

Научная статья

УДК 539.4

doi: 10.17223/19988621/93/9

Деформация и разрушение сетчатых PLA образцов при динамическом нагружении

Наталья Васильевна Казанцева¹, Анатолий Олегович Онищенко²,
Сергей Алексеевич Зелепугин³, Роман Олегович Черепанов⁴,
Оксана Владимировна Иванова⁵

^{1, 2} *Институт физики металлов Уральского отделения РАН им. М.Н. Михеева, Екатеринбург, Россия*

^{3, 4, 5} *Томский научный центр Сибирского отделения РАН, Томск, Россия*

³ *Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *kazantseva@imp.uran.ru*

² *tolya_onishenko@mail.ru*

³ *szel@yandex.ru*

⁴ *rcherepanov82@gmail.com*

⁵ *o.ivanova@hq.tsc.ru*

Аннотация. Проведен анализ процесса деформации и характера разрушения в условиях динамических (баллистических) испытаний сетчатых PLA образцов со структурой трижды периодической поверхности минимальной энергии типа алмазной поверхности Шварца (Schwarz Diamond Surface), полученных с помощью 3D-принтера. Обнаружено, что с ростом плотности сетчатых PLA образцов характер разрушения меняется с вязкого на квазихрупкий.

Ключевые слова: полилактид (PLA), сетчатая структура, метаматериалы, 3D-печать, динамическое нагружение, разрушение

Для цитирования: Казанцева Н.В., Онищенко А.О., Зелепугин С.А., Черепанов Р.О., Иванова О.В. Деформация и разрушение сетчатых PLA образцов при динамическом нагружении // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 93. С. 106–116. doi: 10.17223/19988621/93/9

Original article

Deformation and fracture of PLA honeycomb samples under dynamic loading

Nataliya V. Kazantseva¹, Anatoliy O. Onishchenko², Sergey A. Zelepugin³,
Roman O. Cherepanov⁴, Oksana V. Ivanova⁵

^{1, 2} *M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation*

^{3, 4, 5} Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, Russian Federation

³ Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ kazantseva@imp.uran.ru

² tolya_onishenko@mail.ru

³ szel@yandex.ru

⁴ rcherepanov82@gmail.com

⁵ o.ivanova@hq.tsc.ru

Abstract. The search for and investigation of new porous materials with a bionic honeycomb structure is an urgent scientific problem due to the active development of additive technologies. The aim of this study is to examine the effect of the morphology of PLA (polylactide, $C_3H_4O_3$) samples with a honeycomb structure based on a triply periodic minimal surface, namely the Schwarz-Diamond surface, on their impact resistance under dynamic (ballistic) loading. To produce samples with the Schwarz-Diamond surface, a software, which generates G-Code using surface equations, is developed. The honeycomb samples are manufactured from PLA filaments via fusion deposition modeling (FDM) using a Picasso 3D printer. The dimensions of the cells in the samples vary from 1 to 5 mm, which corresponds to the large honeycomb morphology. Ballistic tests are conducted on an experimental test setup comprising a Crossman 2100 classic BB pneumatic pump air rifle, a device for recording the velocity of a spherical projectile (ball), and a pocket to arrange a test sample and to catch the ball and fragments. The analysis of deformation and fracture of the PLA samples reveals that the fracture pattern after ballistic impact tests is dependent on density and exhibits a transition from ductile to quasi-brittle behavior. Quasi-brittle fracture behavior is observed in the samples with the highest density (0.93 g/cm^3). The mechanical properties of the Schwarz-Diamond surface structures are found to be moderate. Therefore, such structures can be used as reinforcement in various applications, including building materials, aerospace components, and automotive parts.

Keywords: polylactide (PLA), honeycomb structure, metamaterials, 3D printing, dynamic loading, fracture

For citation: Kazantseva, N.V., Onishchenko, A.O., Zelepugin, S.A., Cherepanov, R.O., Ivanova, O.V. (2025) Deformation and fracture of PLA honeycomb samples under dynamic loading. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 93. pp. 106–116. doi: 10.17223/19988621/93/9

Введение

Сетчатые дизайнерские конструкции представляют высокий научный и практический интерес для создания изделий для автомобильной, аэрокосмической промышленности и медицины. Такие конструкции позволяют снизить общий вес изделия, а также могут являться армирующей частью композиционного материала. Это способствует созданию новых композитов с разными эксплуатационными свойствами. Среди различных видов ячеек в сетчатых структурах трижды периодические поверхности минимальной энергии (triply periodic minimal surface; TPMS) занимают особое место. Особенностью таких поверхностей является наличие трансляционной симметрии в трех независимых направлениях и нулевой кривизны [1]. Размеры и форму сот (ячеек) в материалах с топологической TPMS структурой можно варьировать и, таким образом, управлять их механическими свой-

ствами. Среди известных TPMS структур наиболее перспективными для армирующей основы признаются материалы со структурой типа алмазной поверхности Шварца (Schwarz Diamond Surface) [2]. Эта топологическая поверхность построена с помощью алгебраических действий над тригонометрическими функциями (\sin , \cos) [2]:

$$\sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) + \sin(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) + \\ + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) = 0.$$

Получение изделий с TPMS структурой стало возможным с развитием аддитивных технологий, использующих 3D-принтеры. Сегодня 3D-печать позволяет создавать сложные композиционные материалы на металло-матричной или полимерной основе [3]. Материалы с TPMS структурой являются перспективными в различных отраслях промышленности в качестве замены монолитных изделий. Например, их можно использовать в качестве катализаторов химических реакций или для поглощений акустических волн [4–6]. Также легкие сетчатые изделия с TPMS структурой могут быть использованы в качестве амортизаторов ударной нагрузки в авиакосмических конструкциях [7, 8]. В работе [8] проведена оценка поглощения энергии сжатия полимерным образцом с TPMS структурой типа героида (Geroid), полученным с помощью 3D-принтера, в условиях статического сжатия при комнатной температуре. При этом исследований поведения материалов с TPMS структурой в условиях динамических (баллистических) нагрузок в литературе нами не обнаружено.

В работе [9] было показано, что для выбора оптимальной конструкции образца с TPMS структурой в качестве армирующей основы композиционного материала может быть использован биоразлагаемый PLA пластик. PLA пластик на основе полилактида ($C_3H_4O_3$) является известным дешевым природным материалом, который обладает хорошей термической стабильностью и пластичностью и широко используется для производства упаковок, одноразовой посуды, тары, а также медицинских штифтов и хирургических нитей, защитных пленок, ожоговых и раневых повязок [10, 11].

Цель настоящей работы – анализ деформации и разрушения после динамических (баллистических) испытаний PLA образцов с сетчатой топологической структурой трижды периодической поверхности минимальной энергии типа алмазной поверхности Шварца (Schwarz Diamond Surface), полученных с помощью 3D-принтера.

Экспериментальная часть

Для получения образцов с топологией типа Schwarz Diamond Surface была разработана программа для генерации G-Code по алгебраическому уравнению алмазной поверхности Шварца (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617696). Сетчатые образцы размером $80 \times 60 \times 60$ мм были получены методом наплавления (Fusion Deposition Modeling; FDM) на 3D-принтере Picasso из нитевидного PLA термопластика (полилактид, Bestfilament, Россия) диаметром 1.75 мм. Физико-механические свойства нитевидного PLA термопластика белого цвета были следующими: плотность – 1.24 г/см^3 ; прочность – 62.63 МПа ; пластичность – 4.43% ; температура плавления – 210° ; модуль упругости – 3.2 ГПа .

Размер ячеек в сетчатых образцах варьировали от 1 до 5 мм (крупная сота). Для реализации технологии FDM-печати была предварительно построена трехмерная цифровая модель образцов в формате STL, затем для печати эта модель в компьютерной программе была разделена на слои, после чего был сгенерирован код (G-code), в котором были заложены все параметры печати и перемещения экструдера 3D-принтера. Для печати образцов были использованы следующие режимы 3D-принтера: диаметр сопла экструдера – 0.5 мм; высота слоя – 0.2 мм; ширина линии – 0.5 мм; температура экструдера – 215°C; температура подогрева стола – 60°C.

Плотность полученных образцов измеряли сравнением с эталонным образцом с плотностью 100% и того же объема, полученным также с помощью FDM-печати. Все образцы, включая плотный, были взвешены на аналитических весах. Полученное отношение масс сетчатых образцов и массы плотного образца составило 0.25, 0.5, 0.75. Плотность сетчатых образцов $\rho = \frac{m}{V}$ была рассчитана с учетом значений плотности полилактидной нити.

Для баллистических испытаний был использован экспериментальный стенд, состоящий из пневматической винтовки с предварительной накачкой Crossman 2100 classic, устройства для регистрации скорости полета сферического ударника (шарика) и приемного кармана для расположения тестируемого образца и улавливания шарика и осколков, при необходимости. Выстрелы производились стальным омедненным шариком диаметром 4.43 мм, массой 0.35 г, скорость полета шарика составила (220 ± 5) м/с. Время полета шарика определялось по времени начала спадов на соответствующих осциллограммах.

Исходные образцы (по два образца каждой плотности) были пронумерованы следующим образом: 1 – плотные, 2 – образцы средней плотности, 3 – образцы низкой плотности. Перед испытаниями все образцы были распилены на три равные части по 25 мм толщиной в плоскости, параллельной плоскости печатного стола. После распила поверхности распила были выровнены фрезерованием острым резцом на низкой скорости с медленной подачей. Отстрел был произведен по трем поверхностям двух образцов каждого типа:

1. По недеформированной поверхности нижнего слоя (гладкая, ровная, относительно более плотная поверхность), образцы пронумерованы дополнительно: -1, -2.

2. По недеформированной поверхности верхнего слоя (ровная, шершавая поверхность), образцы пронумерованы дополнительно: -3, -4.

3. По деформированной поверхности после обработки, образцы пронумерованы дополнительно: -5, -6.

После выстрела образцы распиливали для анализа особенностей процесса взаимодействия шарика с полимерной преградой.

Масса образцов до и после испытания измерялась на аналитических весах Ohaus AV114C Adventurer PRO (Альбштадт, Германия), обеспечивающих точность взвешивания 0.0001 г.

Образцы после распила были сфотографированы с приложенной измерительной линейкой с ценой деления 0.5 мм. На фотографиях были выделены границы кратера и края ударников, оцифрованная линейка использовалась для оценки глубины и диаметра кратеров. Размеры пикселей изображений после микроскопии составляли 0.04 мм, при этом положение границ кратеров и ударника опре-

делялось с точностью не хуже 2 пикселей, что дает погрешность определения глубины проникновения и диаметра кратера не хуже 0.08 мм.

Результаты исследования и обсуждение

На рис. 1 представлено оптическое изображение полученных с помощью 3D-принтера образцов. Плотность образцов составила: для группы 1 – 0.93 г/см³; для группы 2 – 0.62 г/см³; для группы 3 – 0.31 г/см³.

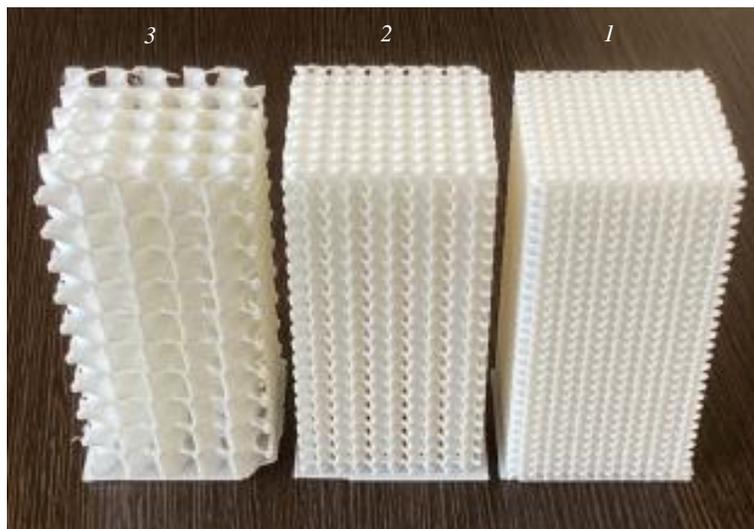


Рис. 1. PLA образцы со структурой типа Schwarz Diamond, оптический снимок
Fig. 1. Optical image of PLA samples with a Schwarz-Diamond surface structure

В таблице приведены сводные данные баллистических испытаний. Диаметр кратера указан максимальный, измеренный на лицевой поверхности образцов. Для образцов группы 1 глубина кратера указана максимальная, измеренная в наиболее глубокой точке кратера.

Результаты баллистических испытаний сетчатых образцов, скорость удара (220 ± 5) м/с

Группа образца	Начальная масса образца, M_0 , г	Масса после удара, M_1 , г	Изменение массы, dM , г	Глубина кратера, L_k , мм	Диаметр кратера, D_k , мм
1-1	83.3967	83.3033	0.0934	3.8	10.0
1-2	75.6170	75.5614	0.0556	3.8	9.0
1-3	76.2534	76.1476	0.1058	4.2	9.0
1-4	80.9533	80.8403	0.113	4.1	10.5
1-5	78.5875	78.4768	0.1107	4.5	10.0
1-6	78.0580	77.9552	0.1028	4.0	11.0
2-1	55.5642	55.4529	0.1113	9.4	3.5
2-2	53.6077	53.5980	0.0097	9.8	3.4
2-3	56.5033	56.4896	0.0137	9.6	3.5

Окончание таблицы

Группа образца	Начальная масса образца, M_0 , г	Масса после удара, M_1 , г	Изменение массы, dM , г	Глубина кратера, L_k , мм	Диаметр кратера, D_k , мм
2-4	50.6494	50.6249	0.0245	9.6	3.0
2-5	54.2106	54.1488	0.0618	10.0	3.0
2-6	53.3549	53.2653	0.0896	10.6	3.0
3-1	29.5593	29.4291	0.1302	–	пробитие
3-2	29.5530	29.3511	0.2019	–	пробитие
3-3	28.5868	28.4578	0.129	–	пробитие
3-4	27.9008	27.7616	0.1392	–	пробитие
3-5	27.3461	27.1580	0.1881	–	пробитие
3-6	25.6171	25.3519	0.2652	–	пробитие

На рис. 2–4 приведены электронно-микроскопические изображения образцов после баллистических испытаний. При ударном испытании образцов группы 1 (плотность 0.93 г/см^3) ударяющий шарик отскочил от преграды. В образцах после динамических испытаний обнаружено формирование неглубокого кратера (см. рис. 2, а). Глубина кольцевой области разрушения составляет примерно половину от максимальной глубины кратера. Максимальный диаметр центральной выемки немного меньше диаметра шарика (см. рис. 2, а). По форме центральный кратер близок к полусфере с неровной поверхностью из-за разрушения материала образца. Характер разрушения образцов группы 1 можно рассматривать как квази-хрупкий (см. рис. 2, б). На электронно-микроскопических снимках можно видеть хрупкий излом PLA волокон и их более вязкое деформирование.

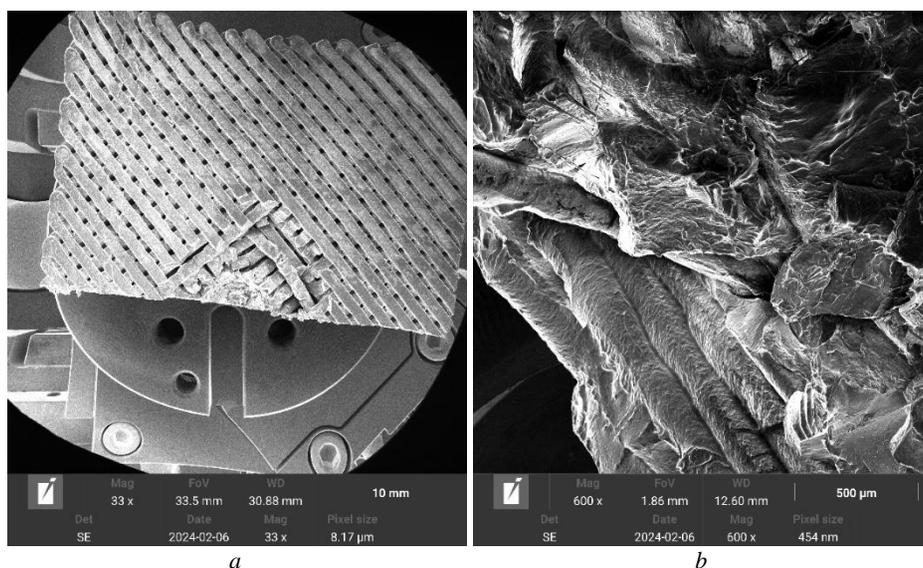


Рис. 2. Микроструктура образцов группы 1 после испытаний при скорости 220 м/с, СЭМ: общий вид зоны удара (а), центральная часть зоны удара (б)

Fig. 2. SEM images of the microstructure of samples (group 1) after ballistic tests at a velocity of 220 m/s: (a) general view of the impact zone and (b) central part of the impact zone

Для образцов группы 2 (плотность 0.62 г/см^3) (см. рис. 3, *a*) произошло внедрение шарика на глубину двух его диаметров. Образовавшийся в процессе внедрения шарика канал уже, чем диаметр самого шарика (3.0–3.5 мм при диаметре шарика 4.43 мм). Уменьшение ширины канала обусловлено вязким характером деформирования и разрушения материала образца после прохождения шарика. Также в канале отмечены частицы разрушенных PLA волокон. Характер разрушения образцов группы 2 меняется с квазихрупкого на вязкий. В структуре зоны разрушения хорошо видны вытянутые PLA волокна (см. рис. 3, *b*).

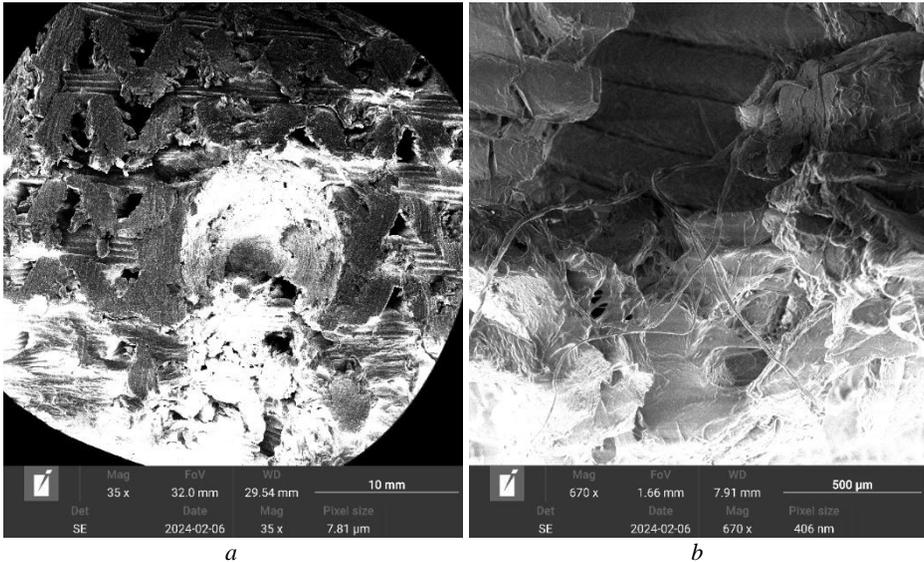


Рис. 3. Микроструктура образцов группы 2 после испытаний при скорости 220 м/с, СЭМ: общий вид зоны удара (*a*), нижняя, входная часть зоны удара (*b*)

Fig. 3. SEM images of the microstructure of samples (group 2) after ballistic tests at a velocity of 220 m/s: (*a*) general view of the impact zone and (*b*) bottom part of the impact zone

В образцах группы 3 (плотность 0.31 г/см^3) после испытаний со скоростью 220 м/с обнаружено сквозное пробитие образцов (см. рис. 4, *a*, канал указан стрелкой). Ширина канала, образованного шариком, превышает его диаметр. Характер разрушения образцов группы 3 также вязкий. На рис. 4, *b* показан участок внутри канала, где можно видеть вязкий скол стенок PLA ячейки.

Измеренный средний дефект массы образцов составил: для группы 1 0.097 г, для группы 2 0.052 г, для группы 3 0.18 г. Образцы группы 2 с плотностью 0.62 г/см^3 демонстрируют наименьшую потерю массы, что обусловлено застреванием разрушенного материала в канале. Для этих образцов при ударе разрушенный материал представляет собой мелкие крупинки пластика, часть из них вылетает из канала под действием вибрации и потока вытесняемого воздуха, часть осколков застревает в порах материала. Наибольший дефект массы наблюдается для образцов группы 3 (плотность 0.31 г/см^3 ; таблица).

Полученные в работе результаты позволяют выбрать наиболее оптимальный вариант размеров сот TPMS структуры, которым являются образцы группы 2.

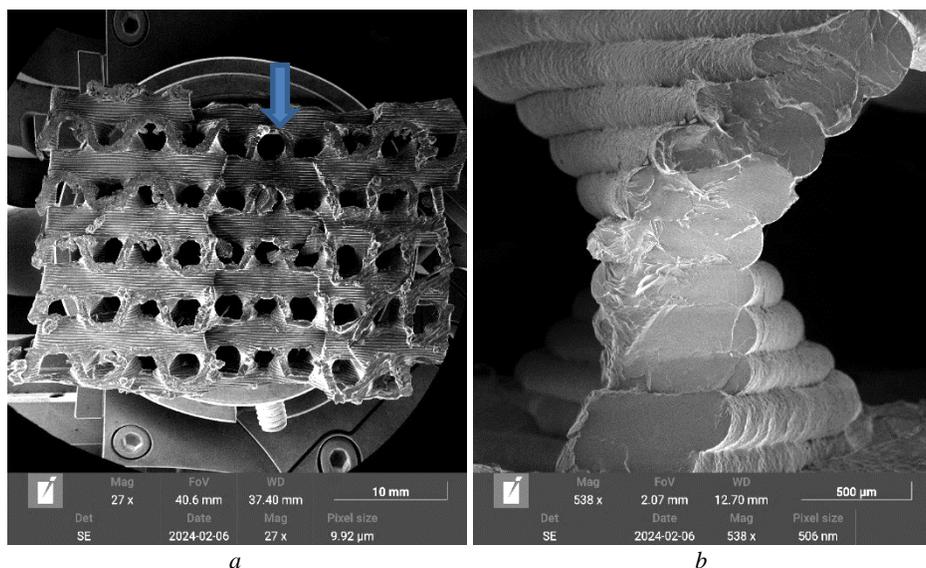


Рис. 4. Микроструктура образцов группы 3 после испытаний при скорости 220 м/с, СЭМ: канал в зоне разрушения (а), участок в центре канала (б)

Fig. 4. SEM images of the microstructure of samples (group 3) after ballistic tests at a velocity of 220 m/s: (a) channel in the fracture zone and (b) section in the channel center

Образцы с алмазной поверхностью Шварца с плотностью 0.62 г/см^3 (группа 2, 0.5 от плотности сплошного образца) показали хорошую устойчивость к удару и вязкий характер разрушения. Однако в целом она хуже, чем у известных демпферных материалов, таких как углепластики или стеклоткань, пропитанная смолой [11]. Тем не менее армирующий вариант группы 2 выбран вполне удачно и в дальнейшем может служить для создания композиционного материала с различным наполнением.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведены баллистические испытания сетчатых PLA образцов с различной плотностью, на основании которых выбран оптимальный вариант плотности сот (группа 2, 0.62 г/см^3 , 0.5 от плотности сплошного образца) TPMS структуры для композиционного материала.
2. Обнаружено, что характер деформирования и разрушения исследованных PLA образцов после баллистических испытаний зависит от плотности ячеек и с ростом плотности меняется с вязкого на квазихрупкий. Квазихрупкое разрушение наблюдается в образцах с плотностью 0.93 г/см^3 .

Список источников

1. Karcher H., Polthier K. Construction of triply periodic minimal surfaces // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1996. V. 354 (1715). P. 2077–2104. doi: 10.1098/rsta.1996.0093

2. Restrepo S., Ocampo S., Ram'irez J.A., Paucar C., Garc'ia C. Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. V. 935. Art. 012036. doi: 10.1088/1742-6596/935/1/012036
3. Промахов В.В., Матвеев А.Е., Шульц Н.А., Бахмат В.Р., Дронов Ф.Ю., Туранов Т.Э. Исследование структуры и свойств металломатричных композиционных материалов, полученных методом прямого лазерного выращивания // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2022. № 77. С. 125–139. doi: 10.17223/19988621/77/10
4. Guo Y., Rosa M.I.N., Ruzzene M. Topological surface states in a gyroid acoustic crystal // *Adv. Sci.* 2023. V. 10 (6). Art. 2205723. doi: 10.1002/advs.202205723
5. Arenas J.P., Crocker M.J. Recent trends in porous sound-absorbing materials // *Sound and Vibration*. 2010. V. 44 (7). P. 12–17.
6. Li X., Chua J.W., Yu X., Li Z., Zhao M., Wang Z., Zhai W. 3D-printed lattice structures for sound absorption: Current progress, mechanisms and models, structural-property relationships, and future outlook // *Adv. Sci.* 2024. V. 11. Art. 2305232. doi: 10.1002/advs.202305232
7. Дьяченко С.В., Лебедев Л.А., Сычев М.М., Нефедова Л.А. Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба // *Журнал технической физики*. 2018. Т. 88, вып. 7. С. 1014–1017. doi: 10.21883/JTF.2018.07.46169.2555
8. Abueidda D.W., Elhebeary M., Shiang C.-S. (Andrew), Pang S., Abu Al-Rub R.K., Jasiuk I.M. Mechanical properties of 3D printed polymeric gyroid cellular structures: Experimental and finite element study // *Materials and Design*. 2019. V. 165. Art. 107597. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107597
9. Богданова О.И., Седуш Н.Г., Овчинникова Т.Н., Белоусов С.И., Поляков Д.К., Чвалун С.Н. Полилактид – биоразлагаемый биосовместимый полимер на основе растительного сырья // *Экология и промышленность России*. 2010. № 5. С. 18–23.
10. Kulkarni R.K., Pani K.C., Neuman C., Leonard F. Polylactic acid for surgical implants // *Arch. Surg.* 1966. V. 93. P. 839–843. doi: 10.1001/archsurg.1966.01330050143023
11. Туренко А.Н., Ужва А.В., Сергиенко А.В. Результаты исследований поглощения энергии при ударе изделиями из композитных материалов // *Вестник ХНАДУ*. 2013. Вып. 60. С. 90–94.

References

1. Karcher H., Polthier K. (1996) Construction of triply periodic minimal surfaces. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 54(1715). pp. 2077–2104. doi: 10.1098/rsta.1996.0093
2. Restrepo S., Ocampo S., Ramirez J.A., Paucar C., Garcia C. (2017) Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing. *Journal of Physics: Conference Series*. 935. Article 012036. doi: 10.1088/1742-6596/935/1/012036
3. Promakhov V.V., Matveev A.E., Schultz N.A., Bakhmat V.R., Dronov F.Yu., Turanov T.E. (2022) Issledovanie struktury i svoystv metallomatrichnykh kompozitsionnykh materialov, poluchennykh metodom pryamogo lazernogo vyrashchivaniya [A study of the structure and properties of the metal matrix composite materials obtained by a method of direct laser growing]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 77. pp. 125–139. doi: 10.17223/19988621/77/10
4. Guo Y., Rosa M.I.N., Ruzzene M. (2022) Topological surface states in a gyroid acoustic crystal. *Advanced Science*. 10(6). Article 2205723. doi: 10.1002/advs.202205723

5. Arenas J.P., Crocker M.J. (2010) Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound and Vibration*. 44(7). pp. 12–17.
6. Li X., Chua J.W., Yu X., Li Z., Zhao M., Wang Z., Zhai W. (2024) 3D-printed lattice structures for sound absorption: Current progress, mechanisms and models, structural-property relationships, and future outlook. *Advanced Science*. 11(4). Article e2305232. doi: 10.1002/adv.202305232
7. D'yachenko S.V., Lebedev L.A., Sychev M.M., Nefedova L.A. (2018) Physicomechanical properties of a model material in the form of a cube with the topology of Triply Periodic Minimal Surfaces of the gyroid type. *Technical Physics*. 63. pp. 984–987. doi: 10.1134/S1063784218070101
8. Abueidda D.W., Elhebeary M., Shiang C.-S. (Andrew), Pang S., Abu Al-Rub R.K., Jasiuk I.M. (2019) Mechanical properties of 3D printed polymeric gyroid cellular structures: Experimental and finite element study. *Materials and Design*. 165. Article 107597. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107597
9. Bogdanova O.I., Sedush N.G., Ovchinnikova T.N., Belousov S.I., Polyakov D.K., Chvalun S.N. (2010) Полилактид – биоразлагаемый биосовместимый полимер на основе растительного сырья [Polylactide, a biodegradable, biocompatible polymer based on plant raw materials]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*. 5. pp. 18–23.
10. Kulkarni R.K., Pani K.C., Neuman C., Leonard F. (1966) Polyactic acid for surgical implants. *Archives of Surgery*. 93. pp. 839–843. doi: 10.1001/archsurg.1966.01330050143023
11. Turenko A.N., Uzhva A.V., Sergienko A.V. (2013) Rezultaty issledovaniy pogloshcheniya energii pri udare izdeliyami iz kompozitnykh materialov [Research results concerning impact energy absorbing by composite products]. *Vestnik KhNADU – Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 60. pp. 90–94.

Сведения об авторах:

Казанцева Наталия Васильевна – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института физики металлов Уральского отделения РАН им. М.Н. Михеева (Екатеринбург, Россия). E-mail: kazantseva@imp.uran.ru

Онищенко Анатолий Олегович – младший научный сотрудник Института физики металлов Уральского отделения РАН им. М.Н. Михеева (Екатеринбург, Россия). E-mail: tolya_onishenko@mail.ru

Зелепугин Сергей Алексеевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Томского научного центра Сибирского отделения РАН; профессор Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: szel@yandex.ru

Черепанов Роман Олегович – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер Томского научного центра Сибирского отделения РАН (Томск, Россия). E-mail: rcherepanov82@gmail.com

Иванова Оксана Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Томского научного центра Сибирского отделения РАН (Томск, Россия). E-mail: o.ivanova@hq.tsc.ru

Information about the authors:

Kazantseva Nataliya V. (Doctor of Physics and Mathematics, Principal Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russian Federation). E-mail: kazantseva@imp.uran.ru

Onishchenko Anatoliy O. (Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russian Federation). E-mail: tolya_onishenko@mail.ru

Zelepugin Sergey A. (Doctor of Physics and Mathematics, Leading Researcher, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: szel@yandex.ru

Cherepanov Roman O. (Candidate of Physics and Mathematics, Leading Engineer, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation). E-mail: rcherepanov82@gmail.com

Ivanova Oksana V. (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation). E-mail: o.ivanova@hq.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 25.06.2024; принята к публикации 07.02.2025

The article was submitted 25.06.2024; accepted for publication 07.02.2025