

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д. В. Сорокин¹, Е. В. Москвичев²✉

¹Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнёва
г. Красноярск, Российская Федерация

²Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий
г. Красноярск, Российская Федерация

Трижды периодические минимальные поверхности (Triply Periodic Minimal Surfaces) в последние десятилетия привлекают значительный интерес исследователей во многих областях, таких как автомобилестроение, авиа-, ракетостроение, химическая промышленность, медицина, биоматериалы и другие. Ячеистые структуры, полученные из таких поверхностей, обладают широкими возможностями в настройке физико-механических свойств для создания новых материалов и элементов конструкций. В данной работе авторами рассматриваются основные вопросы моделирования ячеистых структур типа Gyroid, Schwarz Primitive, I-WP (I-graph-wrapped package) и Schwarz Diamond. Для двух выбранных типов ячеистых структур Gyroid и I-WP был исследован диапазон параметров, влияющих на относительную плотность (объемную долю) материала в кубической элементарной ячейке. На основе элементарной ячейки были созданы геометрические модели образцов с периодически повторяющейся структурой для проведения механических испытаний. Образцы были напечатаны на 3D-принтере и испытаны на сжатие до разрушения с фиксацией диаграмм нагружения и перемещений точек образца. Экспериментальные исследования позволили сделать вывод, что механические свойства образцов существенно зависят от относительной плотности (объемной доли) элементарной ячейки рассматриваемого типа. Управление относительной плотностью может быть полезным инструментом для достижения требуемых механических характеристик проектируемых материалов и элементов конструкций с уникальными свойствами.

Ключевые слова: трижды периодические минимальные поверхности, ячейки, ячеистые структуры, 3D-печать, аддитивные технологии, механические испытания.

Введение

Аддитивное производство и прототипирование, в частности 3D-печать, в настоящее время перешли из разряда инновационных в повсеместно применяемые технологии для изготовления сложных элементов конструкций в различных областях промышленности [1]. При этом в последние десятилетия продолжается прогресс и совершенствование оборудования для аддитивного производства и 3D-печати. Разнообразие техноло-

гий формирования изделий, точность изготовления, геометрические особенности в виде сложной и индивидуальной формы, соблюдение, повторяемость и контроль технологических параметров и режимов «выращивания» позволяет говорить о широких возможных областях применения аддитивных технологий в автомобилестроении, общем машиностроении, авиа-, ракетостроении, химической промышленности, медицине и других [2–9].

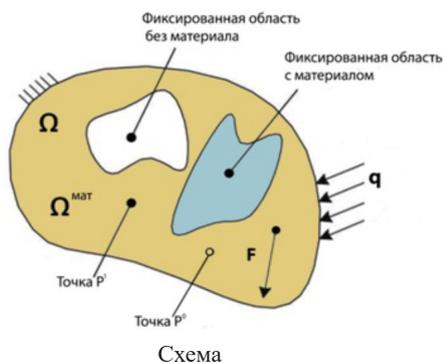
Одной из особенностей изготовления элементов конструкций методом аддитивных технологий является возможность создания изделий со сложной геометрической формой и пространственно-распределенной 3D-архитектурой. Такие геоме-

✉ sdv@sibsau.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

трические формы невозможно получить традиционными субтрактивными методами производства [10]. Сюда можно отнести изготовление изделий, проектируемых с применением алгоритмов топологической оптимизации (рисунок 1) [11] и периодических (непериодических) ячеистых структур (рисунок 2) [12].

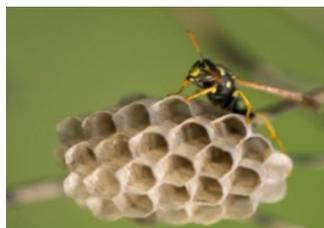
поглощения (абсорбации) энергии (ударных нагрузок), ударопрочность, звукопоглощение и теплообменные свойства [15–25]. Развитие аддитивных технологий позволяет использовать данные ячеистые структуры в различных инженерных задачах. Например, при проектировании несущих элементов конструкций с заполнением ячеисты-



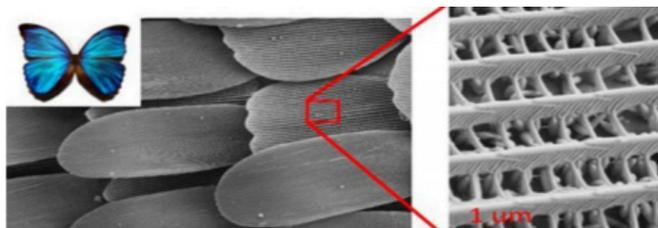
Исходная деталь

Деталь после оптимизации

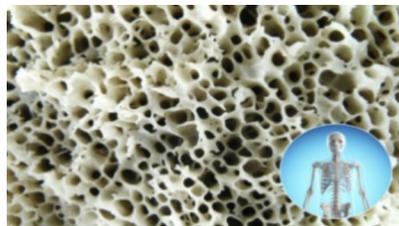
Рисунок 1. Топологическая оптимизация конструкции



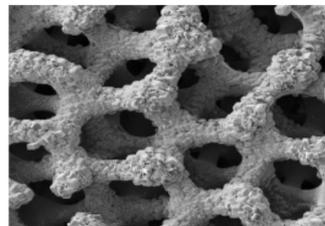
а



б



в



г

Рисунок 2. Ячеистые структуры в природе: а – пчелиные соты; б – крылья бабочки; в – человеческая кость; г – морская звезда

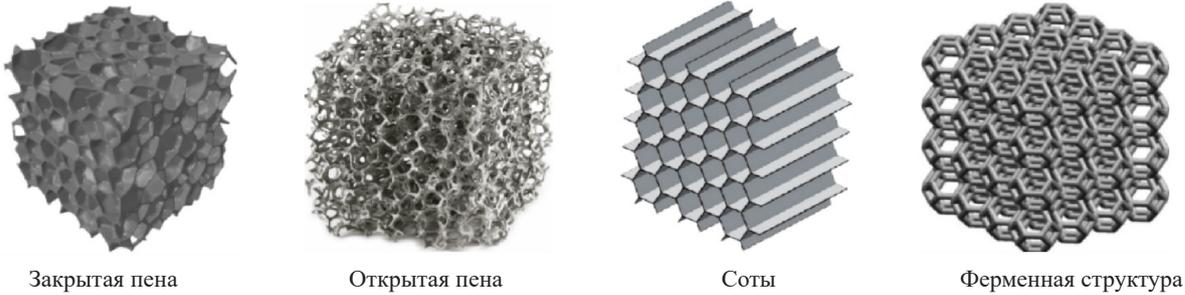
Ячеистые структуры широко встречаются в природе и являются источником вдохновения для исследований во многих направлениях (рисунок 2) [13]. Получаемые результаты исследований можно использовать для новых инженерных решений при проектировании в различных областях.

Ячеистые структуры можно рассматривать как потенциальную возможность для замены сплошного объема в элементе конструкции с целью снижения его массы, расхода дорогостоящих материалов при сохранении функциональных и эксплуатационных характеристик (рисунок 3) [14].

Ячеистые структуры обладают определенными уникальными свойствами. К ним можно отнести легкий вес, высокую удельную жесткость и прочность, что очень важно при создании авиационной и космической техники, отличные характеристики

ми структурами или создании функциональных композитных материалов с периодическими ячеистыми структурами и настраиваемыми физико-механическими свойствами [26–31].

Особую роль рассматриваемые ячеистые структуры имеют для аэрокосмической отрасли. Их применение в элементах конструкций космических аппаратов (КА) позволит решать задачи снижения веса при сохранении жесткостных и прочностных показателей, поскольку ячеистые структуры обладают широкими возможностями управления их относительной плотностью. Благодаря особенному характеру деформирования ячеистые структуры могут использоваться при создании функциональных материалов и деталей для поглощения ударных и снижения вибрационных нагрузок, акустического воздействия. Кроме



Закрытая пена

Открытая пена

Соты

Ферменная структура

Рисунок 3. Ячеистые структуры для элементов конструкций

того, перспективным инженерным решением является использование изучаемых ячеистых структур в системах терморегулирования КА (теплообменники, радиаторы) за счет высоких удельных поверхностных характеристик.

В связи с перечисленными особенностями становится интересным применение ячеистых структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей (Triply Periodic Minimal Surfaces – TPMS). Для реализации функционального проектирования новых материалов и конструкций с заданными свойствами на основе TPMS необходимо системное понимание особенностей деформирования, механизма и характера разрушения данных ячеистых структур. В основе этого лежит информация о механических свойствах, таких как модуль упругости, предел прочности при растяжении/сжатии и других. Для оценки механических свойств, а также их зависимости от геометрических и технологических параметров необходимы экспериментальные исследования образцов ячеистых структур, изготовленных аддитивным методом [32–33].

В данной статье рассматриваются вопросы геометрического моделирования, изготовления методом 3D-печати и проведения экспериментальных исследований образцов периодических ячеистых структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей.

Целью статьи является исследование механических свойств образцов, изготовленных методами фотополимерной 3D-печати для выбранных двух типов ячеек TPMS с различными значениями относительной плотности. Полученные результаты позволят оценить зависимость геометрических и технологических параметров на характер деформирования и прочностные свойства изготовленных образцов.

1. Геометрическое моделирование TPMS

Минимальная поверхность – это поверхность, для которой средняя кривизна $H = (k_1 + k_2)/2$ равна нулю в каждой точке и, соответственно, $k_1 = -k_2$, где k_1 и k_2 – главные кривизны в двух взаимно ортогональных плоскостях. Минимальные поверхности, такие как катеноид и геликоид, были открыты и описаны в XVIII веке. В XIX веке Герман Шварц описал периодические минимальные поверхности Schwarz's Primitive (далее Primitive) и Schwarz's Diamond (далее Diamond), обладающие кубической симметрией. В 1970 году Alan Hugh Schoen – американский физик, исследователь, сотрудник NASA, описал 12 новых TPMS, основанных на графических схемах кристаллических решёток, таких как Gyroid и I-WP [34]. На рисунке 4 представлены TPMS, рассматриваемые в данной статье.

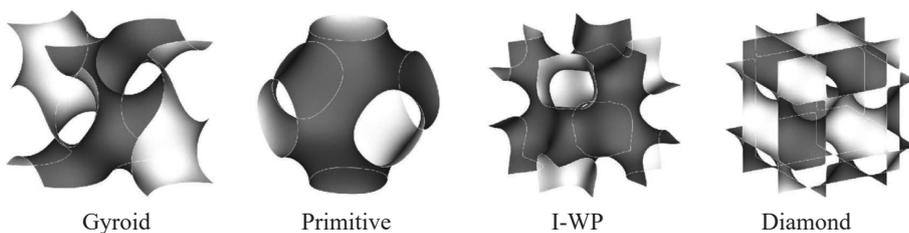
Трёхмерные координаты минимальной поверхности TPMS могут быть определены как вещественные части следующих комплексных интегралов, согласно параметризации Эннепера-Вейерштрасса:

$$x = \operatorname{Re} \left(e^{i\theta} \int_{\omega_0}^{\omega} (i - \tau)^2 F(\tau) d\tau \right),$$

$$y = \operatorname{Re} \left(e^{i\theta} \int_{\omega_0}^{\omega} i(i + \tau)^2 F(\tau) d\tau \right),$$

$$z = \operatorname{Re} \left(e^{i\theta} \int_{\omega_0}^{\omega} \tau F(\tau) d\tau \right),$$

где $i^2 = -1$; $\tau = \tau_a + \tau_b$; θ – угол Бонне; $F(\tau) = (1 - 14\tau^4 + \tau^8)^{-1/2}$ – функция Вейерштрасса.



Gyroid

Primitive

I-WP

Diamond

Рисунок 4. Трижды параметрические минимальные поверхности

Из-за сложности вычислений данных комплексных интегралов функции для описания топологий TPMS можно с достаточной точностью аппроксимировать с использованием ряда Фурье [35]. При этом надо понимать, что средняя кривизна $H = 0$ получаемых поверхностей будет достигаться при увеличении количества членов ряда, аппроксимирующих минимальную поверхность TPMS:

$$F(\mathbf{r}) = \sum_n \left(A_n(\mathbf{r}) \cos \left(2\pi \mathbf{r} \frac{n}{L} + \theta_n \right) \right),$$

где $A_n(\mathbf{r})$ – амплитуда n -ой ячейки; $2\pi \cdot n/L$ – частота и размер элементарной ячейки; θ_n – начальная фаза; \mathbf{r} – радиус-вектор.

Применение ряда Фурье позволяет получить неявную функцию $F(x, y, z) = 0$ от трех переменных [36]. Данная функция образует поверхность, которая разделяет область элементарной кубической ячейки на два подпространства, лежащие внутри или снаружи поверхности. Рассматриваемые в статье ячейки минимальных поверхностей могут быть описаны в первом порядке аппроксимации следующими уравнениями:

$$F_G(x, y, z) = \cos(2\pi X) \sin(2\pi Y) + \cos(2\pi Y) \sin(2\pi Z) + \cos(2\pi Z) \sin(2\pi X) = 0, \quad (1)$$

$$F_P(x, y, z) = \cos(2\pi X) + \cos(2\pi Y) + \cos(2\pi Z) = 0, \quad (2)$$

$$F_D(x, y, z) = \cos(2\pi X) \cos(2\pi Y) \cos(2\pi Z) - \sin(2\pi X) \sin(2\pi Y) \sin(2\pi Z) = 0, \quad (3)$$

$$F_{IWP}(x, y, z) = 2 \left(\begin{array}{l} \cos(2\pi X) \cos(2\pi Y) + \\ + \cos(2\pi Y) \cos(2\pi Z) + \\ + \cos(2\pi Z) \cos(2\pi X) \end{array} \right) - (\cos(4\pi X) + \cos(4\pi Y) + \cos(4\pi Z)) = 0, \quad (4)$$

$$X = xn_x/L_x, \quad Y = yn_y/L_y, \quad Z = zn_z/L_z,$$

где F_G – ячейка типа Gyroid; F_P – ячейка типа Primitive; F_D – ячейка типа Diamond; F_{IWP} – ячейка типа I-WP; L_x, L_y, L_z – проектируемые размеры ячейки в трех осевых направлениях, n_x, n_y, n_z – количество повторений ячейки вдоль осей координат.

Для создания ячеистых структур применялось программное обеспечение MSLattice Software, разработанное Oraib Al-Ketan из Нью-Йоркского университета Абу-Даби в сотрудничестве с Rashid Abu Al-Rub из Халифского университета науки и технологий [37]. MSLattice позволяет генерировать различные типы ячеек и может сохранять получаемые результаты в файлы формата STL, необходимые для изготовления ячеистых структур с использованием аддитивного производства. Программное обеспечение позволяет пользователю создавать однородные, а также функционально градиентные ячеистые структуры на основании выбранного вида известных ячеек TPMS. Также пользователь может задавать и строить собственные топологии ячеек на основе неявных функций и экспортировать соответствующие результаты в CAD/CAE-системы.

В качестве примера рассмотрим результат построения элементарной ячейки и ячеистой структуры типа Primitive на основе уравнения (2). Непосредственно уравнение $F_P(x, y, z) = 0$ позволяет построить поверхность нулевой толщины (рисунок 5). Однако если добавить в правую часть уравнения параметр t и составить неравенство $-t \leq F_P(x, y, z) \leq t$, то можно построить ячейку в виде оболочки. Аналогично строится ячейка в виде сплошного тела согласно неравенству $F_P(x, y, z) \leq t$. Таким образом, параметр t в сочетании с уравнениями (1)-(4) отвечает за объемную долю материала в ячейке.

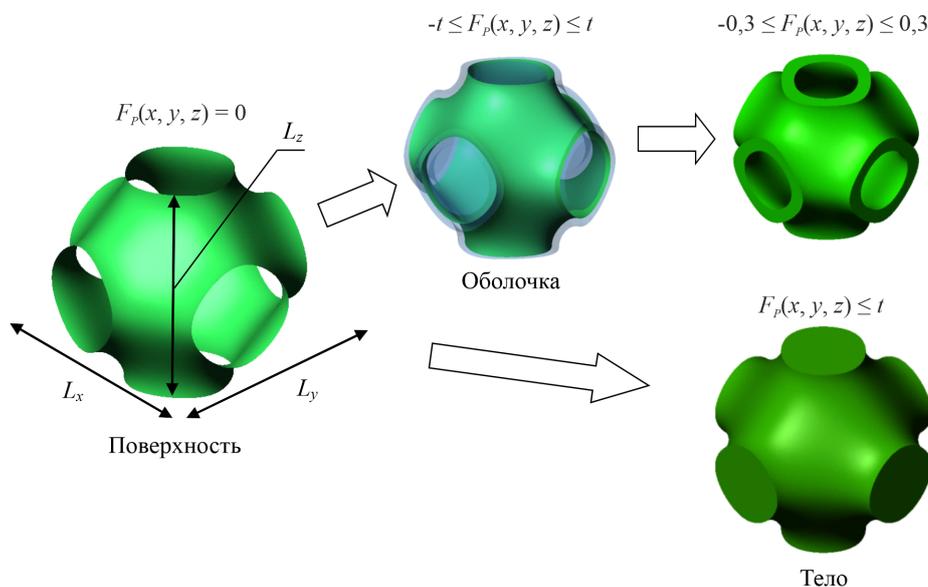


Рисунок 5. Ячейка типа Primitive в виде поверхности, оболочки и тела

На рисунке 6 представлена ячейка размерами $L_x = L_y = L_z = 5$ мм, а также ячеистая структура, построенная на основе данной ячейки с количеством повторений ячеек $n_x = n_y = n_z = 4$. Таким образом, размеры ячеистой структуры составили $20 \times 20 \times 20$ мм. Относительная плотность ячеистой структуры определяется как отношение объема материала в ячейке V к объему габарита ячейки:

$$\rho = \frac{V}{L_x L_y L_z} \times 100\%,$$

где V – объем, ограниченный поверхностью TPMS и границами ячейки при $|x| \leq L_x/2, |y| \leq L_y/2, |z| \leq L_z/2$.

Относительная плотность структуры на рисунке 6 составила 28,55 %.

В таблице 1 представлены примеры ячеек, созданных на основе уравнений (1)-(4). Данные топологии элементарной ячейки могут служить для создания как периодических ячеистых структур с заданными размерами, так и пористой структуры различных конструктивных элементов.

2. Создание образцов TPMS типа Gyroid и I-WP

На основе вышеизложенных подходов были заданы уравнения и параметры для моделирования экспериментальных образцов ячеистых структур типа Gyroid и I-WP. Образцы имели квадратное поперечное сечение размером 40×40 мм и высоту 60 мм соразмерно оснастке испытательной машины.

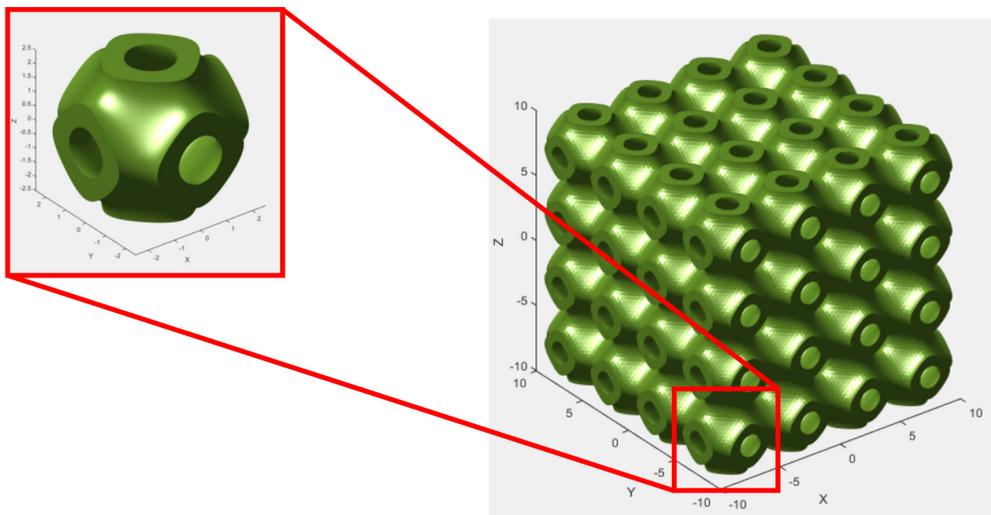
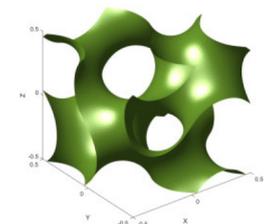
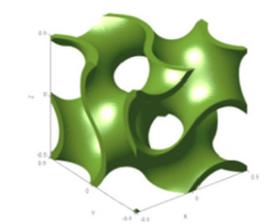
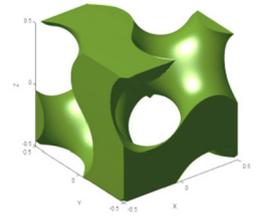
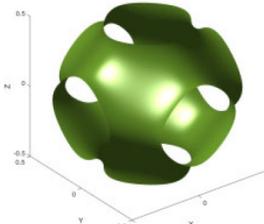
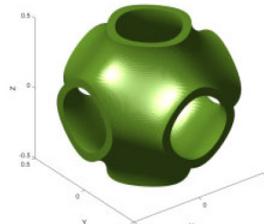
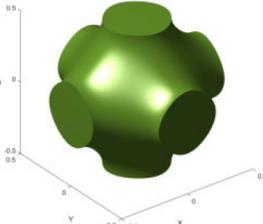
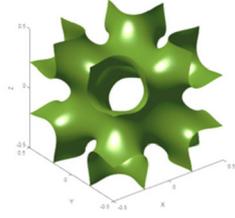
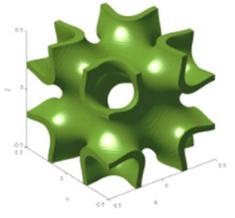
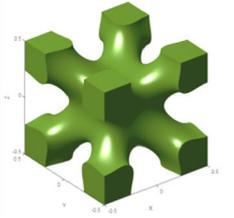
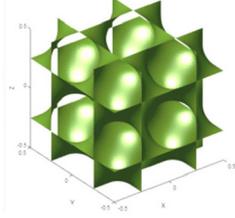
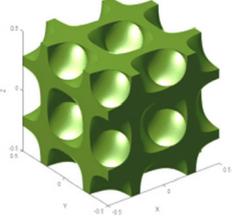
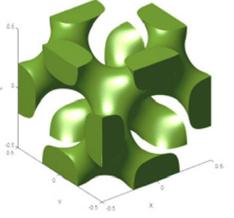


Рисунок 6. Элементарная ячейка типа Primitive и периодическая ячеистая структура

Таблица 1

Примеры ячеек

| Тип ячейки | Форма ячейки | | |
|------------|--|--|---|
| | Поверхность | Оболочка | Тело |
| Gyroid |  $t = 0$ |  $t = \pm 0,25$ |  $t = 0,25$ |
| Primitive |  $t = 0$ |  $t = \pm 0,2$ |  $t = 0,2$ |

| Тип ячейки | Форма ячейки | | |
|------------|--|---|---|
| | Поверхность | Оболочка | Тело |
| I-WP |  t = 0 |  t = ±0,75 |  t = 0,75 |
| Diamond |  t = 0 |  t = ±0,25 |  t = 0,25 |

Для создания ячеистых структур в виде оболочки типа Gyroid на основе уравнения (1) были выбраны размеры элементарной ячейки $L_x = L_y = L_z = 10$ мм и различные значения параметра $t = \{0,55; 0,65; 0,75; 0,85\}$. Количество повторений элементарных ячеек в соответствующих направлениях по осям было равно: $n_x = n_y = 4, n_z = 6$. Полученные 3D-модели ячеистых структур типа Gyroid с заданными параметрами представлены в таблице 2.

Для создания ячеистых структур в виде оболочки типа I-WP на основе уравнения (4) были выбраны размеры элементарной ячейки $L_x = L_y = L_z = 10$ мм и различные значения параметра $t = \{1,6; 1,8; 2,0\}$. Количество повторений элементарных ячеек в соответствующих направ-

лениях по осям было равно: $n_x = n_y = 4, n_z = 6$. Полученные 3D-модели ячеистых структур типа I-WP с заданными параметрами представлены в таблице 3.

Трехмерные модели, сгенерированные в MSLattice, сохранялись в файлы с формата STL и экспортировались в CAD-систему трехмерного моделирования. Для исключения краевого эффекта при механических испытаниях к моделям образцов были добавлены сверху и снизу сплошные площадки толщиной 4 мм, после чего данные модели были переданы в препроцессор для подготовки к 3D-печати.

Образцы были изготовлены по технологии трехмерной фотополимерной печати из смолы Anycubic ABS-Like Resin Pro 2 на 3D-принтере

Таблица 2

3D-модели образцов типа Gyroid

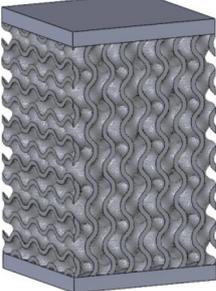
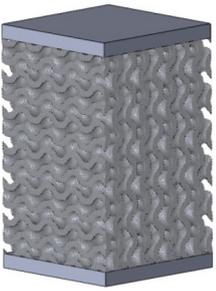
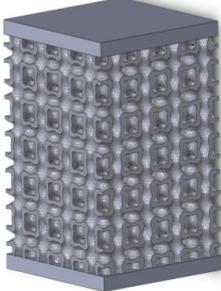
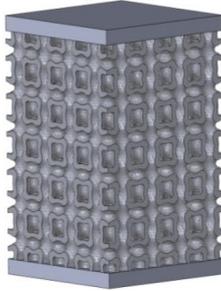
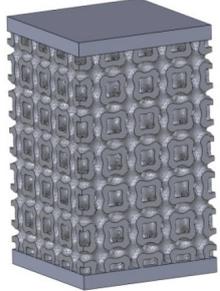
| Образец | GYR 55 | GYR 65 | GYR 75 | GYR 85 |
|----------------------------|---|---|--|---|
| Параметр t | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 |
| Относительная плотность, % | 34,67 | 41,77 | 48,84 | 55,96 |
| Толщина стенки, мм | 1,194–1,292 | 1,51–1,61 | 1,999–1,92 | 2,027–2,143 |
| 3D-модель |  |  |  |  |

Таблица 3

3D-модели образцов типа I-WP

| Образец | IWP16 | IWP18 | IWP20 |
|----------------------------|---|--|---|
| Параметр t | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| Относительная плотность, % | 42,27 | 48,54 | 55,04 |
| Толщина стенки, мм | 1,03–1,6 | 1,22–1,825 | 1,46–2,09 |
| 3D-модель |  |  |  |

модели Anycubic Photon Mono Pro 4K. Толщина слоя печати составляла 50 мкм, время отверждения слоя – 2,5 с.

3. Механические испытания образцов материала

В проводимом авторами исследовании одной из перспективных задач является создание численных конечно-элементных моделей деформирования рассматриваемых ячеистых структур. Для корректного сравнения испытаний с численными расчетами необходимо иметь достоверные данные о механических свойствах материала, из которых изготовлены образцы. Поэтому для определения характеристик механических свойств материала ячеистых структур были проведены испытания стандартных образцов на растяжение и сжатие, выполненных из применяемой смолы Anycubic ABS-Like Resin Pro 2. Испытания выполнялись на основе методик, представленных в ГОСТ 11262–2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», ГОСТ 4651–2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие», ASTM D 638 «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics» и ASTM D 695 «Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics».

Чтобы обеспечить сходство механических свойств стандартных образцов, параметры печати устанавливались такими же, как и для печати образцов ячеистых структур. При печати образцы были сориентированы вертикально, т.е. перпендикулярно платформе 3D-принтера, вдоль направления ее движения. Плоские образцы на растяжение имели форму лопатки в захватной части (рисунок 7а). Образцы на сжатие имели форму цилиндра и изготавливались в двух вариантах: длинный – для определения модуля упругости (рисунок 7б), короткий – для определения предела прочности (рисунок 7в).

Испытания проводились в Инженерно-испытательном центре ФИЦ ИВТ на универсальной испытательной машине Tinius Olsen 100ST. Для испытаний на растяжение применялись клиновидные захваты (рисунок 8а), а для испытаний на сжатие – плоские пуансоны (рисунок 8б). Продольные деформации измерялись с помощью бесконтактного видеоэкстензометра по соответствующим меткам, которые наносились на рабочую часть образцов (рисунок 8в). Для измерения коэффициента Пуассона при растяжении на плоские образцы наклеивалось по два тензорезистора под углом 90°, по которым определялось отношение поперечных деформаций к продольным (рисунок 8г).

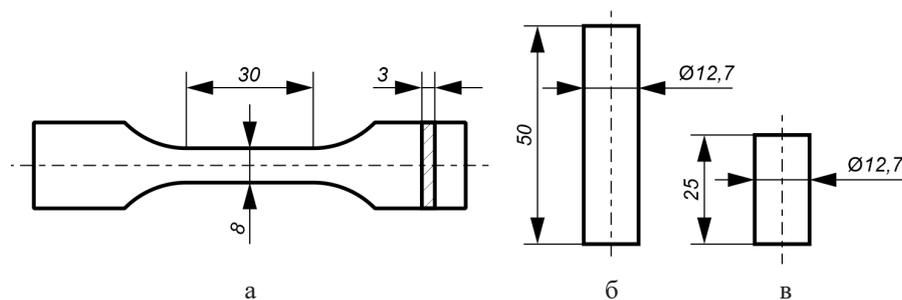


Рисунок 7. Образцы для испытаний: а – на растяжение; б, в – на сжатие

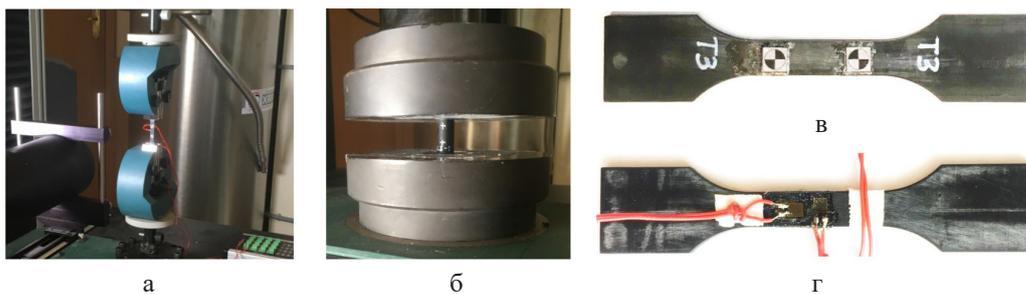


Рисунок 8. Испытательная оснастка: а – захваты на растяжение; б – пуансоны на сжатие; в – метки для измерения деформаций; г – тензорезисторы

Испытания на растяжение и сжатие проводились со скоростью движения траверсы 1 мм/мин. В ходе испытаний фиксировались диаграммы «нагрузка – перемещение», «напряжение – продольная деформация», а также «поперечная – продольная деформация» для образцов на растяжение. Всего было испытано 3 образца на растяжение и 2 образца на сжатие различной длины. Диаграммы деформирования, полученные в результате испытаний, представлены на рисунках 9 и 10.

Как видно из рисунка 9, диаграмма деформирования образца 1 существенно отличается от остальных образцов и имеет продолжительную стадию текучести. Данный эффект может объясняться неполной полимеризацией материала образца под действием ультрафиолета при 3D-печати. Таким образом, технологические параметры изготовления стандартных образцов и образцов ячеистых структур требуют тщательного контроля, чтобы обеспечить минимальный статистический разброс механических свойств материала.

Диаграммы деформирования при сжатии короткого и длинного образцов также отличаются. Короткий образец продемонстрировал эластичный характер деформирования, свойственный резинам. При достижении деформации более 25 % испытание было остановлено. Длинный образец в процессе испытаний потерял устойчивость при деформации 7,8 %, в связи с этим испытание также было остановлено.

По диаграммам деформирования были рассчитаны усредненные характеристики механических свойств исследованного материала, которые представлены в таблице 4.

4. Механические испытания образцов ячеистых структур

Как было сказано ранее, для механических испытаний были изготовлены образцы ячеистых структур на основе примитивов двух типов – Gyroid и I-WP (рисунок 11). Полученные образцы с ячеистой структурой имели квадратное сечение шириной 40 мм и высотой 60 мм. На торцах располагались плоские площадки толщиной 4 мм для равномерного распределения нагрузки. Таким

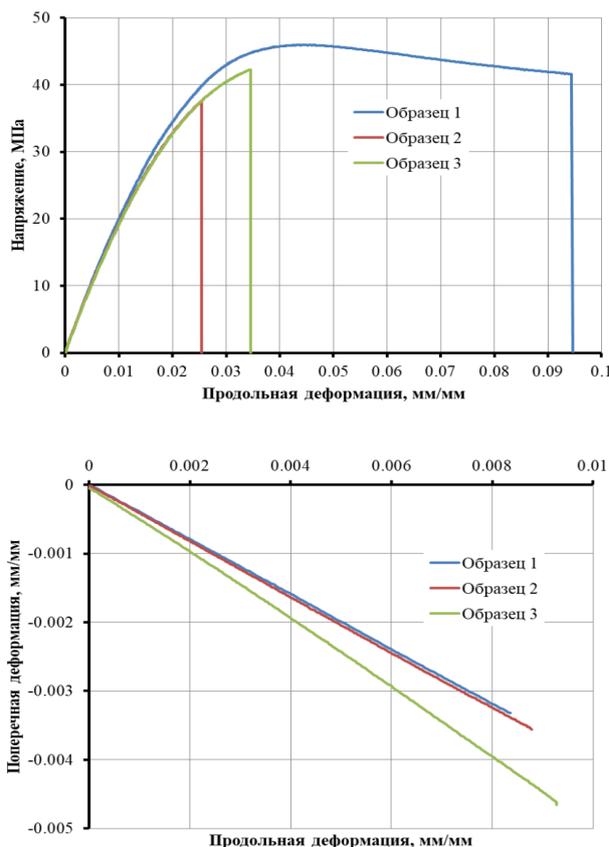


Рисунок 9. Диаграммы деформирования образцов на растяжение

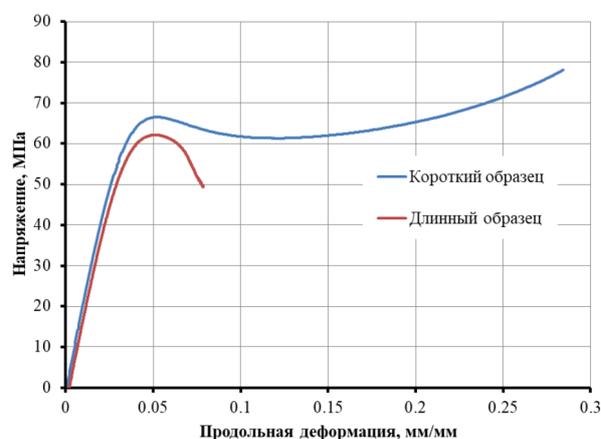


Рисунок 10. Диаграммы деформирования образцов на сжатие

Таблица 4

Характеристики механических свойств материала Anycubic ABS-Like Resin Pro 2

| Характеристика | Значение |
|--------------------------------------|----------|
| Модуль упругости при растяжении, МПа | 1943 |
| Предел прочности при растяжении, МПа | 41,97 |
| Коэффициент Пуассона при растяжении | 0,433 |
| Модуль упругости при сжатии, МПа | 2068 |
| Предел прочности при сжатии, МПа | 64,33 |

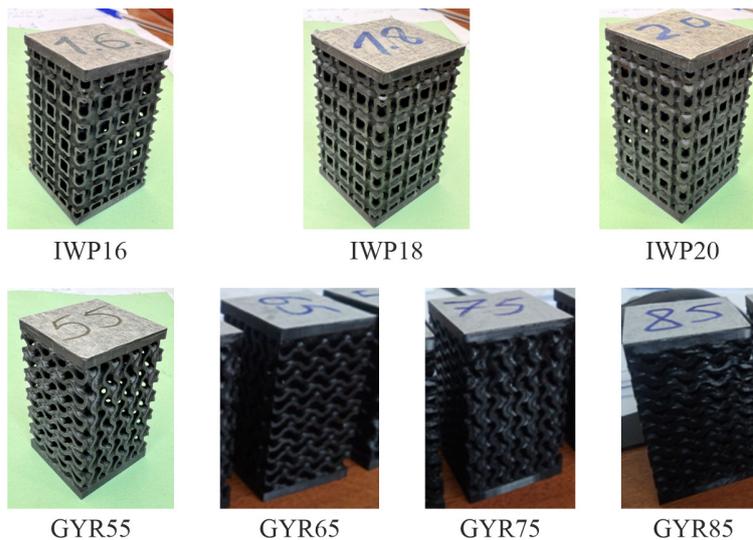


Рисунок 11. Образцы ячеистых структур

образом, суммарная высота образцов составляла 68 мм. Для каждого типа структуры, согласно таблицам 2 и 3, варьировался параметр t , определяющий толщину стенки примитива.

Образцы испытывались на сжатие на универсальной испытательной машине Tinius Olsen 100ST при помощи плоских пуансонов (рисунок 12а). Скорость нагружения составляла 3 мм/мин. В ходе испытаний фиксировались нагрузка и перемещение траверсы, а также посредством видеоэкстензометра перемещения четырех точек, расположенных вертикально в ячейках по центру образца (рисунок 12б).

Полученные диаграммы нагружения образцов ячеистых структур I-WP имеют два выраженных участка с различным характером возрастания нагрузки (рисунок 13а). Первый участок в диапазоне перемещений от 0 до 2,5 мм близок к линейному, характеризуется большей жесткостью и соответствует упругому деформированию образца. На втором участке с меньшей жесткостью значительно проявляются эффекты пластического деформирования материала. При дальнейшем увеличении нагрузки на характер деформирования начинают влиять эффекты контактного взаимодействия ячеек структуры и локального разрушения. Это, соответственно, проявляется в виде областей роста и падения нагрузки. Также из диаграмм следует,

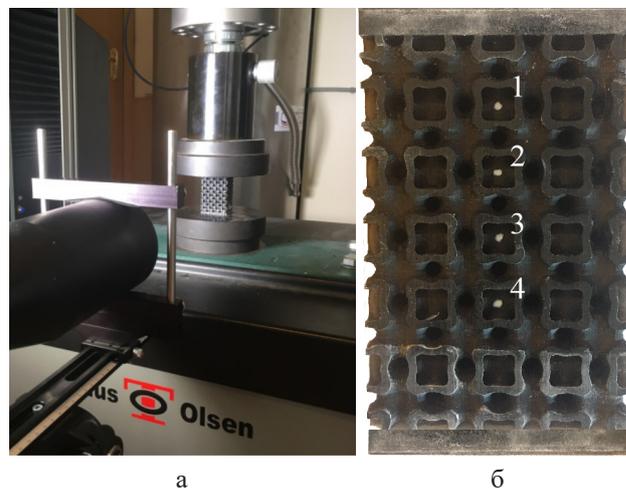


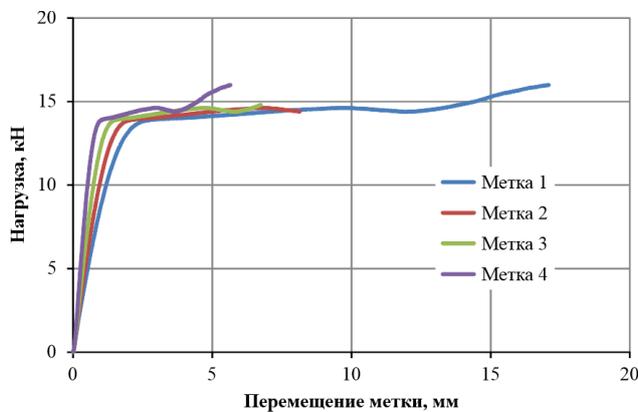
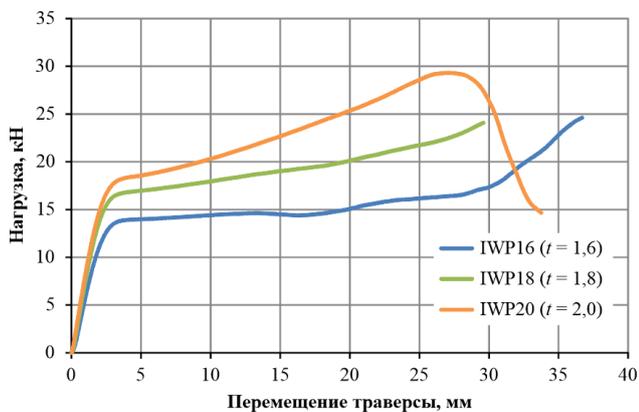
Рисунок 12. Испытания ячеистой структуры:
а – испытательная машина; б – образец с метками

что с увеличением параметра t жесткость образцов увеличивается на всех стадиях деформирования. Диаграммы перемещения меток на образцах I-WP аналогично имеют две выраженные стадии. На рисунке 13б представлены диаграммы для образца IWP16. Аналогичный характер перемещения меток наблюдался на образцах IWP18 и IWP20.

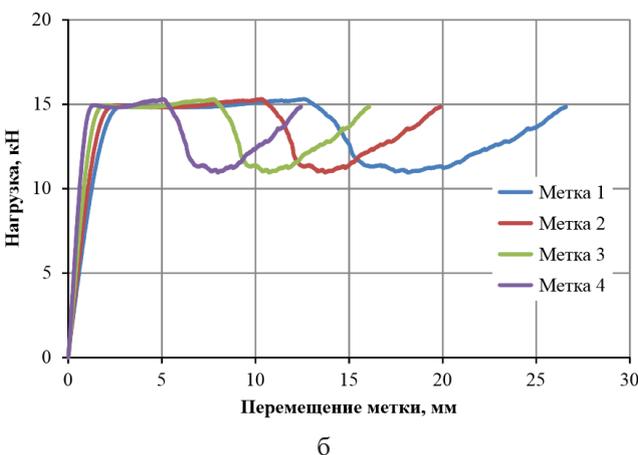
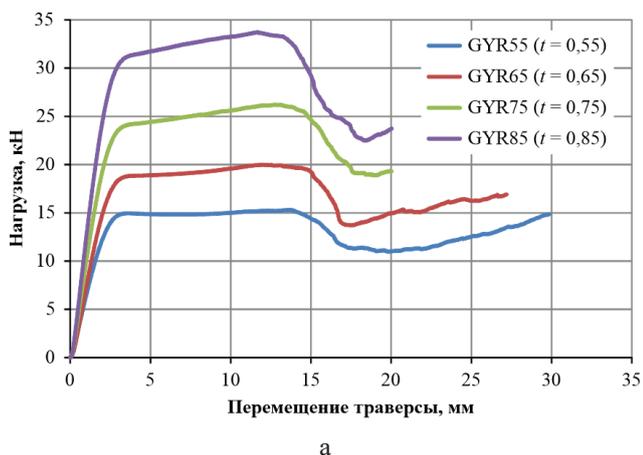
Диаграммы нагружения и перемещения меток для образцов ячеистых структур типа Gyroid имеют схожий характер по сравнению со структурой

типа I-WP (рисунок 14). Увеличение параметра t , определяющего толщину стенки примитива, ведет к увеличению жесткости образца. Снижение нагрузки и ее незначительный подъем на конечной

стадии деформирования соответствуют началу разрушения и сдавливанию ячеек. Данные эффекты можно визуально проследить на кадрах видеосъемки, представленных на рисунке 15.



а
б
Рисунок 13. Диаграммы нагружения образцов ячеистых структур I-WP: а – при различных значениях t ; б – перемещения меток образца IWP16



а
б
Рисунок 14. Диаграммы нагружения образцов ячеистых структур Gyroid: а – при различных значениях t ; б – перемещения меток образца GyR 55

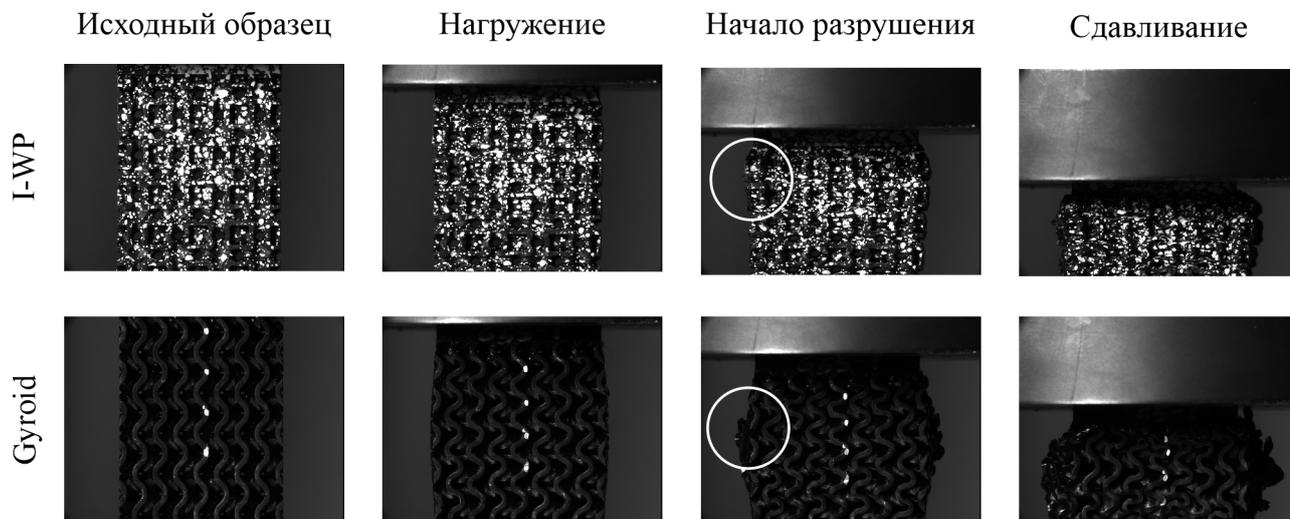


Рисунок 15. Характерные этапы деформирования образцов ячеистых структур

Заключение

С учетом изученного опыта предыдущих исследований авторами были смоделированы и изготовлены ячеистые структуры на основе TPMS типа Gyroid и I-WP. Для этого применялось открытое программное обеспечение MS Lattice и технология фотополимерной 3D-печати. Изготовленные образцы позволили провести апробацию широко применяемого экспериментального подхода по изучению жесткости и прочности ячеистых структур. Полученные в результате механических испытаний данные свидетельствуют о нелинейном характере деформирования образцов ячеистых структур. Данная нелинейность обусловлена

пластичностью материала, разрушением ячеек и их контактным взаимодействием при сжатии. Относительная плотность ячеистой структуры, определяемая параметром t , прямо влияет на жесткость образца. Характер данного влияния целесообразно изучить в сравнении с численным моделированием, которое является перспективным продолжением данных исследований.

Благодарности

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

Список литературы

- [1] Чжоу С., Жэнь Л., Сун З., Ли Г., Чжан Дж., Ли Б., Ву Ц., Ли В., Жэнь Л., Лю Ц. Достижения в области 3D/4D-печати механических метаматериалов: от производства к применению // Композиты Часть Б: Инженерия. 2023. № 254. DOI 10.1016/j.compositesb.2023.110585
- [2] Миао Х., Ху Дж., Ху Ю., Су Дж., Джинг Ю. Обзор механических свойств ячеистых структур из металла // Композитные конструкции. 2024. № 342. DOI 10.1016/j.compstruct.2024.118267
- [3] У Ю., Фан Дж., Ву К., Ли К., Сунь Г., Ли Ц. Материалы и конструкции, изготовленные аддитивным способом: современный обзор их механических характеристик и поглощения энергии // Международный журнал механических наук. 2023. № 246. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2023.108102
- [4] Вьявахаре С., Махеш В., Махеш В., Харурсампат Д. Метабиоматериалы, полученные аддитивным способом: современный обзор // Композитные конструкции. 2023. № 305. DOI 10.1016/j.compstruct.2022.116491
- [5] Ли З., Чен З., Чен С., Чжао Р. Проектирование и оценка 3D-печатных каркасов на основе TPMS для создания костной ткани: обеспечение механических свойств и свойств массообмена // Композитные конструкции. 2024. № 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117638
- [6] Се Х., Чен Дж., Лю Ф., Ван Р., Тан Ю., Ван Ю., Луо Т., Чжан К., Цао Дж. Композиты взаимопроникающей фазы Ti-PEEK с минимальной поверхностью для улучшения свойств ортопедических имплантатов // Композитные конструкции. 2024. № 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117638
- [7] Форуги А. Х., Лю Д., Разави М. Одновременная оптимизация жесткости, проницаемости и площади поверхности металлических костных каркасов // Международный журнал инженерных наук. 2023. № 193. DOI 10.1016/j.ijengsci.2023.103961
- [8] Ли Ц., Ган В., Ху Л., Лю С., Мао К., Ху Х., Ли Д. Сферические пористые структуры для осевого сжатия // Международный журнал механических наук. 2024. № 261. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2023.108681
- [9] Маконачи Т., Лири М., Лозановски Б., Чжан К., Цянь М., Фарук О., Брандт М. Сетчатые структуры SLM: свойства, характеристики, приложения и проблемы // Материалы и дизайн. 2019. № 183. DOI 10.1016/j.matdes.2019.108137
- [10] Томпсон М. К., Морони Г., Ванекер Т., Фадель Г., Кэмпбел Р. И., Гибсон И., Бернанд А., Шульц Дж., Граф П., Ахуджа Б., Мартина Ф. Проектирование для аддитивного производства: тенденции, возможности, соображения и ограничения // Анналы CIRP. 2016. № 65. С. 737–760. DOI 10.1016/j.cirp.2016.05.004
- [11] Сорокин Д. В., Бабкина Л. А., Бразговка О. В. Проектирование элементов конструкций различного назначения на основе топологической оптимизации // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6. № 2. С. 61–82. DOI 10.26732/j.st.2022.2.01
- [12] Чжан Ю., Ван Дж., Ван К., Цзэн Ю., Чен Т. Устойчивость бионических фрактальных иерархических структур // Материалы и дизайн. 2018. № 158. С. 147–159. DOI 10.1016/j.matdes.2018.08.028
- [13] Чжоу Дж., Лю Х., Дир Дж. П., Фальзон Б. Г., Казанчи З. Сравнение различных условий квазистатического нагружения аддитивно изготовленных композитных гексагональных и ауксетических ячеистых структур // Международный журнал механических наук. 2023. № 244. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2022.108054
- [14] Пак К-М., Мин К-С., Ро Ю-С. Оптимизация проектирования сетчатых структур при сжатии: исследование типов и расположения ячеек // Материалы. 2022. Т. 15. № 97. DOI 10.3390/ma15010097
- [15] Тунай М. Изгибное поведение сэндвич-структур, напечатанных на 3D-принтере с различной геометрией сердцевины и продолжительностью термического старения // Тонкостенные конструкции. 2024. № 194. DOI 10.1016/j.tws.2023.111329

- [16] Цуй З., Чжао Дж., Сюй Р., Дин Ю., Сунь З. Механическая конструкция и характеристики поглощения энергии новых пластинчато-стержневых гибридных сетчатых структур // Тонкостенные конструкции. 2024. № 194. DOI 10.1016/j.tws.2023.111349
- [17] Саремян Р., Бадроссамай М., Фороозмер Э., Кадходаи М., Форооги Ф. Экспериментальные и численные исследования сетчатых структур, изготовленных методом селективного лазерного плавления при квазистатических и динамических нагрузках // Международный журнал передовых производственных технологий. 2021. № 112. С. 2815–2836. DOI 10.1007/s00170-020-06112-0
- [18] Инь Х., Чжан В., Чжу Л., Мэн Ф., Лю Дж., Вэнь Г. Обзор сетчатых структур по свойствам поглощения энергии // Композитные конструкции. 2023. Т. 1. № 304. DOI 10.1016/j.compstruct.2022.116397
- [19] Ван З., Цао С., Ян Х., Ду С., Ма Б., Чжэн Ц., Ван З., Ли Ю. Материалы на основе трехмерных ферменных решеток, изготовленные методом аддитивного производства для улучшения механических характеристик и управляемой анизотропии: моделирование и эксперименты // Тонкостенные конструкции. 2023. № 183. DOI 10.1016/j.tws.2022.110439
- [20] Цзэн К., Ван В., Б. К. Х., Ма С. Легкая бортовая конструкция отражающего зеркала с заполнением из TPMS для низкой термической деформации // Композитные конструкции. 2024. № 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117665
- [21] Чжан К., Цяо Х., Ян Л., Оуян В., Хэ Т., Лю Б., Чен С., Ван Н., Ян К. Вибрационные характеристики сетчатых TPMS структур IWP-типа, изготовленных аддитивным способом // Композитные конструкции. 2024. № 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117642
- [22] Лю С., Ван Ю., Лю С., Жэнь Ю., Цзян Х. Синергетический механизм управления для повышения поглощения энергии сетчатыми структурами, напечатанными на 3D-принтере // Международный журнал механических наук. 2024. № 262. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2023.108711
- [23] Чжан Ц., Сунь Ю. Новые конструкции из метаматериалов с отрицательным тепловым расширением и управляемыми механическими свойствами // Международный журнал механических наук. 2024. № 261. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2023.108692
- [24] Куреши З. А., Аль-Омари С. А. Б., Эльнаджар Э., Аль-Кетан О., Аль-Руб Р. А. О влиянии пористости и функциональная оценка сетчатых структур на основе тройной периодической минимальной поверхности (TPMS), изготовленных методом 3D-печати со встроенным материалом с фазовым переходом // Международный журнал теплообмена. 2022. № 183. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122111
- [25] Куреши З. А., Аль-Омари С. А. Б., Эльнаджар Э., Аль-Кетан О., Аль-Руб Р. А. Вдохновленные природой тройные периодические минимальные поверхностные структуры в виде оболочек и тел для улучшения фазового перехода материала с низкой теплопроводностью для хранения скрытой тепловой энергии // Международный журнал теплообмена. 2022. № 173. DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107361
- [26] Ху Б., Ван З., Ду К., Цзоу В., Ву В., Тан Дж., Ай Дж., Чжоу Х., Чен Р., Шан Б. Многокритериальная байесовская оптимизация для ускоренного проектирования структур TPMS // Международный журнал механических наук. 2023. № 244. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2022.108085
- [27] Ван М., Ху Д., Чжан Х., Пи Б., Е Х. Исследование ударпрочности трубчатых сетчатых конструкций на основе тройных периодических минимальных поверхностей при квазистатическом осевом разрушении // Композитные конструкции. 2024. № 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117703
- [28] Ченг Л., Бай Дж., То А. К. Оптимизация топологии функционально-градиентной сетчатой структуры для проектирования компонентов аддитивным методом с ограничениями по напряжениям // Компьютерные методы в прикладной механике и технике. 2019. № 344. С. 334–359. DOI 10.1016/j.cma.2018.10.010
- [29] Чен З., Се Ю. М., Ву С., Ван З., Ли Ц., Чжоу С. О гибридных ячеистых материалах на основе тройных периодических минимальных поверхностей с экстремальными механическими свойствами // Материалы и дизайн. 2019. № 183. DOI 10.1016/j.matdes.2019.108109
- [30] Чжао М., Чжан Д. З., Лю Ф., Ли З., Ма З., Жэнь З. Механические характеристики и характеристики поглощения энергии аддитивно изготовленных функционально-градиентных листовых сетчатых конструкций с минимальными поверхностями // Международный журнал механических наук. 2020. № 167. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2019.105262
- [31] Новак Н., Аль-Кетан О., Боровиншек М., Крстулович-Опара Л., Роушан Р., Весеньяк М., Рен З. Разработка новых гибридных ячеистых сетчатых структур TPMS и их механические характеристики // Журнал исследований материалов и технологий. 2021. № 15. С. 1318–1329. DOI 10.1016/j.jmrt.2021.08.092
- [32] Аль-Кетан О., Пеланкони М., Ортона А., Аль-Руб Р. К. А. Аддитивное производство каталитических керамических подложек специального назначения на основе тройных периодических минимальных поверхностей // Журнал Американского керамического общества. 2019. № 102. С. 6176–6193. DOI 10.1111/jace.16474
- [33] Аль-Кетан О., Ли Д., Роушан Р., Аль-Руб Р. К. А. Функционально-градиентные листовые TPMS решетки с мультиморфологией: проектирование, производство и механические свойства // Журнал механического поведения биомедицинских материалов. 2020. № 102. DOI 10.1016/j.jmbbm.2019.103520

- [34] Трижды периодические минимальные поверхности (TPMS) // Геометрия Алана Шона URL: <https://schoengeometry.com/e-tpms.html> (дата обращения: 16.07.2024).
- [35] Вольгемут М., Юфа Н., Хоффман Дж., Томас Э.Л. Морфология по симметрии трижды периодических двояко непрерывных кубических микродоменов // Макромолекулы. 2001. № 34 (17). С. 6083–6089. DOI 10.1021/ma0019499
- [36] Фон Шнеринг Х.Г., Неспер Р. Узловые поверхности рядов Фурье: фундаментальные инварианты структурированной материи // Журнал физики Б. Конденсированное вещество. 1991. № 83. С. 407–412. DOI 10.1007/bf01313411
- [37] Аль-Кетан О., Аль-Руб Р.К.А. MSLattice: бесплатное программное обеспечение для создания однородных и градиентных сеток на основе трижды периодических минимальных поверхностей // Дизайн материалов и обработка коммуникаций. 2021. № 3 (6). DOI 10.1002/mdp2.205

DESIGNING, MANUFACTURING AND MECHANICAL TESTS OF LATTICE STRUCTURES BASED ON TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE

D. V. Sorokin¹, E. V. Moskvichev²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
Krasnoyarsk, The Russian Federation

²Federal Research Center for Information and Computational Technologies
Krasnoyarsk, The Russian Federation

In recent decades Triply Periodic Minimal Surfaces have attracted significant research interest in many fields, such as automotive, aerospace, chemical industry, medicine, biomaterials and others. Cellular structures obtained from such surfaces have broad capabilities in tuning physical and mechanical properties to create new materials and structural elements. In this work, the authors examine the main issues of modeling cellular structures such as Gyroid, Schwarz Primitive, I-WP (I-graph-wrapped package) and Schwarz Diamond. For two selected types of cellular structures, Gyroid and I-WP, the range of parameters affecting the relative density (volume fraction) of the material in a cubic unit cell was investigated. Based on the unit cell, geometric models of specimens with a periodically repeating structure were created for mechanical testing. The specimens were manufactured on a 3D printer and tested for compression until failure while recording load diagrams and displacements of specimens points. Experimental studies led to the conclusion that the mechanical properties of the specimens significantly depend on the relative density (volume fraction) of the unit cell. Controlling the relative density can be useful for achieving the required mechanical properties of designed materials and structural elements with unique properties.

Keywords: triply periodic minimal surfaces, cells, lattice structures, 3D printing, additive technologies, mechanical tests.

References

- [1] Zhou X., Ren L., Song Z., Li G., Zhang J., Li B., Wu Q., Li W., Ren L., Liu Q. Advances in 3D/4D printing of mechanical metamaterials: From manufacturing to applications // Composites Part B: Engineering, 2023, vol. 254. DOI 10.1016/j.compositesb.2023.110585
- [2] Miao X., Hu J., Xu Y., Su J., Jing Y. Review on mechanical properties of metal lattice structures // Composite Structures, 2024, vol. 342. DOI 10.1016/j.compstruct.2024.118267

- [3] Wu Y., Fang J., Wu C., Li C., Sun G., Li Q. Additively manufactured materials and structures: A state-of-the-art review on their mechanical characteristics and energy absorption // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, vol. 246. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2023.108102
- [4] Vyavahare S., Mahesh V., Mahesh V., Harursampath D. Additively manufactured meta-biomaterials: A state-of-the-art review // *Composite Structures*, 2023, vol. 305. DOI 10.1016/j.compstruct.2022.116491
- [5] Li Z., Chen Z., Chen X., Zhao R. Design and evaluation of TPMS-inspired 3D-printed scaffolds for bone tissue engineering: Enabling tailored mechanical and mass transport properties // *Composite Structures*, 2024, vol. 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117638
- [6] Xie H., Chen J., Liu F., Wang R., Tang Y., Wang Y., Luo T., Zhang K., Cao J. Ti-PEEK interpenetrating phase composites with minimal surface for property enhancement of orthopedic implants // *Composite Structures*, 2024, vol. 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117638
- [7] Foroughi A. H., Liu D., Razavi M. Simultaneous optimization of stiffness, permeability, and surface area in metallic bone scaffolds // *International Journal of Engineering Science*, 2023, vol. 193. DOI 10.1016/j.ijengsci.2023.103961
- [8] Li Q., Gan W., Hu L., Liu X., Mao C., Hu H., Li D. Spherical porous structures for axial compression // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, vol. 261. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2023.108681
- [9] Maconachie T., Leary M., Lozanovski B., Zhang X., Qian M., Faruque O., Brandt M. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges // *Materials & Design*, 2019, vol. 183. DOI 10.1016/j.matdes.2019.108137
- [10] Thompson M. K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbel R. I., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B., Martina F. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints // *CIRP Annals*, 2016, vol. 65, pp. 737–760. DOI 10.1016/j.cirp.2016.05.004
- [11] Sorokin D. V., Babkina L. A., Brazgovka O. V. Designing various-purpose subassemblies based on topological optimization // *Spacecrafts & Technologies*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 61–82. DOI 10.26732/j.st.2022.2.01 (in Russian)
- [12] Zhang Y., Wang J., Wang C., Zeng Y., Chen T. Crashworthiness of bionic fractal hierarchical structures // *Materials & Design*, 2018, vol. 158, pp. 147–159. DOI 10.1016/j.matdes.2018.08.028
- [13] Zhou J., Liu H., Dear J. P., Falzon B. G., Kazancı Z. Comparison of different quasi-static loading conditions of additively manufactured composite hexagonal and auxetic cellular structures // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, vol. 244. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2022.108054
- [14] Park K-M., Min K-S., Roh Y-S. Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements // *Materials*, 2022, vol. 15, no. 97. DOI 10.3390/ma15010097
- [15] Tunay M. Bending behavior of 3D printed sandwich structures with different core geometries and thermal aging durations // *Thin-Walled Structures*, 2024, vol. 194. DOI 10.1016/j.tws.2023.111329
- [16] Cui Z., Zhao J., Xu R., Ding Y., Sun Z. Mechanical design and energy absorption performances of novel plate-rod hybrid lattice structures // *Thin-Walled Structures*, 2024, vol. 194. DOI 10.1016/j.tws.2023.111349
- [17] Saremian R., Badrossamay M., Foroozmehr E., Kadkhodaei M., Forooghi F. Experimental and numerical investigation on lattice structures fabricated by selective laser melting process under quasi-static and dynamic loadings // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 112, pp. 2815–2836. DOI 10.1007/s00170-020-06112-0
- [18] Yin H., Zhang W., Zhu L., Meng F., Liu J., Wen G. Review on lattice structures for energy absorption properties // *Composite Structures*, 2023, vol. 1, no. 304. DOI 10.1016/j.compstruct.2022.116397
- [19] Wang Z., Cao X., Yang H., Du X., Ma B., Zheng Q., Wan Z., Li Y. Additively-manufactured 3D truss-lattice materials for enhanced mechanical performance and tunable anisotropy: Simulations & experiments // *Thin-Walled Structures*, 2023, vol. 183. DOI 10.1016/j.tws.2022.110439
- [20] Zeng C., Wang W., b K. H., Ma S. Lightweight airborne TPMS-filled reflective mirror design for low thermal deformation // *Composite Structures*, 2024, vol. 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117665
- [21] Zhang C., Qiao H., Yang L., Ouyang W., He T., Liu B., Chen X., Wang N., Yan C. Vibration characteristics of additive manufactured IWP-type TPMS lattice structures // *Composite Structures*, 2024, vol. 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117642
- [22] Liu X., Wang Y., Liu X., Ren Y., Jiang H. Synergetic control mechanism for enhancing energy-absorption of 3D-printed lattice structures // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, vol. 262. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2023.108711
- [23] Zhang Q., Sun Y. Novel metamaterial structures with negative thermal expansion and tunable mechanical properties // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, vol. 261. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2023.108692
- [24] Qureshi Z. A., Al-Omari S. A. B., Elnajjar E., Al-Ketan O., Al-Rub R. A. On the effect of porosity and functional grading of 3D printable triply periodic minimal surface (TPMS) based architected lattices embedded with a phase change material // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 183. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122111
- [25] Qureshi Z. A., Al-Omari S. A. B., Elnajjar E., Al-Ketan O., Al-Rub R. A. Nature-inspired triply periodic minimal surface-based structures in sheet and solid configurations for performance enhancement of a low-thermal-conductivity

phase-change material for latent-heat thermal-energy-storage applications // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, vol. 173. DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107361

- [26] Hu B., Wang Z., Du C., Zou W., Wu W., Tang J., Ai J., Zhou H., Chen R., Shan B. Multi-objective Bayesian optimization accelerated design of TPMS structures // International Journal of Mechanical Sciences, 2023, vol. 244. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2022.108085
- [27] Wan M., Hu D., Zhang H., Pi B., Ye X. Crashworthiness study of tubular lattice structures based on triply periodic minimal surfaces under quasi-static axial crushing // Composite Structures, 2024, vol. 327. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117703
- [28] Cheng L., Bai J., To A.C. Functionally graded lattice structure topology optimization for the design of additive manufactured components with stress constraints // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, vol. 344, pp. 334–359. DOI 10.1016/j.cma.2018.10.010
- [29] Chen Z., Xie Y.M., Wu X., Wang Z., Li Q., Zhou S. On hybrid cellular materials based on triply periodic minimal surfaces with extreme mechanical properties // Materials & Design, 2019, vol. 183. DOI 10.1016/j.matdes.2019.108109
- [30] Zhao M., Zhang D.Z., Liu F., Li Z., Ma Z., Ren Z. Mechanical and energy absorption characteristics of additively manufactured functionally graded sheet lattice structures with minimal surfaces // International Journal of Mechanical Sciences, 2020, vol. 167. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2019.105262
- [31] Novak N., Al-Ketan O., Borovinšek M., Krstulović-Opara L., Rowshan R., Vesenjak M., Ren Z. Development of novel hybrid TPMS cellular lattices and their mechanical characterisation // Journal of Materials Research and Technology, 2021, vol. 15, pp. 1318–1329. DOI 10.1016/j.jmrt.2021.08.092
- [32] Al-Ketan O., Pelanconi M., Ortona A., Al-Rub R.K.A. Additive manufacturing of architected catalytic ceramic substrates based on triply periodic minimal surfaces // Journal of the American Ceramic Society, 2019, vol. 102, pp. 6176–6193. DOI 10.1111/jace.16474
- [33] Al-Ketan O., Lee D., Rowshan R., Al-Rub R.K.A. Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2020, vol. 102. DOI 10.1016/j.jmbbm.2019.103520
- [34] Triply-periodic minimal surfaces (TPMS) // Alan Schoen geometry URL: <https://schoengeometry.com/e-tpms.html> (accessed: 16.07.2024).
- [35] Wohlgemuth M., Yufa N., Hoffman J., Thomas E.L. Triply Periodic Bicontinuous Cubic Microdomain Morphologies by Symmetries // Macromolecules, 2001, vol. 34 (17), pp. 6083–6089. DOI 10.1021/ma0019499
- [36] Von Schnering H.G., Nesper R. Nodal surfaces of Fourier series: Fundamental invariants of structured matter // Zeitschrift für Physik B Condensed Matter, 1991, vol. 83, pp. 407–412. DOI 10.1007/bf01313411
- [37] Al-Ketan O., Al-Rub R. K. A. MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces // Material Design & Processing Communications, 2021, vol. 3 (6). DOI 10.1002/mdp2.205

Сведения об авторах

Сорокин Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончил Завод-ВТУЗ Красноярского политехнического института в 1988 году. Область научных интересов: геометрическое моделирование кривых и поверхностей, компьютерная графика, CAD/CAE-системы.

Москвичев Егор Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Красноярского филиала, руководитель Инженерно-испытательного центра Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2006 году. Область научных интересов: прочность материалов и конструкций, композиционные материалы, механические испытания, метод конечных элементов.