



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X.2026.593P.1094>

Научная статья

Research article



Разработка и исследование свойств механических метаматериалов с природоподобной геометрией

Э. М. Фарбер[✉], А. В. Орлов, А. А. ПоповичСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 d.farber2010@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время одним из перспективных и инновационных подходов в сфере проектирования механических метаматериалов различного назначения является использование геометрий на основе природных структур. В природе существует большое количество геометрических форм и структур, появившихся в течение длительной эволюции для различных целей, в том числе для защиты. Примером таких структур являются микроструктура кожуры фрукта помело и геометрия тропического плода дерева карамбола, предназначенные для защиты плода от падения с высоты. На основе подобных структур можно разрабатывать метаматериалы, обладающие малой массой, высокой прочностью и повышенными свойствами энергопоглощения. Аддитивные технологии позволят изготавливать подобные метаматериалы с геометрией единичных элементов любой сложности. В настоящей работе в качестве исходной геометрии для проектирования метаматериалов использовалась микроструктура кожуры помело. Образцы метаматериалов, состоящие из 5×5×5 единичных ячеек, с исходной пористостью в 80 %, изготавливались из сплава ВТ6 с помощью селективного лазерного плавления. Были проведены квазистатические и динамические испытания на сжатие для определения механических характеристик и удельного поглощения энергии метаматериалов. Установлено, что значение условного предела прочности на сжатие для образцов метаматериалов составило 116 МПа, условный предел текучести – 102 МПа, условный модуль упругости – 6 ГПа. Уровень энергопоглощения метаматериалов при квазистатическом сжатии был 2,57 Дж/г, при динамическом – 2,71 Дж/г. Полученные результаты свидетельствуют об общей перспективности применения принципа природоподобности при проектировании энергопоглощающих метаматериалов и станут основой для дальнейших исследований и разработок энергопоглощающих систем и изделий.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, метаматериалы, энергопоглощение, природоподобная геометрия

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2024-562 от 25.04.2024).

Для цитирования: Фарбер Э.М., Орлов А.В., Попович А.А. Разработка и исследование свойств механических метаматериалов с природоподобной геометрией. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2026;20(3):114–122. <https://doi.org/10.17073/1997-308X.2026.593P.1094>

Development and characterization of mechanical metamaterials with a nature-inspired geometry

E. M. Farber[✉], A. V. Orlov, A. A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russia

✉ d.farber2010@yandex.ru

Abstract. One promising and innovative approaches to designing mechanical metamaterials for a range of applications is to draw on geometries found in natural structures. Nature offers a wide variety of geometries and structures that have evolved over long periods to serve different functions, including protection. Two such protective structures are the microstructure of pomelo peel and the geometry of carambola fruit, both of which help cushion the fruit against impact when it falls from a height. These structures can serve as prototypes for lightweight, high-strength metamaterials with enhanced energy absorption performance. Additive manufacturing enables the fabrication of such metamaterials with unit-cell geometries of arbitrary complexity. In this study, the microstructure of pomelo peel was used as the reference geometry for metamaterial design. Metamaterial samples comprising $5 \times 5 \times 5$ unit cells with a nominal porosity of 80 % were fabricated from VT6 (Ti-6Al-4V) alloy by selective laser melting. Quasi-static and dynamic compression tests were performed to determine the mechanical properties and specific energy absorption of the metamaterials. The ultimate compressive strength of the metamaterial samples was 116 MPa, the yield strength was 102 MPa, and the effective elastic modulus was 6 GPa. Their specific energy absorption was 2.57 J/g under quasi-static compression and 2.71 J/g under dynamic compression. These findings demonstrate the potential nature-inspired design principle for developing energy-absorbing metamaterials and provide a basis for further research and the development of energy-absorbing systems and components.

Keywords: selective laser melting, metamaterials, energy absorption, nature-inspired geometry

Acknowledgements: This work was supported of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-562 dated 25 April 2024).

For citation: Farber E.M., Orlov A.V., Popovich A.A. Development and characterization of mechanical metamaterials with a nature-inspired geometry. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2026;20(3):114–122.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X.2026.593P.1094>

Введение

На сегодняшний день возрастает спрос на конструкции и элементы, обладающие малой массой и повышенными прочностными и энергопоглощающими характеристиками, для использования в различных энергопоглощающих устройствах [1–3]. Такие устройства активно применяются в автомобильной, аэрокосмической, оборонной и других отраслях промышленности для защиты и рассеяния кинетической энергии удара в случае чрезвычайных ситуаций [4–6]. Для улучшения свойств описываемых устройств активно проводятся исследования, основывающиеся, в первую очередь, на использовании механических метаматериалов с различными видами геометрий единичных ячеек [6–8].

Механические метаматериалы представляют собой искусственно созданные материалы с определенными геометрией и расположением единичных элементов (единичных ячеек) с целью достижения особых свойств — отрицательного коэффициента Пуассона или высокого удельного поглощения энергии [9–11]. Свойства механических метаматериалов

определяются, в первую очередь, геометрией их единичных элементов [10; 11]. Одним из перспективных направлений исследований в данной области является разработка геометрии элементов по принципу природоподобия, т.е. с использованием или на основе геометрий, представленных в живой природе [12; 13]. Подобный подход позволяет объединить современные возможности науки и техники с наработками, предоставляемыми нам эволюцией, демонстрирующими наилучшие механизмы адаптации живых существ к внешней среде обитания [12; 14]. В качестве исходных природных геометрий могут выступать структуры скелета глубоководной губки [15], кожуры помело [7], геометрия пчелиных сот [16] и др. Важную роль в возможности проведения и реализации подобных исследований играют аддитивные технологии, позволяющие изготавливать структуры с высокой геометрической сложностью из различных материалов [8; 14; 17]. Представленный перечень работ и используемых геометрий говорит о перспективности исследований по применению природоподобных геометрий для получения энергопоглощающих структур.

Одним из основных факторов влияния на свойства механических метаматериалов является геометрия их единичных ячеек. В связи с этим оптимальный вариант проектирования заключается в использовании симметричных или частично симметричных структур, которые наилучшим образом подходят для построения топологии единичной ячейки, с последующим построением массива, т.е. образца метаматериала. Подобные структуры можно отметить в работе [7], где единичная ячейка размерностью $4 \times 4 \times 4$ мм была спроектирована на основе кожуры помело и обладала достаточно высокими показателями энергопоглощения. Таким образом, можно заявить о перспективности исследований по проектированию и изготовлению механических метаматериалов на основе природных геометрий.

Цель данной работы – проектирование механических метаматериалов на основе структуры кожуры помело [7]. В процессе проектирования единичных ячеек, а также образцов метаматериалов будет проведено численное компьютерное моделирование с целью первичной оценки характеристик метаматериалов и влияния на них пористости единичных ячеек. Образцы были изготовлены методом селективного лазерного плавления из порошка сплава ВТ6 с последующим испытанием для определения их характеристик и сравнения с исходными результатами моделирования. Применение связки «моделирование–эксперимент» позволит в дальнейшем упростить и ускорить процесс разработки и проектирования механических метаматериалов. Результаты исследований позволят получить полный перечень характеристик разрабатываемой геометрии и оценить перспективы ее использования с целью проектирования механических метаматериалов с повышенными энергопоглощающими характеристиками с дальнейшей разработкой структур и изделий на ее основе.

Материалы и методы

Плотные образцы, необходимые для определения исходных свойств сплава для использования в численном компьютерном моделировании, а также образцы метаматериалов изготавливались из сферического порошка сплава ВТ6. Плотные образцы обладали следующими геометрическими параметрами: $d = 3$ мм, $h = 13$ мм – для образцов на сжатие до разрушения; $d = 10$ мм, $h = 90$ мм – для определения модуля упругости; $d = 6$ мм (рабочая часть), $h = 63$ мм – для испытаний на растяжение; $d = 5,7$ мм (рабочая часть), $h = 53$ мм – для испытаний на кручение.

Изготовление образцов проводилось на установке селективного лазерного плавления «3DLAM Mini SLM system» (компания 3DLAM, г. Санкт-Петербург)

в инертной газовой атмосфере (аргон). Установка оснащена волоконным лазером «IPG Photonics». Зона печати – цилиндрическая диаметром 90 мм и высотой 100 мм. Параметры печати: мощность лазера – 150 Вт, скорость сканирования – 1200 мм/с, дистанция между проходами лазера – 0,12 мм, толщина слоя – 0,03 мм, диаметр лазерного пятна – 0,08 мм. Образцы метаматериалов в процессе изготовления были ориентированы горизонтально и создавались по исходным моделям с пористостью 80 %. После изготовления проводилась их термообработка в вакууме при температуре 1050 °С в течение 120 мин с охлаждением с печью. Для каждого испытания было получено по 3 образца метаматериалов, суммарно 6 образцов.

Для построения моделей единичных ячеек и образцов метаматериалов на их основе, а также численного компьютерного моделирования для определения их свойств был использован пакет конечно-элементного анализа «ANSYS 2019 R2 SpaceClaim». Размер единичных ячеек составил $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ мм. Образцы метаматериалов состояли из $5 \times 5 \times 5$ ячеек по трем осям, суммарно 125 единичных ячеек размерностью $12,5 \times 12,5 \times 12,5$ мм. Модель единичной ячейки с геометрией на основе структуры кожуры помело и модель образца метаматериала представлены на рис. 1.

С помощью ANSYS определялись механические характеристики метаматериалов (модуль упругости, предел текучести и предел прочности при сжатии) путем моделирования эксперимента по сжатию со статической нагрузкой в упругой и пластической областях с использованием метода конечных элементов. Визуальное исследование изготовленных образцов выполняли на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «Mira 3 LMU» (Tescan, Чехия) в режиме вторичных электронов. Статические испытания на сжатие до разрушения и на растяжение проводили с помощью одноосной испытательной машины «Zwick/Roell Z100» (Zwick GmbH & Co. KG, Германия), испытания на кручение плотных образцов, а также динамические испытания на сжатие (удар) до разрушения образцов метаматериалов – на установке «Gleeble 3800» (Dynamic Systems Inc., Austin, TX, США). При динамических испытаниях скорость сжатия составляла 0,7 м/с.

Пористость полученных образцов метаматериалов рассчитывали по формуле [18]

$$P = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}, \quad (1)$$

где ρ^* – плотность образца метаматериала, ρ_s – плотность материала, из которого был изготовлен образец метаматериала.

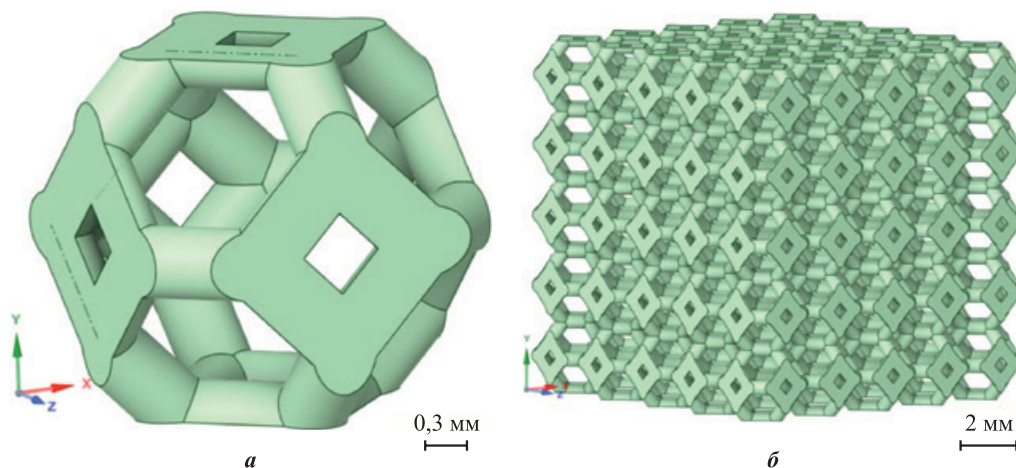


Рис. 1. Модели единичной ячейки (а) и образца метаматериала (б)

Fig. 1. Models of a unit cell (a) and a metamaterial sample (b)

Энергопоглощение исследуемых метаматериалов оценивалось по нескольким показателям. Исходный показатель энергопоглощения (EA) определялся путем математического интегрирования кривой «напряжение–деформация» [5]:

$$EA = \int_0^x F(x) dx. \quad (2)$$

Удельное энергопоглощение (SEA) для оценки эффективности поглощения энергии на единицу массы исследуемой структуры рассчитывалось по формуле [19]

$$SEA = \frac{EA}{m}, \quad (3)$$

где m – масса образца метаматериала.

Результаты и их обсуждение

По результатам испытаний плотных образцов сплава ВТ6 был получен перечень показателей, необходимых для численного компьютерного моделирования:

Плотность (ρ), кг/м³ 4458
Модуль упругости (E), ГПа 155,78
Модуль сдвига (G), ГПа 59,14
Коэффициент Пуассона, ν 0,317

На рис. 2 представлена кривая напряжения–деформации, полученная в результате испытаний на сжатие и загруженная в ANSYS для определения свойств метаматериалов.

По результатам моделирования были получены значения модуля упругости, предела текучести и прочности на сжатие образцов метаматериалов пористостью $\Pi = 80$ и 70 % с учетом толщины стоек единичных ячеек (табл. 1). Выбор двух вариантов

пористостей метаматериалов при моделировании обусловлен необходимостью первичной оценки для $\Pi = 80$ % и дополнительной – при $\Pi = 70$ %. Оценка образцов метаматериалов с меньшей пористостью дает возможность предварительно проанализировать, как снижение пористости повлияет на их свойства. Кроме того, исходя из предыдущих опытов [20], возможны отклонения по пористости изготавливаемых метаматериалов в меньшую сторону. Соответственно, определение свойств метаматериалов с $\Pi = 70$ % позволит эффективнее сравнивать полученные экспериментальные результаты в случае наличия серьезных отклонений.

Из табл. 1 следует, что снижение пористости единичных ячеек метаматериалов, за счет увеличения толщины стоек, ведет к логичному возрастанию значений получаемых характеристик метаматериалов. Все показатели увеличились в 2 раза или чуть более.

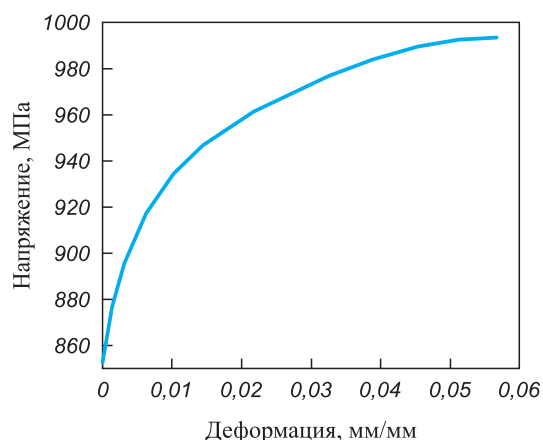


Рис. 2. Кривая напряжения–деформации сплава ВТ6, используемая в процессе моделирования

Fig. 2. Stress-strain curve of the Ti-6Al-4V alloy used as input for finite element simulation

Таблица 1. Свойства метаматериалов по результатам численного компьютерного моделирования

Table 1. Metamaterial properties obtained from finite element simulations

Пористость образца, %	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Толщина стоек, мкм
70	16,59	103,4	123,39	627
80	7,22	55,7	67,48	491

На рис. 3 представлены СЭМ-изображения изготовленного образца метаматериала. Хорошо видно налипание порошка на стойки единичных ячеек. Пористость образцов составила 72,38 %, толщина стоек при виде спереди – в среднем 497,3 мкм.

На рис. 4 приведены кривые напряжения–деформации, полученные по результатам испытаний на сжатие 3 образцов метаматериалов. Видно, что образцы метаматериалов разрушаются по достижении максимальных напряжений – после неявно выраженного участка пластической деформации следует резкое разрушение.

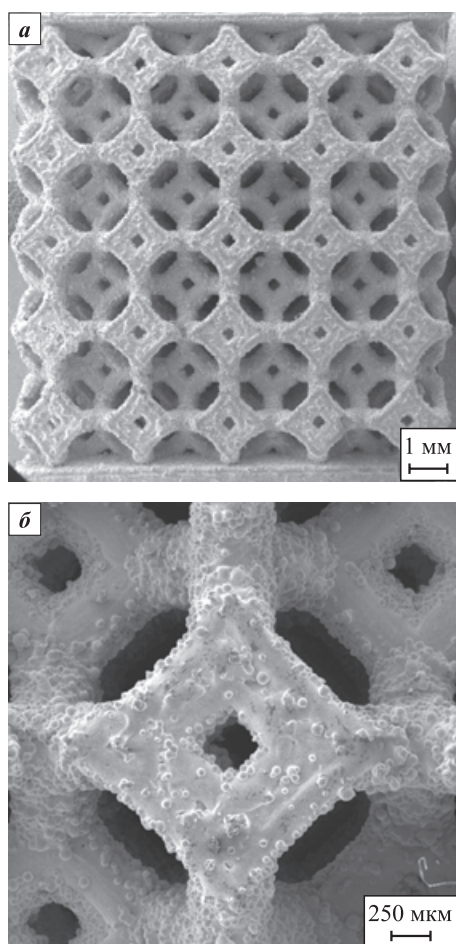


Рис. 3. СЭМ-изображения изготовленного образца метаматериала

a – общий вид; *б* – единичная ячейка

Fig. 3. SEM images of a fabricated metamaterial sample

a – overall view; *б* – a unit cell

Образец метаматериала после испытаний показан на рис. 5. Наблюдается разрушение под углом 45°, характерное для классических материалов. Линия разрушения образца фактически прошла через центры единичных ячеек (рис. 5, *a*). Ячейки разрушены, а верхняя часть образца сместилась и вклинилась в нижнюю. При этом ячейки, находящиеся вне линии разрушения, по краям образца, выглядят целыми, трещин или повреждений визуально не видно.

У ячеек, расположенных в непосредственной близости от линии разрушения (рис. 5, *б*), наблюдаются трещины различного размера на стойках. Следует отметить, что аналогичный процесс разрушения образцов под углом 45°, с геометриями на основе кожуры помело, представлен и в других исследовательских работах [7; 21]. Показатели, полученные по результатам испытаний на квазистатическое сжатие образцов метаматериалов, представлены в табл. 2.

Исходя из табл. 2 можно отметить высокий уровень повторяемости результатов. Относительный предел прочности на сжатие в среднем составил 116 МПа при среднем модуле упругости в 6 ГПа. Максимальная деформация в среднем составила 4,5 %. В сравнении с литературными данными полученные показатели оказались выше, чем в других исследованиях [7; 21] метаматериалов с геометрией на основе кожуры помело. Это связано с меньшей пористостью полученных образцов метаматериалов, которая оказалась ниже, чем у исходных моделей.

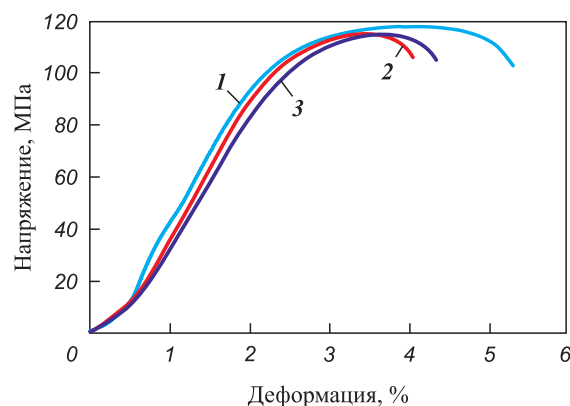


Рис. 4. Кривые напряжения–деформации образцов 1–3 метаматериалов при сжатии

Fig. 4. Stress-strain curves of metamaterial samples 1–3 under compression

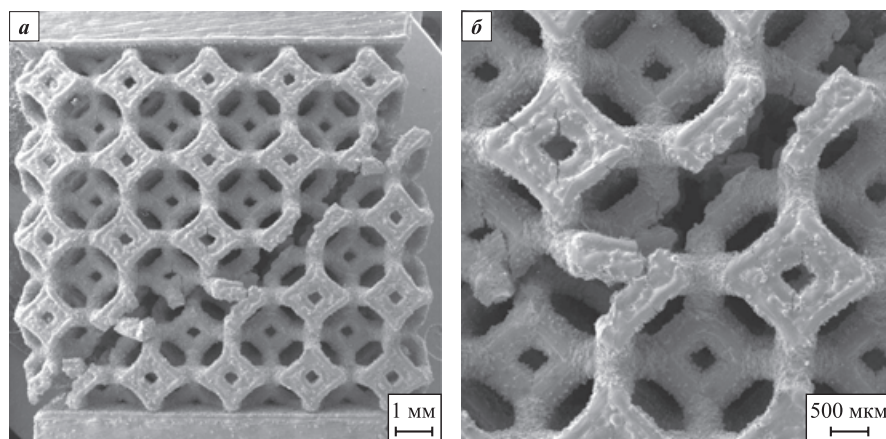


Рис. 5. СЭМ-изображения образца метаматериала после испытаний

a – общий вид; *б* – группа единичных ячеек

Fig. 5. SEM images of a metamaterial sample after testing

a – overall view; *b* – a group of unit cells

Таблица 2. Свойства образцов метаматериалов, полученные по результатам испытаний на сжатие

Table 2. Properties of metamaterial samples determined from compression tests

Образец	Условный модуль упругости, ГПа	Условный предел текучести, МПа	Условный предел прочности, МПа	Максимальная деформация, %
1	5	104	118	5,3
2	6	102	115	4,0
3	6	101	115	4,3
Среднее	6	102	116	4,5
Стандартное отклонение	0	1	2	0,9

Таблица 3. Сравнение свойств метаматериалов, полученных экспериментально и путем численного компьютерного моделирования

Table 3. Comparison of metamaterial properties obtained experimentally and by finite element modeling

Метод	Пористость, %	Толщина стоек, мкм	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
Моделирование	80,00	491,0	7,2	55,7	67,5
Эксперимент	72,38	497,3	6,0	102,0	116,0
Отклонение, %					
	7,62	1,28	16,9	83,1	71,9
Дополнительное моделирование	70,00	627,0	17,0	103,0	123,0

Отметим, что в исследовании [20] пористость образцов составляла 92 %, что естественным образом повлияло на снижение получаемых механических характеристик образцов.

В табл. 3 приведено сравнение показателей метаматериалов, полученных экспериментально и в результате моделирования, с указанием уровня отклонений от значений, определенных при моделировании для $\Pi = 80$ %. Дополнительно представлены результаты моделирования при $\Pi = 70$ %.

Из табл. 3 видно наличие отклонений между моделируемыми и экспериментальными результатами. Имеется снижение пористости образцов на 7,62 %. Причина такого отклонения кроется в увеличении толщины стоек единичных ячеек метаматериалов. Исходное измерение толщины стоек проводилось при виде спереди. На рис. 6 представлено СЭМ-изображение образца при виде сбоку. Отмечается серьезное утолщение стоек единичных ячеек в боковой проекции, особенно наклонных и горизонталь-

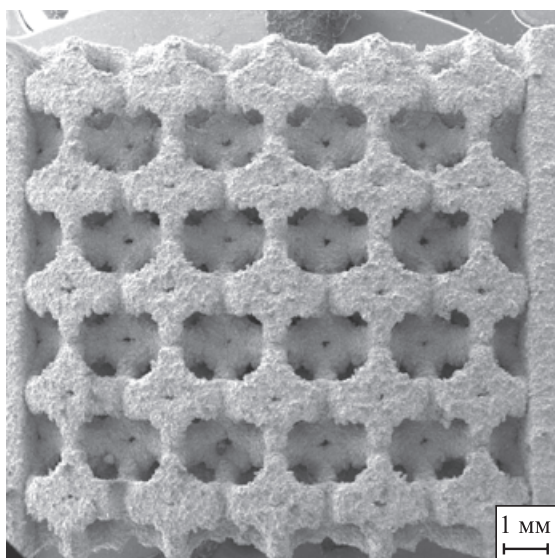


Рис. 6. СЭМ-изображение образца метаматериала (вид сбоку)

Fig. 6. SEM image of a metamaterial sample (side view)

ных. В среднем, толщина стоек в боковой проекции составила 593,64 мкм. Предполагается, что стойки единичных ячеек частично имеют каплевидную форму, что сказывается на пористости образцов. Подобная форма стоек единичных ячеек уже отмечалась в предыдущей работе [20]. Причины такого явления заключаются в ориентации образцов в процессе печати и особенностях самого процесса СЛП – многократном переплавлении нескольких нижних слоев при последовательном сканировании верхнего слоя порошка. К сожалению, используемая методика моделирования не способна учесть подобные особенности процесса изготовления.

Таблица 4. Энергопоглощающие свойства метаматериалов

Table 4. Energy absorption properties of metamaterials

Испытание	Образец	EA, Дж	SEA, Дж/г
Динамическое сжатие	1	8,35	3,13
	2	7,36	2,76
	3	5,96	2,24
	Среднее	7,22	2,71
	Стандартное отклонение	1,20	0,45
Квазистатическое сжатие	1	8,82	3,31
	2	5,66	2,13
	3	6,04	2,27
	Среднее	6,84	2,57
	Стандартное отклонение	1,72	0,65

Отклонения по пористости образцов обуславливают и отклонения по другим показателям. По модулю Юнга отклонение составило 16,9 %. При этом, несмотря на сниженную пористость экспериментальных образцов, это отклонение ушло в меньшую сторону и не превышает 25 %. По другим показателям наблюдается больший уровень отклонений от значений, полученных при $\Pi = 80$ %: по пределу текучести – 83,1 %, по пределу прочности на сжатие – 71,9 %. В то же время, если сравнить значения предела текучести и предела прочности на сжатие, полученные при дополнительном моделировании для $\Pi = 70$ %, наблюдается минимальная разница между экспериментальными и моделируемыми значениями. По показателю предела текучести эта разница составила всего 1 МПа. Все это говорит об общей работоспособности представленной методики «моделирование–эксперимент». Несмотря на некоторые неточности, например в определении модуля упругости, значения остальных показателей можно эффективно прогнозировать путем их моделирования сразу для нескольких пористостей.

Далее представлены результирующие данные по энергопоглощению образцов метаматериалов, полученные в процессах квазистатического и динамического сжатий (испытания ударом). На рис. 7 приведены графики зависимости силы от перемещения траверсы, полученные в результате динамических испытаний на сжатие, а в табл. 4 – результирующие показатели. Из табл. 4 видно, что удельное энергопоглощение (SEA) при динамическом сжатии метаматериалов составило в среднем 2,71 Дж/г при количестве поглощенной энергии в среднем 7,22 Дж. При квазистатическом сжатии $SEA = 2,57$ Дж/г, что сопоставимо со значением, полученным при динамическом сжатии.

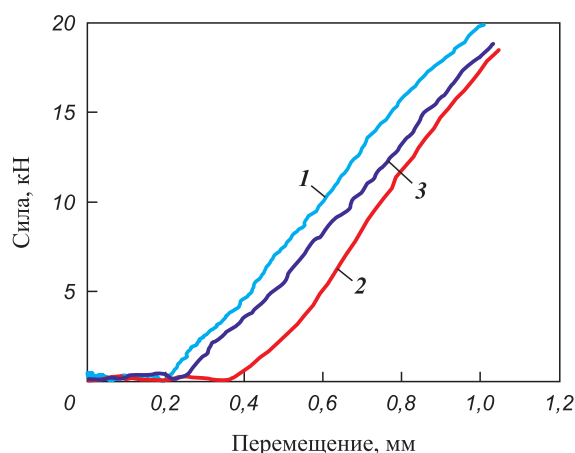


Рис. 7. Зависимости силы от перемещения траверсы в результате динамических испытаний на сжатие образцов 1–3

Fig. 7. Force-crosshead displacement curves obtained from dynamic compression tests of samples 1–3

ческом сжатии. Полученные значения *SEA* сопоставимы с результатами из работы [21].

В то же время результаты квазистатического сжатия оказались ниже показателей, полученных в работе [7]. Причина данного расхождения может скрываться в методике проведения экспериментов на сжатие до разрушения. В работах [7; 21] квазистатические испытания на сжатие осуществлялись до полного компактирования и разрушения образцов. В нашем случае, с целью соблюдения условий безопасности и с учетом стандартных условий эксперимента на сжатие, установка автоматически останавливала испытания при резком падении напряжения более чем на 80 % от максимально достигнутого значения в процессе эксперимента. Такой подход более показателен в контексте получения характеристик до первоначального разрушения единичных элементов, но не позволяет оценить возможности по поглощению энергии при последующем разрушении оставшихся целыми ячеек и компактировании образца. В последующих работах будет проведен пересмотр методики для получения максимума экспериментальных данных.

Заключение

В данной работе были изготовлены и исследованы образцы метаматериалов с природоподобной геометрией на основе микроструктуры кожуры помело. Получены их механические характеристики, а также определены энергопоглощающие свойства. Из результатов проведенных исследований вытекают следующие выводы:

1. Методика «моделирование–эксперимент» доказала свою работоспособность. Подтверждена возможность использования данного подхода для первоначального прогнозирования свойств метаматериалов.

2. Пористость изготовленных образцов метаматериалов составила 72,38 %. Отклонения от исходных моделей с пористостью 80 % связаны с налипанием порошка на стойки ячеек, утолщением и изменением формы стоек в процессе изготовления.

3. Образцы метаматериалов показали более высокие механические характеристики, чем у структур со схожими геометриями, исследованных в других работах. Условный модуль упругости составил 6 ГПа, условный предел текучести – 102 МПа, условный предел прочности на сжатие – 116 МПа.

4. Удельное энергопоглощение метаматериалов при квазистатическом сжатии составило 2,57 Дж/г, при динамическом – 2,71 Дж/г. Полученные значения в целом соответствуют данным других исследователей.

Полученные результаты говорят о перспективности применения представленной природоподоб-

ной геометрии для получения механических метаматериалов, обладающих повышенными энергопоглощающими характеристиками. Следует продолжать исследования с целью модифицирования имеющихся геометрий единичных ячеек для получения лучших характеристик.

Список литературы / References

1. Bekele A., Wadee M.A., Phillips A.T.M. Enhancing energy absorption through sequential instabilities in mechanical metamaterials. *Royal Society Open Science*. 2023;10(8):230762. <https://doi.org/10.1098/rsos.230762>
2. Khoa N.D., Bohara R.P., Ghazlan A., Thai H.-T., Ngo T. Novel hierarchical bioinspired cellular structures with enhanced energy absorption under uniaxial compression. *Aerospace Science and Technology*. 2024;147:108995. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108995>
3. Jiang H., Coomes A., Zhang Z., Ziegler H., Chen Y. Tailoring 3D printed graded architected polymer foams for enhanced energy absorption. *Composites Part B: Engineering*. 2021;224:109183. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109183>
4. Harish A., Alsaleh N.A., Ahmadein M., Elfar A.A., Djuansjah J., Hassanin H., El-Sayed M., Essa K. Designing lightweight 3d-printable bioinspired structures for enhanced compression and energy absorption properties. *Polymers (Basel)*. 2024;16(6):729. <https://doi.org/10.3390/polym16060729>
5. Xu S., Chen N., Qin H., Zou M., Song J. Biomimetic study of a honeycomb energy absorption structure based on straw micro-porous structure. *Biomimetics*. 2024;9(1):60. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9010060>
6. Bogahawaththa M., Mohotti D., Hazell P.J., Wang H., Wijesooriya K., Lee C.K. Energy absorption and mechanical performance of 3D printed Menger fractal structures. *Engineering Structures*. 2024;305:117774. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117774>
7. Zhang Z., Song B., Fan J., Wang X., Wei S., Fang R., Zhang X., Shi Y. Design and 3D printing of graded bionic metamaterial inspired by pomelo peel for high energy absorption. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*. 2023;2(1):100068. <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2023.100068>
8. Wang P., Yang F., Zheng B., Li P., Wang R., Li Y., Fan H., Li X. Breaking the tradeoffs between different mechanical properties in bioinspired hierarchical lattice metamaterials. *Advanced Functional Materials*. 2023;33(45):2305978. <https://doi.org/10.1002/adfm.202305978>
9. Zhou Y., Ye L., Chen Y. Developing three-dimensional mechanical metamaterials with tailorable bandgaps for impact mitigation. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2024;57(19):195501. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad2478>
10. Jin H., Espinosa H.D. Mechanical metamaterials fabricated from self-assembly: A perspective. *Journal of Applied Mechanics*. 2024;91(4):040801. <https://doi.org/10.1115/1.4064144>

11. Schurger B., Frankovsky P., Janigova S., Bocko J., Kolodziej A. Mechanical metamaterials: properties and classification. *Acta Mechonica*. 2023;8(3):29–35. <https://doi.org/10.22306/am.v8i3.98>
12. Ingrole A., Aguirre T.G., Fuller L., Donahue S.W. Bioinspired energy absorbing material designs using additive manufacturing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021;119:104518. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104518>
13. Zhang Z., Zhang L., Song B., Yao Y., Shi Y. Bamboo-inspired, simulation-guided design and 3D printing of lightweight and high-strength mechanical metamaterials. *Applied Materials Today*. 2022;26:101268. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101268>
14. Kumar R., Rezapourian M., Rahmani R., Maurya H.S., Kamboj N., Hussainova I. Bioinspired and multifunctional tribological materials for sliding, erosive, machining, and energy-absorbing conditions: A review. *Biomimetics*. 2024;9(4):209. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9040209>
15. Zhang Z., Liu L., Ballard J., Usta F., Chen Y. Unveiling the mechanics of deep-sea sponge-inspired tubular metamaterials: Exploring bending, radial, and axial mechanical behavior. *Thin-Walled Structures*. 2024;196:111476. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111476>
16. Ha N.S., Lu G., Xiang X. Energy absorption of a bio-inspired honeycomb sandwich panel. *Journal of Materials Science*. 2019;54(8):6286–6300. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3163-x>
17. Mohammadi H., Ahmad Z., Petru M., Mazlan S.A., Faizal Johari M.A., Hatami H., Kolor S. An insight from nature: honeycomb pattern in advanced structural design for impact energy absorption. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;22:2862–2887. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.063>
18. Zhang Y., Attarilar S., Wang L., Lu W., Yang J., Fu Y. A review on design and mechanical properties of additively manufactured NiTi implants for orthopedic applications. *International Journal of Bioprinting*. 2021;7(2):15–42. <https://doi.org/10.18063/ijb.v7i2.340>
19. Wen Z., Sha Y., Yu T.X., Jun X. Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb. *International Journal of Impact Engineering*. 2019;125:163–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.014>
20. Farber E., Orlov A., Popovich A. Auxetic meta-biomaterials: computer simulation and experimental results. *Metals (Basel)*. 2025;15(3):241. <https://doi.org/10.3390/met15030241>
21. Zhang Z., Song B., Yao Y., Zhang L., Wang X., Fan J., Shi Y. Bioinspired, simulation-guided design of polyhedron metamaterial for simultaneously efficient heat dissipation and energy absorption. *Advanced Materials Technologies*. 2022;7(10):2200076. <https://doi.org/10.1002/admt.202200076>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Эдуард Михайлович Фарбер – к.т.н., инженер лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)

 **ORCID:** 0009-0007-8830-9887

 **E-mail:** d.farber2010@yandex.ru

Алексей Валерьевич Орлов – науч. сотрудник лаборатории «Дизайн материалов и аддитивного производства» СПбПУ

 **ORCID:** 0000-0002-0090-0442

 **E-mail:** orlov_alexey88@mail.ru

Анатолий Анатольевич Попович – д.т.н., профессор, директор Института машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ

 **ORCID:** 0000-0002-5974-6654

 **E-mail:** popovicha@mail.ru

Eduard M. Farber – Cand. Sci. (Eng.), Engineer, Laboratory of Synthesis of New Materials and Structures, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

 **ORCID:** 0009-0007-8830-9887

 **E-mail:** d.farber2010@yandex.ru

Alexey V. Orlov – Researcher, Materials Design and Additive Manufacturing Laboratory of SPbPU

 **ORCID:** 0000-0002-0090-0442

 **E-mail:** orlov_alexey88@mail.ru

Anatoly A. Popovich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Machinery, Materials and Transport, SPbPU

 **ORCID:** 0000-0002-5974-6654

 **E-mail:** popovicha@mail.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

Э. М. Фарбер – проведение экспериментов, обработка полученных результатов, написание статьи, участие в обсуждении результатов.

А. В. Орлов – планирование экспериментов, изготовление образцов, участие в обсуждении результатов.

А. А. Попович – концептуализация идеи, определение цели работы и ее задач, участие в обсуждении результатов.

E. M. Farber – performed the experiments, processed the experimental data, wrote the manuscript, participated in the discussion of the results.

A. V. Orlov – planned the experiments, fabricated the samples, participated in the discussion of the results.

A. A. Popovich – conceptualized the study, defined its aim and objectives, participated in the discussion of the results.

Статья поступила 24.03.2026 г.

Доработана 27.07.2026 г.

Принята к публикации 28.07.2026 г.

Received 24.03.2026

Revised 27.07.2026

Accepted 28.07.2026