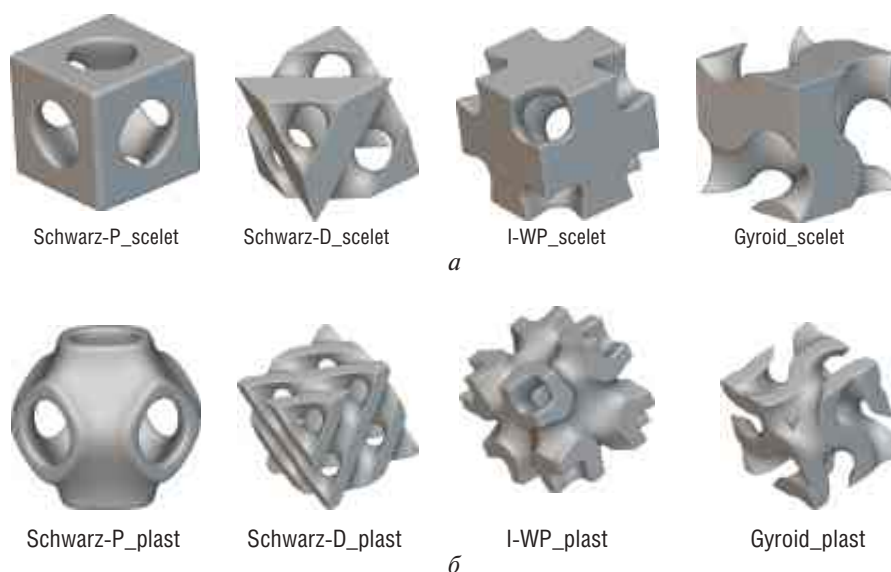


Рис. 1. Вид элементарных ячеек на основе ТПМП: а — скелетного типа;
б — пластинчатого типа

да. Возникает несоответствие — конструкция, призванная обеспечить механическую поддержку для роста новой кости, становится слишком хрупкой в условиях физиологической нагрузки. Поэтому для данного исследования размер порового пространства в ячейке структуры подобран в диапазоне $50 \pm 0,05\%$ в предположении, что в процессе деградации полимера и, соответственно, повышения пористости до больших значений поровое пространство должно постепенно замещаться костной тканью, обладающей достаточной прочностью и высокими упругими характеристиками.

Определение физических характеристик натуральных образцов скаффолдов

Определение физических характеристик пористых материалов играет важную роль в оптимизации плотности, теплопроводности, способности к водопоглощению. Экспериментальный анализ позволяет контролировать качество аддитивного технологического процесса и учитывать его особенности при создании пористых структур с требуемыми механическими параметрами.

В данном исследовании анализировались такие характеристики пористого образца, как: S , мм² — площадь поверхности; V_{scaf} , мм³ — объем пористого материала; S_{spec} — удельная площадь поверхности; ρ_{scaf} , г/мм³ — плотность материала скаффолда после печати, ρ_{effect} , г/мм³ — эффективная плотность скаффолда. Расчет данных характеристик проводился по соотношениям:

$$S_{spec} = \frac{S \cdot 1 \text{ мм}}{V_{scaf}}; \quad \rho_{scaf} = \frac{m_{scaf}}{V_{scaf}}; \quad \rho_{effect} = \frac{m_{scaf}}{V_{abs}}, \quad (5)$$

где V_{abs} — объем призмы из сплошного материала без системы поровых каналов, мм³; V_{scaf} — объем материала скаффолда, мм³.

Полная площадь поверхности и объем полимерного материала рассчитывались автоматически в программе компьютерного моделирования nTop (nTopology Inc., USA). Однако необходимо отметить, что данные значения являются идеализированными, так как программа не учитывает нюансы технологического процесса аддитивного производства, влияющие на конечную морфологию структуры.

Проведение механических испытаний

В процессе FDM-печати с филаментом из полилактида происходит ряд физических и химических изменений, которые ведут к возникновению отличий механических свойств материала после наплавления от свойств исходного материала. Наибольшее влияние оказывают этапы нагрева и плавления, взаимодействия с влагой, охлаждения и затвердевания. На первом этапе температура превышает температуру стеклования материала, что ведет к размягчению полимерных цепей, вследствие чего прутки становятся пластичными. Далее происходит процесс формирования будущего объекта, во время которого вода в нити филамента, обладающего гигроскопичностью, мгновенно превращается в пар. Это ведет к микровзрывам, нарушающим равномерность потока расплава из-за возникновения пузырьков в материале, кратерам на поверхности или к гидролизу — разрыву полимерных цепей, из-за чего пластик становится хрупким, а слои хуже сцепляются друг с другом. На последнем этапе расплав остывает и затвердевает, что сопровожда-

ется усадкой — небольшим изменением размеров изделия из-за внутренних напряжений и разницы в скорости охлаждения разных слоев.

Это приводит к необходимости проведения предварительных квазистатических испытаний со скоростью деформации 1 мм/мин для определения базовых механических характеристик материала после печати. Производятся эксперименты на растяжение в соответствии с ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Для предотвращения проскальзывания во время испытаний на растяжение образцов из сплошного материала использовались механические захваты с насечками. Каждая выборка содержит по три образца. Рассматривались варианты FDM-печати с расположением волокон, полученных при печати с наклоном угла накладки материала 90° — экструдер послойно наращивает длину образца, укладывая филамент вдоль торцевой площади сечения.

Результаты испытаний на разрыв также приведены на рис. 2. Значение модуля упругости для сплошного образца, полученного в ходе аддитивного производства, составило $E_{90^\circ} = 1805$ МПа.



Рис. 2. Сплошные образцы из PLA, полученные с помощью заданного угла волокон при FDM-печати: расположение волокон под углом 90°

Испытания на одноосное сжатие пористых материалов необходимы для определения их механического поведения, модуля упругости и деформационных свойств. В данном исследовании особое внимание уделено оценке механического поведения образцов и определению модуля упругости в линейной зоне. Испытания проводились на открытом воздухе, что позволяет оценить базовые характеристики материала. Эксперименты выполнены на испытательной машине УТС-101 («Тест-системы», Россия) с нагружающей способностью 10 кН. Испытания выполнялись при комнатной температуре. Скорость деформации составляла 1 мм/мин. Квазистатические испытания с медленным приложением нагрузки позволили материалу находиться в равновесном состоянии без влияния инерции и скоростных эффектов, что помогло

определить с особой точностью истинные прочностные и деформационные свойства материала.

Для статистического анализа в испытаниях исследовалось по три образца (Sample 1–3) из каждой выборки. В ходе экспериментов для каждого образца получен массив данных, записанный испытательной машиной, включающий в себя временной шаг (t , сек), соответствующие ему перемещение (l , мм) и сжимающее усилие (F , Н). Построение диаграмм и расчет характеристик осуществлялись в программе Microsoft Excel (Corp. Microsoft, USA). Для определения модуля упругости (E , МПа) построены графики зависимости « σ – ϵ » с учетом длины рабочей зоны образца $l_0 = 25,4$ мм и начальной площади поперечного сечения рабочей зоны образца $S_0 = 161,29$ мм². По ним модуль упругости для каждого образца определен как коэффициент линейной зависимости, показывающий тангенс угла наклона линии тренда, построенной в зоне упругости (рис. 3).

Результаты

Зависимость геометрических характеристик опытных образцов, полученных с помощью 3D-печати, от типа ТППП отражена в таблице. Для возможности расширенного анализа влияния аддитивного производства на качество полученных опытных образцов ниже приведены физические значения исходного материала, прутка филамента из полилактида и сплошного образца, выполненного без системы поровых каналов.

1) Пруток филамента — объем $V_{mat} = 48,08$ мм³; масса $m_{mat} = 0,05$ г; плотность $\rho_{mat} = 1,04 \cdot 10^{-3}$ г/мм³.

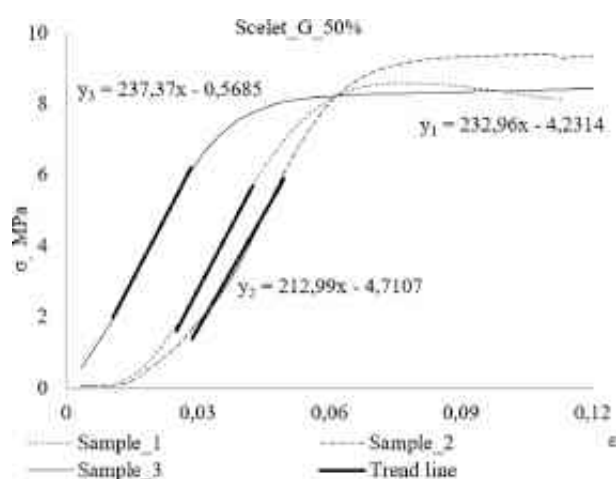


Рис. 3. Графики зависимости напряжений от деформаций для образцов из выборки скелетных ТППП-G с пористостью 50% и регрессионные прямые, построенные на линейных участках кривых деформирования

2) Сплошная призма из PLA – $V_{abs} = 4096,77 \text{ мм}^3$; $m_{abs} = 4,69 \text{ г}$; $\rho_{abs} = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$.

Геометрические характеристики призматических образцов, созданных на основе элементарных ячеек различных ТПМП-структур, приведены в таблице.

Значения механических характеристик образцов, испытываемых на открытом воздухе, определенные по диаграммам напряженно-деформированного состояния « σ – ϵ », приведены на рис. 4. Массивы данных позволяют рассчитать модули упругости для каждого образца (E_{samp1} , E_{samp2} , E_{samp3}) и получить их усредненное значение (E_{av}), которое в дальнейшем используется как характеристика пористого материала с определенным типом внутренней пористой структуры.

Обсуждение

Проектирование пористых структур с использованием ячеек периодичности, описываемых урав-

нениями ТПМП, позволяет с помощью аддитивных технологий получить опытные образцы, схожие по своим геометрическим особенностям с цифровыми моделями.

Проведенный анализ показал, что для всех типов ячейки при переходе от скелетного к пластинчатому типу площадь поверхности, объем скаффолда и эффективная плотность значительно возрастают.

Представленные диаграммы содержат информацию о средних значениях модулей упругости и отклонения от них. Модули упругости значительно различаются: характеристики, полученные при сжатии пластинчатых структур, в большинстве случаев несколько превышают характеристики идентичных образцов со скелетными структурами.

Интересно отметить изменение значения модуля упругости материала, из которого изготовлен скаффолд. В предыдущей статье авторов [9] была

Геометрические характеристики призматических образцов, созданных на основе элементарных ячеек различных ТПМП-структур

φ, %	Тип ТПМП	$m_{скафф}$, г	$V_{скафф}$, мм ³	S , мм ²	$S_{уд}$	$\rho_{скафф} \cdot 10^{-3}$, г/мм ³	$\rho_{эфф} \cdot 10^{-3}$, г/мм ³	T
Schwarz-P								
50,0	Scelet	2,17	2047,68	3340,77	1,63	1,1	0,53	0,061
	Plast	2,03	2048,08	4599,58	2,25	0,99	0,5	0,809
Schwarz-D								
50,0	Scelet	2,22	2028,06	4547,17	2,22	1,1	0,54	–0,0075
	Plast	2,81	2026,88	7421,4	3,63	1,4	0,69	0,3885
I-WP								
50,0	Scelet	2,19	2048,38	4342,07	2,12	1,07	0,53	–0,1099
	Plast	2,7	2048,36	6552,62	3,2	1,32	0,66	4,094
Gyroid								
50,0	Scelet	2,24	2048,05	3832,2	1,87	1,09	0,55	–0,0092
	Plast	2,36	2047,68	6245,12	3,05	1,15	0,58	0,6089

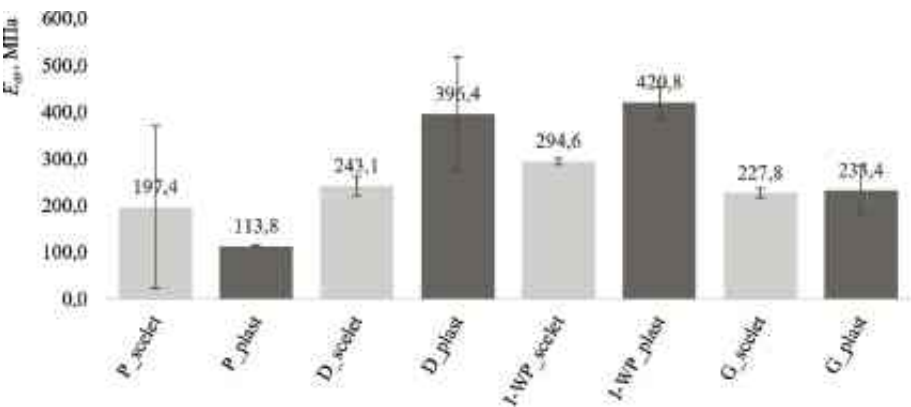


Рис. 4. Значения усредненных упругих модулей для образцов с различными типами внутренней структуры

проведена теоретическая оценка упругих свойств метаматериалов, построенных с помощью трижды периодических минимальных поверхностей. В частности, для ячеек периодичности скелетного типа были определены следующие безразмерные значения модулей упругости в направлении осей материальной симметрии относительно модуля Юнга базового материала: 0,296 (Schwarz-P), 0,184 (Schwarz-D), 0,294 (I-WP), 0,207 (Gyroid). Сравнивая с экспериментально определенными модулями упругости аддитивно изготовленных образцов метаматериала на основе данных ячеек (рис. 4), получаем из линейного соотношения значения модуля Юнга аддитивного материала, из которого выполнен образец соответствующего типа: 667 МПа (Schwarz-P), 1321 МПа (Schwarz-D), 1001 МПа (I-WP), 1100 МПа (Gyroid). Данные значения значительно меньше полученного модуля Юнга тестового образца полилактида, равного 1805 МПа, и сильно зависят от типа ТПМП. Таким образом, результаты подтверждают существенное влияние как процесса FDM-печати, так и внутренней архитектуры метаматериала на упругие свойства аддитивно изготавливаемых пористых структур, включая свойства базового материала.

Несмотря на ограничение выборки, можно сделать вывод, что использование ненаполненного полилактида для изготовления скаффолдов является рациональным при создании скаффолдов для замещения губчатого костного вещества, поскольку представленные упругие и прочностные характеристики скаффолда со средней пористостью близки к значениям трабекулярной кости. При этом хотя образцы на основе ТПМП I-WP показали наибольшие значения эффективного модуля упругости, оказалось, что модуль Юнга аддитивного материала при производстве скаффолда на основе I-WP намного меньше модуля Юнга в случае остальных структур. Это означает, что печать таких структур сопряжена с определенными сложностями и может привести к дефектам при эксплуатации впоследствии.

Если по медицинским показателям требуется замещение более плотной костной ткани, несущей высокую физиологическую нагрузку, то может быть предложено два варианта решения такой проблемы. Во-первых, при проведении операции тканезамещения необходимо использовать аппараты внутренней или внешней фиксации на основе металлических сплавов, например аппарат Илизарова. Это позволит в начальный этап регенерации костной ткани контролировать допустимую нагрузку на поврежденную конечность со скаффолдом. Второй вариант касается разработки более сложных композиционных материалов на

основе полилактида с добавлением гидроксиапатита, что способно повысить прочность и жесткость скаффолда.

Выводы

Внедрение аддитивных технологий (3D-печати) сделало физическое воплощение сложных математических форм технически и экономически возможными. Разработанная методика параметрического моделирования ТПМП-структур доказала свою эффективность для создания скаффолдов с прогнозируемыми морфологическими характеристиками, что открывает возможности для цифрового проектирования персонализированных имплантатов. Установленные количественные зависимости между типом структуры и ее геометрическими параметрами позволяют формализовать процесс проектирования скаффолдов и перейти от эмпирического подхода к целенаправленному синтезу структур с заданными свойствами. Выявленные преимущества создают основу для разработки градиентных и гибридных скаффолдов, сочетающих лучшие характеристики отдельных структур в индивидуальных имплантатах. Полученные данные позволяют существенно сократить время разработки оптимальных скаффолдов за счет доступной контролируемости их морфологических характеристик и исключения необходимости множества итераций экспериментального подбора параметров. Установленная зависимость между размером поры в ячейке и характеристиками пористости структур предоставляет новый инструмент для оценки сложности внутренней архитектуры скаффолдов и прогнозирования их биологической эффективности.

Однако критическим этапом, предшествующим дорогостоящему прототипированию и биологическим испытаниям, является виртуальное проектирование и верификация. Здесь на первый план выходит комплексное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в специализированных инженерных средах. Теоретическая значимость исследования состоит в получении механических характеристик, используемых при математическом описании процессов репаративной регенерации костной ткани. При этом стоит учитывать влияние внешней среды на физические и механические свойства материала, из которого изготавливаются скаффолды.

Практическая ценность результатов и актуальность для современной медицины заключается в возможности научного обоснования разрабатываемых методик моделирования и создания биомедицинских изделий. Результаты работы могут быть применены в современных медицинских

технологиях для разработки искусственных заменителей костной ткани, таких как эндопротезы с развитой пористой поверхностью и скаффолды из биodeградируемых полимерных материалов.

Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

Список источников / References

1. Zhang Z, Yu C, Ren G, et al. Laser Additive Manufacturing of three-dimensional porous structures: Structural design, microstructure, mechanical properties and applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;36:3684–3725. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.04.003
2. Varghese MG, Thomas A, Rupesh S, et al. Fabrication Techniques for Scaffolds Applied in Regenerative Medicine. In: *Vizureanu P, Bălăţu MS. (eds) Novel Biomaterials for Tissue Engineering*. IntechOpen. London; 2024; p. 1–13. DOI: 10.5772/intechopen.110827
3. Antipova Ch, Lukanina K, Krashenninnikov S, et al. Study of highly porous poly-L-lactide-based composites with chitosan and collagen. *Polymers for Advanced Technologies*. 2020;32(2):853–860. DOI: 10.1002/pat.5136
4. Hollister SJ. Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials*. 2005;4:518–524. <https://doi.org/10.1038/nmat1421>
5. Loh QL, Choong C. Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: role of porosity and pore size. *Tissue Engineering Part B Reviews*. 2013;19(6):485–502. DOI: 10.1089/ten.TEB.2012.0437
6. Elenskaya N, Koryagina P, Tashkinov M, et al. Effect of degradation in polymer scaffolds on mechanical properties: Surface vs. bulk erosion. *Computers in Biology and Medicine*. 2024;174:108402. DOI: 10.1016/j.combiomed.2024.108402
7. Borovkov AI, Maslov LB, Zhmaylo MA, et al. Elastic properties of additively produced metamaterials based on lattice structures. *Materials Physics and Mechanics*. 2023;51(7):42–62. DOI: 10.18149/MPM.5172023_6
8. Zadpoor AA. Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry. *Biomaterials Science*. 2015;3(2):231–245. DOI: 10.1039/C4BM00291A
9. Borovkov AI, Maslov LB, Zhmaylo MA, Tarasenko FD, Nezhinskaya LS. Finite element analysis of elastic properties of metamaterials based on triply periodic minimal surfaces. *Materials Physics and Mechanics*. 2024;52(2): 11–29. DOI: 10.18149/MPM.5222024.2
10. Pinheiro J, Castro APG, Ruben RB, et al. Mechanical properties assessment for TPMS based scaffolds using homogenization methods. *6th European Conference on Computational Mechanics: Solids, Structures and Coupled Problems (June 11–15, 2018; Glasgow, Scotland, UK)*. p. 1468–1474.
11. Li L, Wang L, Liang J, et al. Design of a Haversian system-like gradient porous scaffold based on triply periodic minimal surfaces for promoting bone regeneration. *Journal of Advanced Research*. 2023;54:89–102. DOI: 10.1016/j.jare.2023.01.004
12. Maslov LB, Borovkov AI, Nezhinskaya LS, Zhmaylo MA, Tarasenko FD. Strength characteristics of additively manufactured meta-biomaterials made of titanium alloy under cyclic loading. *Materials Physics and Mechanics*. 2025;53(5):50–73. DOI: 10.18149/MPM.5352025.4
13. Elenskaya N, Tashkinov M. Modeling of deformation behavior of gyroid and I-WP polymer lattice structures with a porosity gradient. *Procedia Structural Integrity*. 2021;32:171–178. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.036
14. Maskery I, Sturm L, Aremu AO, et al. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. *Polymer*. 2018;152:62–71. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.11.049
15. Xu Z, Razavi SMJ, Ayatollahi MR. Functionally Graded Lattice Structures: Fabrication Methods, Mechanical Properties, Failure Mechanisms and Applications. In: *Ferri Aliabadi MH & Soboyejo WO (eds) Comprehensive Structural Integrity*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Science; 2023. Vol. 2, p. 433–466. DOI: 10.1016/B978-0-12-822944-6.00019-0
16. Krupnin AE, Zakirov AR, Sedush NG, et al. Theoretical and Experimental Investigation of 3D-Printed Polylactide Laminate Composites' Mechanical Properties. *Materials*. 2023;16(22):7229. DOI: 10.3390/ma16227229
17. Monaldo E, Ricci M, Marfia S. Mechanical properties of 3D printed polylactic acid elements: Experimental and numerical insights. *Mechanics of Materials*. 2023;177:104551. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104551
18. Bartosiak R, Kaźmierczyk F, Czapski P. The Influence of Filament Orientation on Tensile Stiffness in 3D Printed Structures – Numerical and Experimental Studies. *Materials*. 2023;16(15):5391. DOI: 10.3390/ma16155391
19. Stojković JR, Turudija R, Vitković N, et al. An Experimental Study on the Impact of Layer Height and Annealing Parameters on the Tensile Strength and Dimensional Accuracy of FDM 3D Printed Parts. *Materials*. 2023;16(13):4574. DOI: 10.3390/ma16134574
20. Maslov LB. Biomechanical model and numerical analysis of tissue regeneration within a porous scaffold. *Mechanics of Solids*. 2020;55(7):1115–1134. DOI: 10.3103/S0025654420070158

21. Maslov LB, Ilyina EE. Mathematical modeling of bone tissue regeneration processes under mechanical stimulation. *Mechanics of Solids*. 2025;60(7):5504-5525. DOI: 10.1134/S0025654425604252
22. Ильина Е.Э., Маслов Л.Б. Исследование влияния раннего нагружения на регенерацию костной ткани в объеме пористого скаффолда // XXXVI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2024): Сборник трудов конференции (4 - 6 декабря 2024; Москва). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2024. С. 274-281.
Ilyina EE, Maslov LB. Study of the effect of early loading on bone tissue regeneration in a porous scaffold. *36th International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering" (ToPME-2024; December 4 - 6, 2024; Moscow)*. Moscow: IMASH RAS; 2024. p. 274-281. (In Russ.).
23. Ermolenko YuV, Semyonkin AS, Ulianova YuV, et al. Role of hydrolytic degradation of polylactide drug carriers in developing micro- and nanoscale polylactide-based drug dosage forms. *Russian Chemical Bulletin*. 2020;69(7):1243-1253. DOI: 10.1007/S11172-020-2918-0
24. Tyler B, Gullotti D, Mangraviti A, et al. Polylactic acid (PLA) controlled delivery carriers for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2016;107:163-175. DOI: 10.1016/j.addr.2016.06.018

Статья поступила в редакцию / Received 30.06.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 22.07.2026
Принята к публикации / Accepted 23.07.2026