

Received: 31.10.2023

Revised: 11.12.2023

Accepted: 29.12.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.078-089



FRACTURE BEHAVIOR OF GRID STRUCTURES WITH PERIODIC AND QUASIPERIODIC DESIGNS



I. S. Kamantsev^{1, a),*}, A. I. Golodnov^{2, b)}, M. R. Sukhova^{1, 2, c)},
O. Yu. Kornienko^{2, d)}, and S. V. Belikov^{2, 3, e)}



¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*



²*Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*



³*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  ks@imach.uran.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0003-2958-310X>  A.I.Golodnov@urfu.ru;

c)  <https://orcid.org/0000-0003-0896-3090>  marinas@imach.uran.ru;

d)  <https://orcid.org/0009-0002-3336-7071>  o.j.kornienko@urfu.ru;

e)  <https://orcid.org/0000-0002-4732-1448>  s.v.belikov@urfu.ru

*Corresponding author. E-mail: ks@imach.uran.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

Tel.: +7 (343) 374-4725; fax: +7 (343) 374-5330

The failure of grid structures with periodic and quasi-periodic designs under uniaxial compression is investigated. The quasi-periodic cellular structure is built on the principles of biomimicry. Structures characteristic of living nature are used as a prototype. A honeycomb is the prototype for the periodic structure, and the quasiperiodic structure is built with regard to the geometric principles of the skeleton of *Aphrocallistes* sp. (a sea sponge). It has been found that there is a 24 % increase in effective work spent on the first act of the failure of the object with uniaxial compression in structures with elementary components – imperfect elements that distinguish them from hexagons (the angle between the sides, the size and shape of the cells). The correlation of the failure pattern of the grid structures with periodic and quasiperiodic designs to the amount of work spent on the complete failure of the samples has been established. It has been revealed that, for the samples with a periodic structure, the first act of failure is characterized by the main failure of the intermodal membranes along the entire perimeter, i.e. that it is one-dimensional sequential annular failure. The samples with a quasi-periodic structure are characterized by two-dimensional failure, i.e., for the load-bearing capacity of an object to be significantly reduced, there must be a greater number of destroyed intermodal membranes per unit area and, therefore, a higher density of destroyed elements.

Keywords: cellular structures, grid structures, fracture energy, load-bearing capacity

References

1. Wang, Z. Recent advances in novel metallic honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166, 731–741. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.02.
2. Płatek, P., Kucewicz, M., Baranowski, P., Małachowski, J., and Popławski, A. Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures. *Materials & Design*, 2018, 142, 177–189. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.028.

3. Xiao, L. and Song, W. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 111, 255–272. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.09.018.
4. Kamantsev, I.S., Loginov, Yu.N., Belikov, S.V., Stepanov, S.I., Karabanalov, M.S., and Golodnov, A.I. Fracture behavior of Ti-6-4 cellular structures obtained by selective laser melting. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, iss. 4, pp. 35–47. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.4.035-047. Available at: http://dream-journal.org/issues/content/article_294.html
5. Akhmetshin, L.R. and Smolin, I.Yu. Influence of unit cell parameters of tetrachiral mechanical metamaterial on its effective properties. *Nanoscience and Technology*, 2020, 11 (3), 265–273. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033737.
6. Eidini, M. Zigzag-base folded sheet cellular mechanical metamaterials. *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 6, 96–102. DOI: 10.1016/j.eml.2015.12.006.
7. Hu, L.L. and Yu, T.X. Dynamic crushing strength of hexagonal honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37 (5), 467–474. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.12.001.
8. Evans, A.G., Hutchinson, J.W., Fleck, N.A., Ashby, M.F., and Wadley, H.N.G. The topological design of multifunctional cellular metals. *Progress in Materials Science*, 2001, 46, 3–4, 309–327. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00016-5.
9. Sun, F., Lai, C., and Fan, H. In-plane compression behavior and energy absorption of hierarchical triangular lattice structures. *Materials & Design*, 2016, 100, 280–290. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.023.
10. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., and Raymont, D. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 62, 32–38. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2012.06.002.
11. Liu, Y., and Zhang, X.-C. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36 (1), 98–109. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.03.001.
12. Tan, P.J., Reid, S.R., Harrigan, J.J., Zou, Z., and Li, S. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II – ‘shock’ theory and comparison with experimental data and numerical models. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53 (10), 2206–2230. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.05.003.
13. Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H., and Vaziri, A. Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48 (3–4), 506–516. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.10.018.
14. Khrunyk, Y., Lach, S., Petrenko, I., and Ehrlich, H. Progress in modern marine biomaterials research. *Marine Drugs*, 2020, 18 (12), 589. DOI: 10.3390/md18120589.
15. Voronkina, A., Romanczuk-Ruszuk, E., Przekop, R.E., Lipowicz, P., Gabriel, E., Heimler, K., Rogoll, A., Vogt, C., Frydrych, M., Wienclaw, P., Stelling, A.L., Tabachnick, K., Tsurkan, D., and Ehrlich H. Honeycomb biosilica in sponges: from understanding principles of unique hierarchical organization to assessing biomimetic potential. *Biomimetics*, 2023, 8 (2), 234. DOI: 10.3390/biomimetics8020234.
16. Gibson, L. and Ashby, M. *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, Cambridge, 1997, 532 p.

Подана в журнал: 31.10.2023
УДК 620.173.24:62-405.8:539.42
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.078-089











ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ И КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРАМИ

И. С. Каманцев^{1, а),*}, А. И. Голоднов^{2, б)}, М. Р. Сухова^{1, 2, в)},
О. Ю. Корниенко^{2, г)}, С. В. Беликов^{2, 3, д)}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

²Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108, Россия

- а)  <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  ks@imach.uran.ru;
б)  <https://orcid.org/0000-0003-2958-310X>  A.I.Golodnov@urfu.ru;
в)  <https://orcid.org/0000-0003-0896-3090>  marinas@imach.uran.ru;
г)  <https://orcid.org/0009-0002-3336-7071>  o.j.kornienko@urfu.ru;
д)  <https://orcid.org/0000-0002-4732-1448>  s.v.belikov@urfu.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: ks@imach.uran.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия
Тел.: +7 (343) 374-47-25; факс: +7 (343) 374-53-60

В работе проведено исследование особенностей разрушения сетчатых конструкций с периодической и квазипериодической ячеистыми структурами в условиях одноосного сжатия. Квазипериодическая ячеистая структура построена на принципах биомимикрии. В качестве прототипа использованы структуры, характерные для живой природы. Прототипом для периодической структуры послужили пчелиные соты, а квазипериодическая структура была построена с учетом геометрических принципов строения скелета морской губки *Aphrocallistes*. Установлено, что у структур, имеющих в строении элементарные составляющие – неидеальные элементы, отличающие их от гексагонов (угол между сторонами, размер ячеек и их форма), – происходит увеличение на 24 % эффективной работы, затрачиваемой на первом акте разрушения объекта при одноосном сжатии. Установлена взаимосвязь характера разрушения образцов с периодической и квазипериодической ячеистыми структурами с величиной работы, затраченной на полное разрушение объектов исследования. Выявлено, что для образцов с периодической структурой первый акт разрушения характеризуется магистральным выходом из строя перемычек между узлами по всему периметру, т. е. имеет место одномерное последовательное кольцевое разрушение. Для образцов с квазипериодической структурой характерно двумерное разрушение, т. е. для значительного снижения несущей способности объекта требуется разрушение большего количества перемычек между узлами на единицу площади, а следовательно, большая плотность разрушенных элементов.

Ключевые слова: ячеистые структуры, сетчатые конструкции, работа разрушения, несущая способность

1. Введение

Многие природные тела, например кораллы, кости и др., состоят из ячеек или ячеистых структур. Ячейки (или соты) являются наиболее распространенными в качестве элементарных составляющих строения пространственных структур в исследуемых изделиях,

созданных искусственно. Изучено, что гексагональная структура, похожая на пчелиные соты, обеспечивает превосходное поведение с самым большим полезным пространством, демонстрируя огромный механический потенциал при различных условиях нагружения [1–3]. Пространственные каркасы используют в технических задачах при проектировании и создании метаматериалов, механические свойства которых обусловлены в первую очередь своим строением, а не химическим составом основы материала [4–6]. В ряде работ [7–10] описана связь между механическими свойствами таких структур и геометрическими особенностями их элементарных ячеек. При этом установлено, что сведения об особенностях деформации каркасных структур и их разрушения под воздействием механического нагружения носят противоречивый характер. Ying Liu и Xin-Chun Zhang [11] изучали динамическое разрушение ячеистых структур с различной топологией и расположением ячеек. Их результаты показывают, что поглощение энергии при деформационном воздействии зависит не только от относительной плотности структуры, но также от расположения и геометрических особенностей формы ячеек. Группа P. J. Tan, напротив, предположила, что неравномерность расположения ячеек не оказывает существенного влияния на поглощение энергии ячеистой структурой при пластической деформации [12]. Группой Amin Ajdari [13] были исследованы механизмы разрушения двумерных сотовых структур в виде шестиугольников с периодически повторяющимся и неповторяющимся расположением. Их результаты показывают, что неоднородность ячеек не оказывает существенного влияния на диссипацию энергии в данных структурах. Таким образом, имеющиеся в литературе сведения об особенностях поведения пространственных структур и их разрушения под воздействием механического нагружения носят противоречивый характер. Возможно, причиной неоднозначных результатов в исследованиях являются различные подходы к формированию данных структур, используемые авторами, а также задачи, поставленные ими при исследовании указанных объектов.

Целью данной работы является исследование несущей способности пространственных ячеистых конструкций, полученных на основе принципов биомимикрии, а также поиск параметра, характеризующего уровень сопротивления, т. е. оказывающего наибольшее влияние на уровень сопротивления разрушению ячеистых конструкций.

2. Материал и методика

Для проведения эксперимента были напечатаны сетчатые конструкции с периодической и квазипериодической структурой из фотополимерной смолы Anycubic Water-Wash Resin. Для изготовления сетчатых структур использован 3D-принтер Anycubic Photon Ultra (Hongkong Anycubic Technology Co., Ltd), работающий с применением технологии DLP. Цифровая обработка света (DLP) использует УФ-проектор как источник ультрафиолетового света. Поперечные сечения каждого слоя проецируются один раз с использованием микрзеркал, засвечивая весь слой за один этап. Технология DLP обеспечивает высокую скорость печати, так как весь слой может быть отвержден за один акт засветки. Параметры печати представлены в таблице.

Характеристика	Значение
Высота слоя	0,05 мм
Время контакта	2 с
Время выключения света	1 с
Количество нижних слоев	4
Нижнее время экспозиции	35 с
Расстояние подъема	5 мм
Скорость подъема	2 мм/с
Скорость отвода	2 мм/с
Уровень сглаживания	4

Для построения поддержек и настройки процесса печати использовали программу Anycubic Photon Workshop. После печати сетчатые структуры промывали и досвечивали ультрафиолетом с помощью установки Anycubic Wash and Cure 2.0.

В связи с тем, что сетчатые структуры не имеют ровных опорных поверхностей, для нагружения использовали оснастку, приведенную на рис. 1. Оснастку проектировали в программном пакете SolidWorks и изготавливали на принтере Anycubic Photon Ultra из прозрачного фотополимера Anycubic Water Wash. Для настройки процесса печати использовали параметры, указанные в таблице.

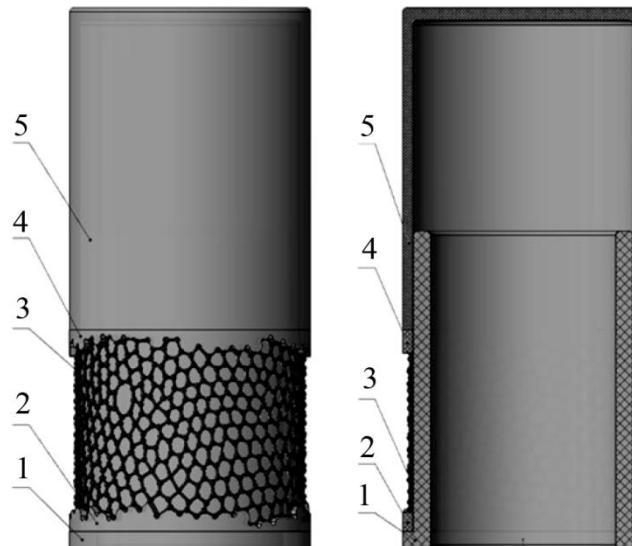


Рис. 1. Оснастка для нагружения сетчатой структуры: 1 – основа, 2 – нижнее опорное кольцо, 3 – исследуемая сетчатая структура, 4 – верхнее опорное кольцо, 5 – крышка

Объекты, построенные на принципах биомимикрии в качестве прототипа, используют структуры характерные для живой природы. В настоящем исследовании прототипом для периодической структуры послужили пчелиные соты, а квазипериодическая структура была построена с учетом геометрических принципов строения скелета морской губки *Aphrocallistes*, потенциал которого в качестве уникального источника для создания 3D-моделей для перспективных функциональных материалов отмечен в работах группы под руководством Hermann Ehrlich [14]. Скелет губки имеет сетчатую структуру, подобную сотовой, с ячейками различного размера и формы (рис. 2 а). Упрощенно его можно представить состоящим из перемычек, объединяющихся в узлах и образующих шестиугольники (рис. 2 б). При этом размер и форма шестиугольников в разных областях отличаются. Кроме того, в строении сетки можно выделить дефекты: так, некоторые шестиугольники вырождаются, например, в четырехугольники (рис. 2 б). Таким образом, объект не имеет четко выраженной «элементарной ячейки», характеризующей периодическую сетчатую структуру типа пчелиных сот. Выявление особенностей строения скелета морской губки *Aphrocallistes* выполнено по следующему алгоритму:

- 1) сканирование объекта методом компьютерной томографии;
- 2) обработка DICOM-файлов, полученных в результате сканирования в пакете InVesalius 3.1;
- 3) генерация STL-файла на основе DICOM-файлов;
- 4) преобразование STL-файла в CAD-модель в пакете SolidWorks;
- 5) преобразования CAD-файла.

Актуальность разработанного подхода подтверждена применением подобного алгоритма, описанного в работе [15].

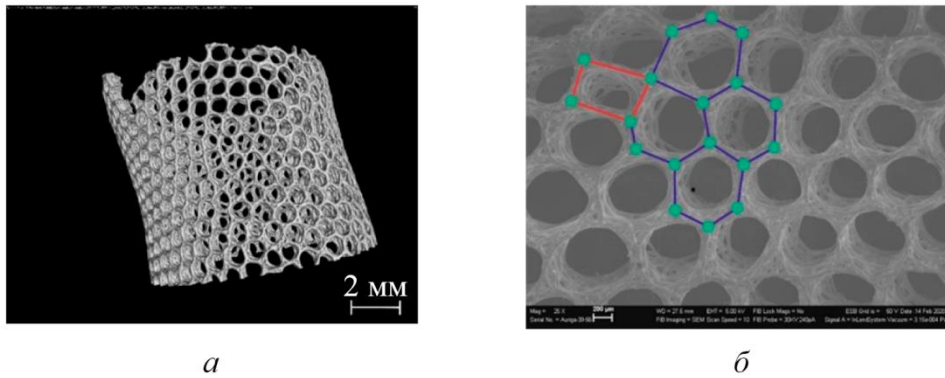


Рис. 2. Скелет морской губки *Aphrocallistes*: микротомография (а); электронная микроскопия (б)

Рассмотрим подробнее пункты 4 и 5 алгоритма формирования CAD-модели для последующей 3D-печати объекта. На 4 этапе STL-файл импортировали в пакет SolidWorks, в котором был построен 3D-эскиз. Последний включает точки, привязанные к точкам STL-файла и перемычки, оформленные линиями. Далее с помощью стандартных инструментов SolidWorks 3D-эскиз был преобразован в твердое тело. Перемычки были оформлены цилиндрами диаметром 0,1 мм, узлы – сферами диаметром 0,5 мм (рис. 3).

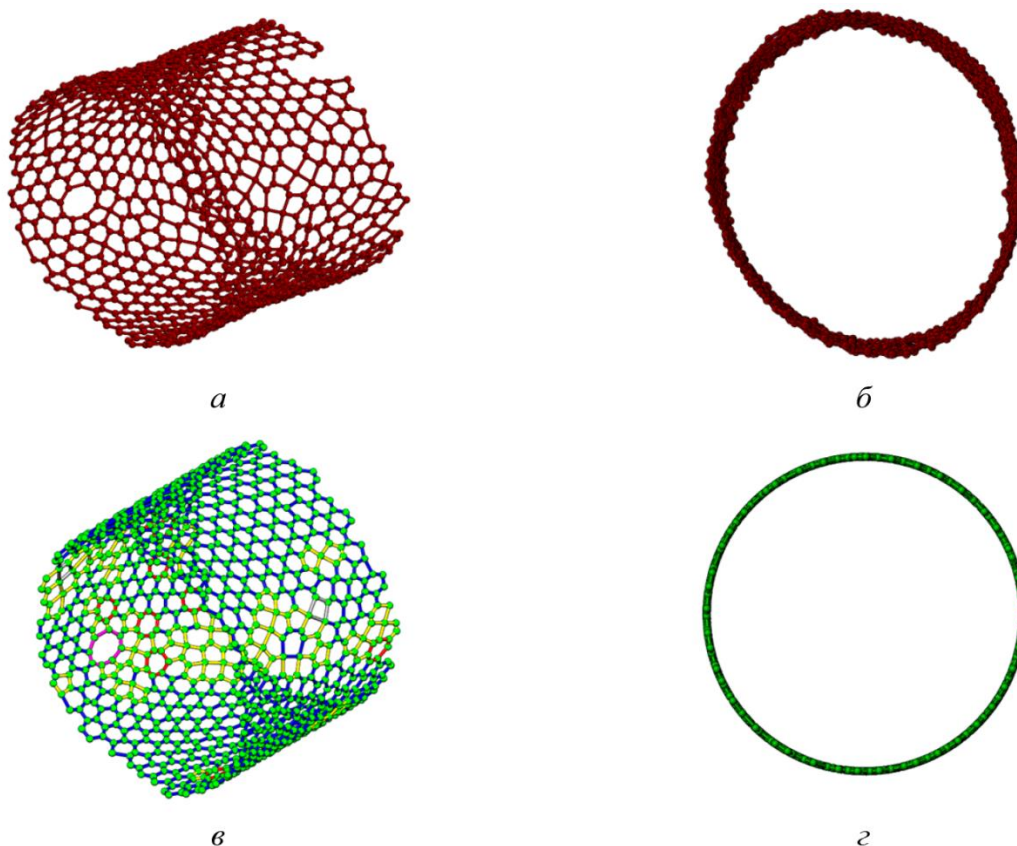


Рис. 3. CAD-модель, повторяющая строение объекта исследования до (а, б) и после (в, г) преобразования: изометрия (а, в); вид сверху (б, г)

CAD-модель повторяет все структурные особенности исходного объекта, в том числе отклонения геометрии трубки от правильной формы цилиндра. На следующем этапе в пакете SolidWorks преобразовали модель таким образом, чтобы все узлы сетки располагались на поверхности цилиндра с заданным диаметром 50 мм (рис. 3 в, г).

Преобразованную модель использовали для оценки количества дефектов элементов сетки. Всего модель включает 1090 узлов, объединенных перемычками, и 519 ячеек. Установлено, что модель, кроме стандартных шестиугольных ячеек (80,0 %), также включает четырехугольные (0,5 %), пятиугольные (16,8 %), семиугольные (2,5 %) и восьмиугольные (0,2 %) ячейки. При этом узлы решетки соединяются тремя (97 % случаев) или четырьмя (3 % случаев) перемычками. Модель с указанием распределения дефектов представлена на рис. 3 в.

В качестве объекта сравнения, обладающего периодической структурой, в пакете SolidWorks была спроектирована модель с идеальной сетчатой структурой, состоящая из одинаковых шестиугольников. Перемычки также были оформлены цилиндрами диаметром 0,1 мм, узлы – сферами диаметром 0,5 мм (рис. 4).

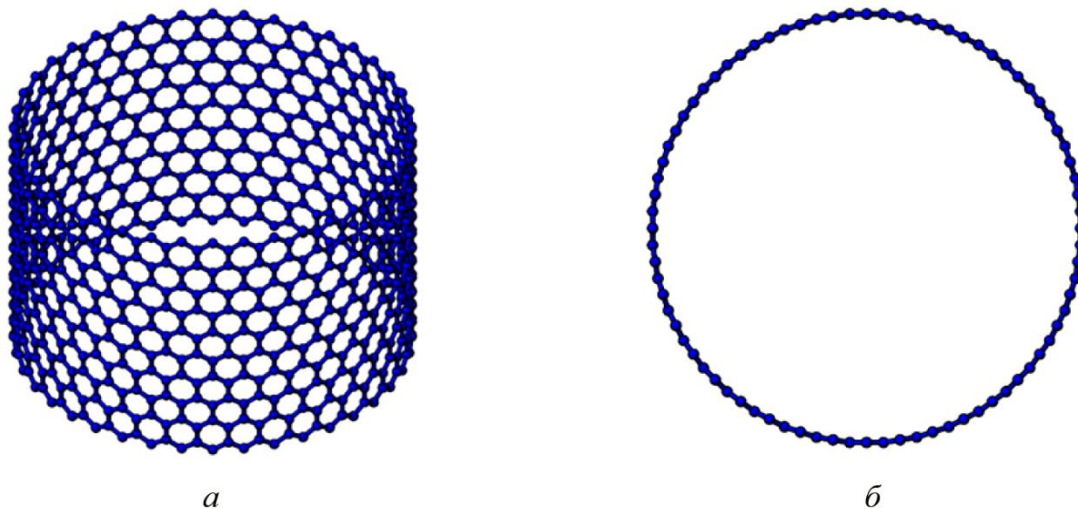


Рис. 4. CAD-модель объекта с периодической структурой: изометрия (а); вид сверху (б)

Исследование микроструктуры скелета морской губки *Aphrocallistes* выполнено с помощью растрового электронного микроскопа Auriga CrossBeam и микротомографа марки Zeiss Xradia Versa 520.

Механическое нагружение по схеме одноосного сжатия выполняли на электромеханической испытательной машине УТС 111.2-100-52 с использованием центрирующей оснастки для исключения возможной потери устойчивости конструкции, связанной с соотношением толщины стенки и высоты образца. Скорость нагружения составляла 1 мм/с. В процессе нагружения регистрировали усилие и перемещение. Для анализа стадийности процесса разрушения производили фотовидеофиксацию на всем протяжении испытания. Критерием полного разрушения являлось разрушение предпоследнего горизонтального ряда ячейистой структуры.

3. Результаты и обсуждение

Наиболее информативной количественной характеристикой для оценки энергоёмкости процесса разрушения, а следовательно, сопротивления разрушению, является работа разрушения. Для оценки сопротивления разрушению исследуемых структур проведены испытания на одноосное сжатие. Полученные результаты анализировали согласно следующим критериям. Первым критерием для оценки несущей способности конструкций с периодической и квазипериодической структурой являлась эффективная работа (A_{eff}), необходимая для разрушения объекта на первом акте деформирования, то есть перед снижением его характеристик до заданного уровня. Заданным уровнем на первом акте деформирования является достижение первого минимума при разрушении (рис. 5). Применительно к особенностям разрушения пространственных конструкций, например металлических образцов с ячейистой

строением, величина напряжения σ_{pl} характеризует резкое падение нагрузки после участка упругой деформации [4, 16]. Определение величины σ_{pl} выполнялось по аналогии с рекомендациями стандарта ISO 13314:2011 Mechanical testing of metals, ductility testing, compression test for porous and cellular metals. После резкого падения следует участок плато, напряжения на котором изменяются скачкообразно в результате пластической деформации и «схлопывания» отдельных ячеек. Стоит отметить, что первый акт разрушения не связан с переходом деформации конструкции из упругой области в пластическую. А применительно к рассматриваемой архитектуре образца подобные акты могут повторяться многократно. Исходя из этого, вторым критерием выбрали работу (A), затраченную на полное разрушение образцов (рис. 6, 7). Полную (A) и эффективную (A_{eff}) работы оценивали по диаграммам в координатах «усилие F (Н) и перемещение Δl (мм)».

Из анализа полученных данных установлено, что у образца с квазипериодической структурой эффективная работа на 24 % превышает работу разрушения образца с периодической структурой. Таким образом, образцы с квазипериодической структурой обладают более высокими показателями сопротивления разрушению до достижения первого минимума усилия (указаны стрелками на рис. 6 и 7 соответственно), т. е. на первом акте разрушения.

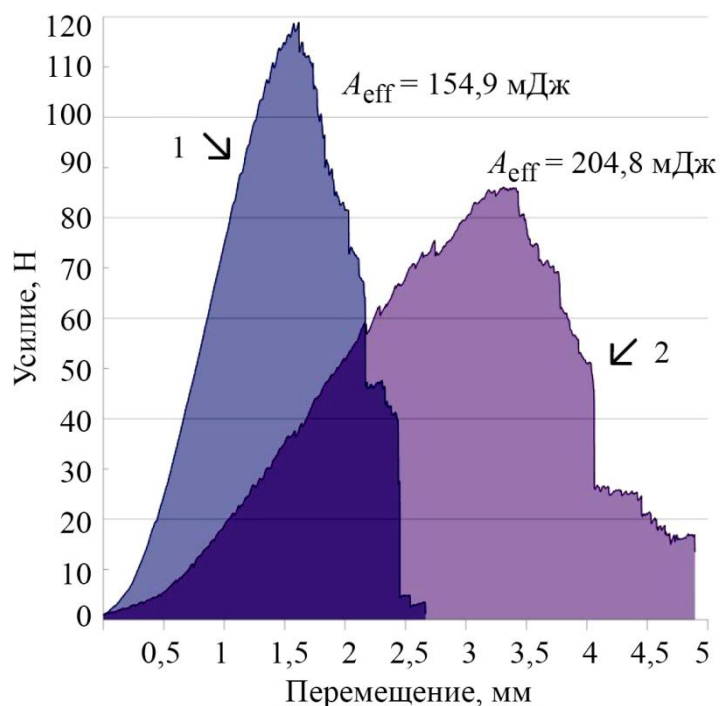


Рис. 5. Эффективная работа разрушения периодической (1) и квазипериодической (2) структур

В то же время работа, затраченная на полное разрушение образцов, практически одинакова для обеих рассмотренных структур. Однако результаты наблюдения за кинетикой разрушения с помощью фотовидеофиксации свидетельствуют о том, что характер разрушения образцов с периодической и квазипериодической структурами существенно различается (рис. 8).

С точки зрения кинетики разрушения, то есть последовательности разрушения отдельных составляющих, элементарным актом разрушения является полное разрушение перемычки, часто вблизи стыка с узлом. Для образца с периодической структурой характерно формирование кольцевых «магистральных трещин» с последующим отделением кольцевых фрагментов. У образца с квазипериодической структурой наблюдается случайный характер

разрушения, в котором затруднительно выделить преимущественное направление распространения трещины. При одинаковой суммарной энергоёмкости процесса у образца с периодической структурой происходит резкий спад нагрузки до значений, близких к 0 («выход из строя» целого ряда ячеек), в то время как у образца с квазипериодической структурой процесс разрушения проходит более монотонно (меньшая величина падения усилия). Сопоставляя полученные результаты с особенностями разрушения ячеистых структур, упомянутых выше, можно видеть, что величина σ_{pl} для образцов с регулярной структурой будет значительно ниже [4].

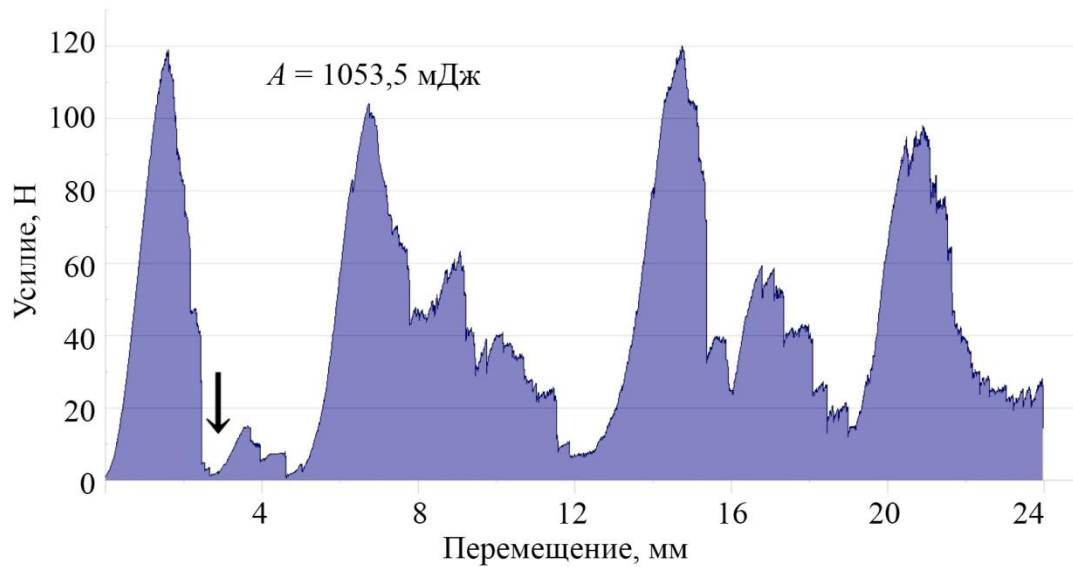


Рис. 6. Полная работа разрушения периодической структуры

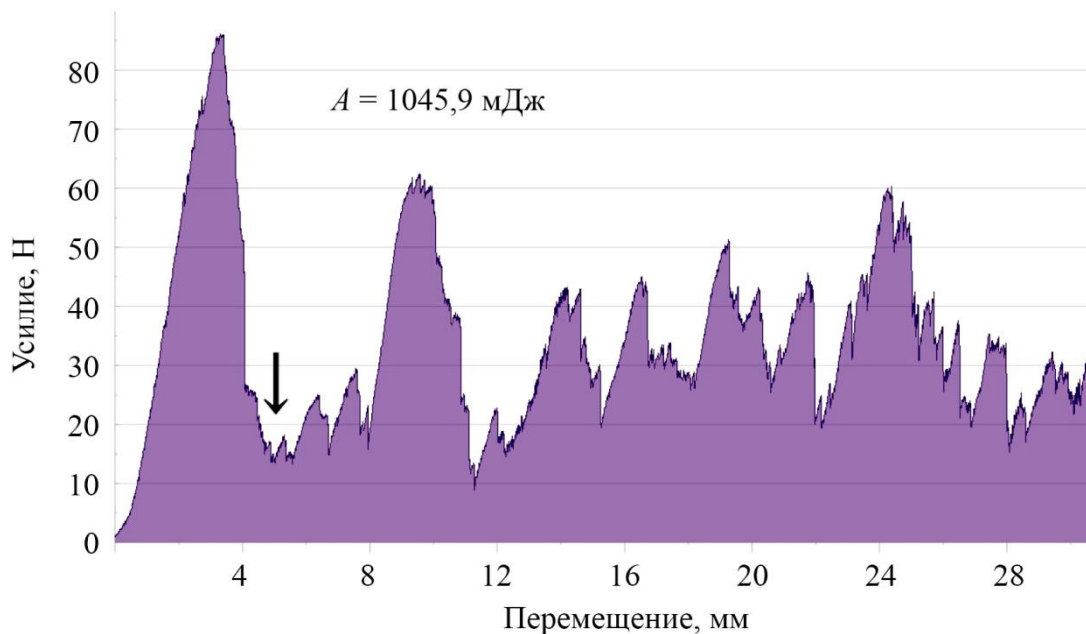


Рис. 7. Полная работа разрушения квазипериодической структуры

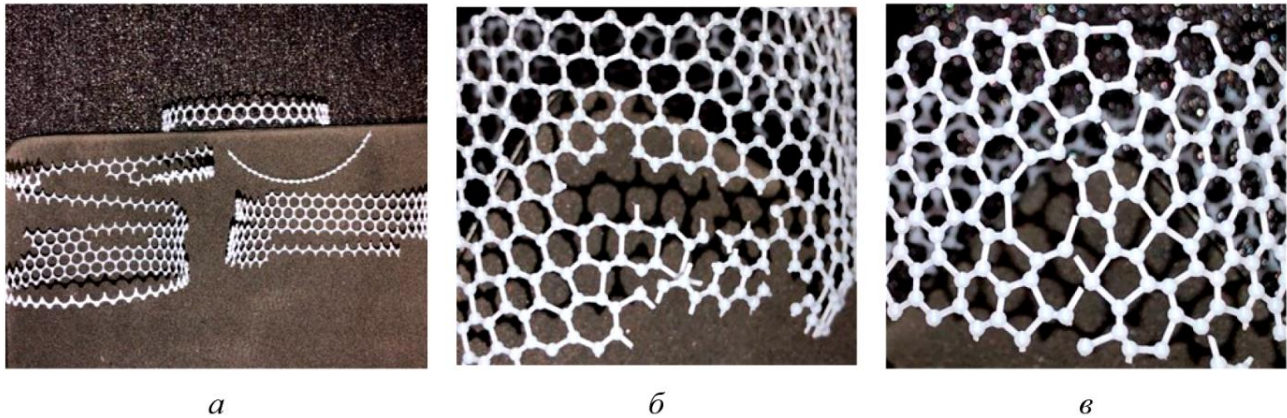


Рис. 8. Фотографии образцов с периодической (а) и квазипериодической (б, в) структурами после испытаний

Таким образом, можно предположить, что образец, построенный на основе принципов биомимикрии, обладает большей «живучестью», несущей способностью и энергоемкостью разрушения по сравнению с образцом с периодической структурой. При этом повышение «живучести» связано в первую очередь с характером разрушения образца как конструкции. Следовательно, важными параметрами, которые могут характеризовать повышенное сопротивление разрушению в условиях статического нагружения, являются предельное количество узлов структуры, вблизи которых произошло разрушение, и плотность распределения разрушенных узлов на поверхности объекта. Так, для образца с периодической структурой первый акт разрушения характеризуется магистральным выходом из строя перемычек между узлами по всему периметру, т. е. имеет место одномерное последовательное кольцевое разрушение. Для образцов с квазипериодической структурой характерно двумерное разрушение, т. е. для значительного снижения несущей способности объекта требуется разрушение большего количества перемычек между узлами на единицу площади, а следовательно, большая плотность разрушенных элементов.

4. Заключение

Результаты проведенных исследований сетчатых конструкций с периодической и квазипериодической структурами, статически нагружаемых по схеме одноосного сжатия, демонстрируют увеличение эффективной работы, затрачиваемой на разрушение на первом акте разрушения, на 24 % для структур, имеющих в своем строении неидеальные составляющие. Неидеальные элементы в работе представлены строением элементарных составляющих, отличающихся от гексагонов углом между сторонами, размером ячеек, а также формой этих ячеек.

Анализ кинетики разрушения позволил установить элементарные акты разрушения сетчатых конструкций. Так, для образцов с периодической структурой характерно формирование кольцевых «магистральных трещин» с последующим отделением кольцевых фрагментов. Для образцов с квазипериодической структурой свойственен случайный характер разрушения, в котором затруднительно выделить преимущественное направление распространения трещины. При одинаковой суммарной энергоемкости процесса у образца с периодической структурой происходит резкий спад нагрузки до значений, близких к 0 («выход из строя» целого ряда), в то время как у образца с квазипериодической структурой процесс разрушения проходит более монотонно (меньшая разность в усилиях).

На основе экспериментальных результатов сделано предположение о том, что построение сетчатой конструкции на основе принципов биомимикрии позволяет создавать объекты, обладающие большей «живучестью» и энергоемкостью разрушения. Повышение характери-

стик сопротивления разрушению связано с характером разрушения образца как конструкции. Важным результатом проведенных исследований является формулирование количественного параметра, представленного в виде предельной плотности разрушенных связей, необходимых для потери несущей способности объекта. Данный параметр может характеризовать повышенное сопротивление разрушению в условиях статического нагружения подобных конструкций с ячеистым строением.

Литература

1. Wang Z. Recent advances in novel metallic honeycomb structure // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 166. – P. 731–741. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.02.011.
2. Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures / P. Płatek, M. Kuciewicz, P. Baranowski, J. Małachowski, A. Popławski // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 142. – P. 177–189. – DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.028.
3. Xiao L., Song W. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: experiments // *International Journal of Impact Engineering*. – 2018. – Vol. 111. – P. 255–272. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.09.018.
4. Fracture behavior of Ti-6-4 cellular structures obtained by selective laser melting / I. S. Kamantsev, Yu. N. Loginov, S. V. Belikov, S. I. Stepanov, M. S. Karabanalov, A. I. Golodnov // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2020. – Iss. 4. – P. 35–47. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.4.035-047. – URL: http://dream-journal.org/issues/content/article_294.html
5. Akhmetshin L. R., Smolin I. Yu. Influence of unit cell parameters of tetrachiral mechanical metamaterial on its effective properties // *Nanoscience and Technology*. – 2020. – Vol. 11 (3). – DOI:10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033737.
6. Eidini M. Zigzag-base folded sheet cellular mechanical metamaterials // *Extreme Mechanics Letters*. – 2016. – Vol. 6. – P. 96–102. – DOI: 10.1016/j.eml.2015.12.006.
7. Hu L. L., Yu T. X. Dynamic crushing strength of hexagonal honeycombs // *International Journal of Impact Engineering*. – 2010. – Vol. 37, No. 5. – P. 467–474. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.12.001.
8. The topological design of multifunctional cellular metals / A. G. Evans, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck, M. F. Ashby, H. N. G. Wadley // *Progress in Materials Science*. – 2001. – Vol. 46, Nos. 3–4. – P. 309–327. – DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00016-5.
9. Sun F., Lai C., Fan H. In-plane compression behavior and energy absorption of hierarchical triangular lattice structures // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 100. – P. 280–290. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.023.
10. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting / C. Yan, L. Hao, A. Hussein, D. Raymont // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2012. – Vol. 62. – P. 32–38. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002.
11. Liu Y., Zhang X.-C. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs // *International Journal of Impact Engineering*. – 2009. – Vol. 36. – P. 98–109. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.03.001.
12. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II- ‘shock’ theory and comparison with experimental data and numerical models / P. J. Tan, S. R. Reid, J. J. Harrigan, Z. Zou, S. Li // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2005. – Vol. 53 (10). – P. 2206–2230. – DOI: 10.1016/j.jmps.2005.05.003.
13. Ajdari A., Nayeb-Hashemi H., Vaziri A. Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures // *International Journal of Solids and Structures*. – 2011. – Vol. 48 (3–4). – P. 506–516. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.10.018.
14. Progress in modern marine biomaterials research / Y. Khrunyk, S. Lach, I. Petrenko, H. Ehrlich // *Marine Drugs*. – 2020. – Vol. 18 (12). – P. 589. – DOI: 10.3390/md18120589.

15. Honeycomb biosilica in sponges: from understanding principles of unique hierarchical organization to assessing biomimetic potential / A. Voronkina, E. Romanczuk-Ruszk, R. E. Przekop, P. Lipowicz, E. Gabriel, K. Heimler, A. Rogoll, C. Vogt, M. Frydrych, P. Wienclaw, A. L. Stelling, K. Tabachnick, D. Tsurkan, H. Ehrlich // *Biomimetics*. – 2023. – Vol. 8 (2). – P. 234. – DOI: 10.3390/biomimetics8020234.
16. Gibson L., Ashby M. *Cellular Solids. Structure and Properties*. – 2nd ed. – Cambridge Solid State Science Series. – Cambridge : Cambridge University Press, 1997. – 532 p.