

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ PLA ПЛАСТИКА ПРИ ПРОБИВАНИИ ЖЕСТКИМ УДАРНИКОМ

© 2024 г. С. Ю. Иванова^а, К. Ю. Осипенко^а,
Н. В. Баничук^а, Д. С. Лисовенко^{а, *}

^аИнститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
*e-mail: lisovenk@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 02.06.2024 г.

После доработки 28.06.2024 г.

Принята к публикации 30.06.2024 г.

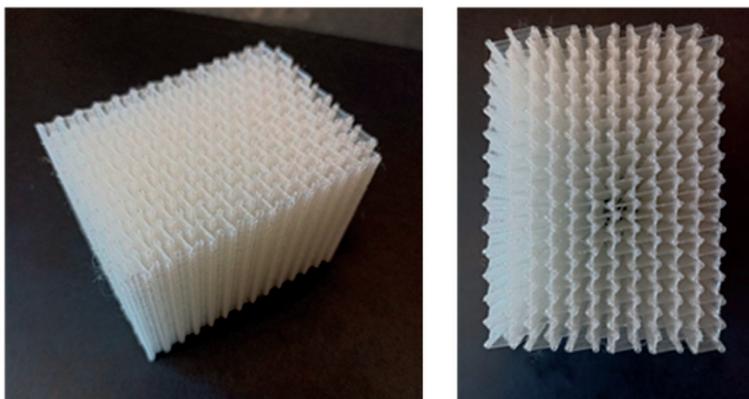
Экспериментально изучались механические свойства метаматериалов, имеющих различную ячеистую внутреннюю структуру, при пробивании по нормали жестким сферическим ударником. На 3D-принтере из e-PLA пластика были изготовлены ауксетические и неауксетические образцы метаматериалов, имеющие хиральную структуру из ячеек, соответственно, в форме вогнутых или выпуклых шестиугольников. На основе проведенных экспериментов по пробиванию сравнивались свойства хиральных ауксетических и неауксетических образцов одинаковой массы для случаев, когда внутри ячеек находился воздух и когда ячейки были заполнены желатином. Относительная потеря кинетической энергии ударника при пробивании заполненных желатином образцов была существенно выше для ауксетического метаматериала, чем для неауксетика. Для незаполненных (“воздушных”) образцов относительная потеря кинетической энергии была незначительно выше у неауксетика.

Ключевые слова: метаматериалы, ауксетики, экспериментальные исследования, проникание, пробивание, жесткие ударники

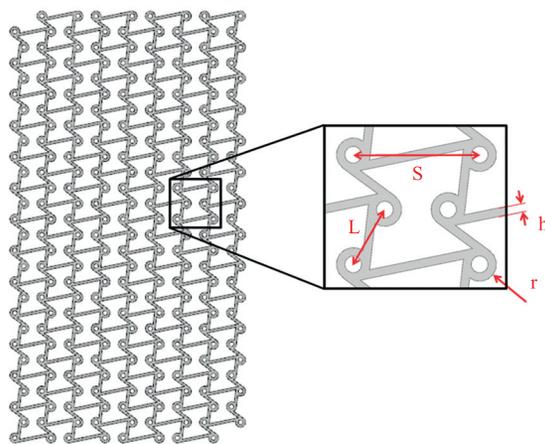
DOI: 10.31857/S1026351924040146 EDN: UCEOZU

Данная работа посвящена продолжению экспериментальных исследований механических свойств создаваемых метаматериалов с ячеистой структурой из металла [1] или e-PLA пластика [2] при пробивании жестким сферическим ударником. На 3D-принтере из e-PLA пластика были изготовлены ауксетические (АС) и неауксетические образцы метаматериалов, имеющие хиральную структуру из ячеек, соответственно, в форме вогнутых или выпуклых шестиугольников (рис. 1а–г). В отличие от обычных материалов с положительным коэффициентом Пуассона для ауксетических материалов сжатие в одном (например, продольном) направлении приводит не к растяжению, а к сжатию также и в другом (поперечном) направлении [3–9].

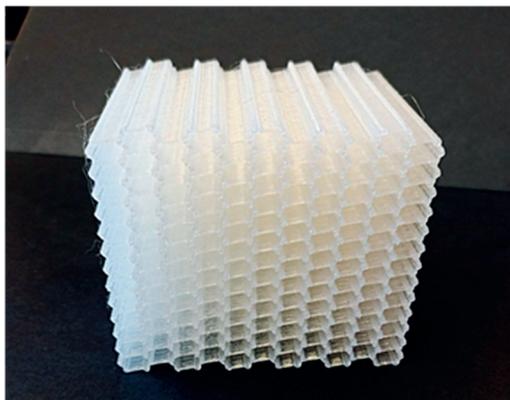
(a)



(b)



(c)



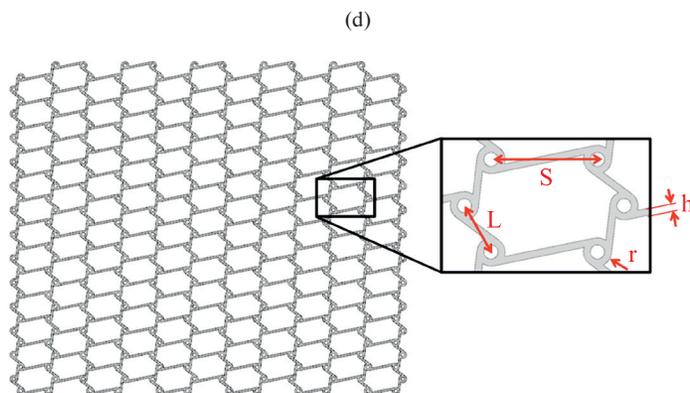


Рис. 1. Образцы метаматериалов и их внутренняя хиральная структура: а), б) – ауксетические; в), г) – неауксетические. На рис. (б) и (г) $S=6$ мм, $L=3$ мм, $h=0.4$ мм, $r=0.8$ мм.

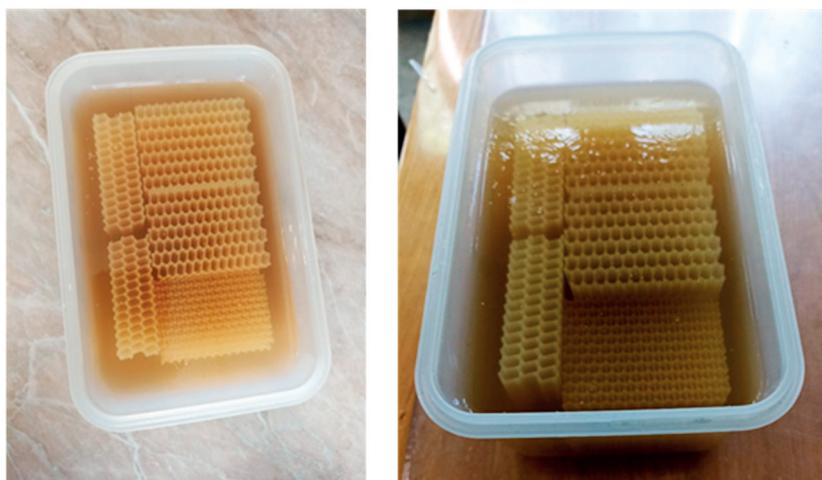


Рис. 2. Подготовленные образцы, заполненные желатином.

Целью проведенных исследований было изучить влияние ауксетических свойств рассматриваемых образцов метаматериалов на относительную потерю кинетической энергии ударника по сравнению с неауксетическими образцами той же массы. При этом наряду с образцами, ячейки которых были заполнены воздухом, испытывались образцы, заполненные пищевым желатином (см. рис. 2).

Для рассматриваемых хиральных структур проверялась установленная в работе [2] для хиральной звездчатой структуры (hexachirals honeycomb) возможность отклонения направления движения ударника после пробивания от подлетного направления.

Пробивание образцов осуществлялось стальным сферическим ударником, имеющим диаметр 10 мм и массу 4.06 г. Образцы устанавливались на

Таблица 1. Толщина и масса образцов с воздушным заполнением ячеек, значения скорости входа и выхода ударника для каждого образца

Номер эксперимента	Рисунок	Структура образца	Толщина H , мм	Масса m , г	Скорость входа v_1 , м/с	Скорость выхода v_2 , м/с
1	1(б)	ауксетик, 5 слоев	25	38.4	146.7	124
2	1(б)	ауксетик, 5 слоев	25	39.4	141	115
3	1(г)	неауксетик, 5 слоев	40.5	41.3	147	118.5
4	1(г)	неауксетик, 5 слоев	40.5	41.4	150	124.5
5	1(б)	ауксетик, 8 слоев	38.5	62	154.5	112.5
6	1(б)	ауксетик, 8 слоев	38.5	61.7	150	108
7	1(г)	неауксетик, 8 слоев	62.5	66.9	152.1	105
8	1(г)	неауксетик, 8 слоев	62.5	66.5	139.3	97.5
9	1(г)	ауксетик, 11 слоев	52	79.6	153.8	100.5
10	1(г)	ауксетик, 11 слоев	52	80.2	150	98
11	1(б)	ауксетик, 11 слоев	52	83.6	150	92.5
12	1(г)	неауксетик, 11 слоев	85	84	150	84
13	1(г)	неауксетик, 11 слоев	85	88.8	145	87

экспериментальном стенде и жестко закреплялись так, чтобы боковая поверхность была перпендикулярна направлению движения ударника, который разгонялся пневматической пушкой. Давление в камере пушки выставлялось таким образом, чтобы скорость вылета ударника составляла приблизительно 150 м/с. Скорость ударника на вылете из ствола пушки принималась за скорость входа в преграду (v_1), сопротивлением воздуха движению тела можно было пренебречь в силу небольших размеров экспериментальной установки. Скорость входа измерялась с помощью оптического рамочного хронографа ИБХ-АСС-0021 "Стрелец" и осциллографа. Скорость ударника на выходе из преграды (v_2) определялась с помощью высокоскоростной видеокамеры FASTCAM mini AX200, на которую записывался весь процесс пробивания. Камера размещалась таким образом, что на видеозаписи ударник пробивает образец, двигаясь справа налево. Боковая сторона образцов, которая

Таблица 2. Толщина и масса образцов с заполнением ячеек желатином, значения скорости входа и выхода ударника для каждого образца

Номер эксперимента	Рисунок	Структура образца	Толщина H , мм	Масса m , г	Скорость входа v_1 , м/с	Скорость выхода v_2 , м/с
14	1(б)	ауксетик, 5 слоев	25	130.1	147	103.3
15	1(б)	ауксетик, 5 слоев	25	137.9	148.3	102
16	1(г)	неауксетик, 3 слоя	25	133.6	150	113.2
17	1(г)	неауксетик, 3 слоя	25	131.6	150	118.8
18	1(б)	ауксетик, 8 слоев	38.5	205.7	159	78
19	1(б)	ауксетик, 8 слоев	38.5	211	153	66
20	1(б)	ауксетик, 8 слоев	38.5	206	156	67.5
21	1(г)	неауксетик, 5 слоев	40.5	215.2	150	96
22	1(г)	неауксетик, 5 слоев	40.5	211	144	90
23	1(б)	ауксетик, 11 слоев	52	280	150	31.4
24	1(б)	ауксетик, 11 слоев	52	269.5	150.2	33.8
25	1(б)	ауксетик, 11 слоев	52	269.5	153	30.8
26	1(б)	ауксетик, 11 слоев	52	276.5	153	45.8
27	1(г)	неауксетик, 7 слоев	55	285.5	147	60
28	1(г)	неауксетик, 7 слоев	55	280	156.6	48
29	1(г)	неауксетик, 7 слоев	55	278	153.3	50.3

подвергалась удару, во всех случаях имела размеры $\sim 70 \times 72$ мм. Результаты экспериментов приведены в табл. 1 (заполнение ячеек – воздух) и табл. 2 (заполнение – желатин).

На рис. 3, а представлена зависимость относительной потери кинетической энергии ударника $\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$ (%) от массы m [г] пробиваемых образцов. Для наглядности добавлены линейные линии тренда для АС-образцов (синяя) и неауксетиков (красная). Видно, что линии тренда проходят очень

близко, при этом сотовые неауксетические образцы чуть лучше сопротивляются пробиванию. Были также подготовлены и испытаны ауксетические и неауксетические образцы, заполненные желатином (из расчета 50 г желатина на 500 г воды) и примерно равные по массе. Экспериментальные зависимости величины δ от m для ауксетических и неауксетических структур с желатиновым наполнением приведены на рис. 3, б и показывают, что АС-образцы в данном случае существенно эффективнее неауксетических образцов.

В условиях проведенных экспериментов отклонение направления движения ударника после пробивания образцов с рассматриваемым видом хиральности (в отличие от хиральных звездчатых структур (hexachirals honeycomb) из работы [2]) было незначительным или (в большинстве случаев) не наблюдалось совсем.

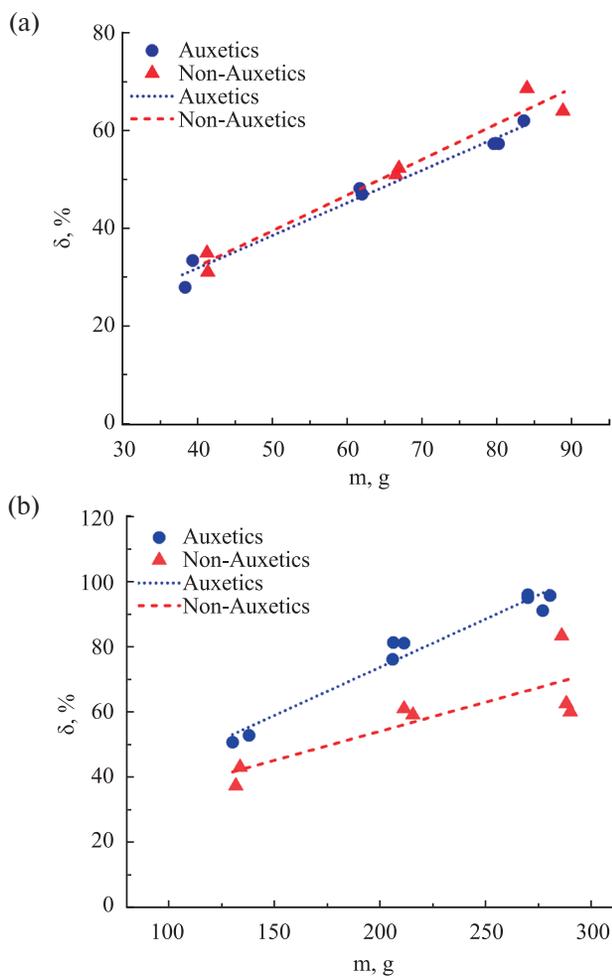


Рис. 3. Зависимость относительной потери кинетической энергии ударника δ [%] от массы m [г] пробиваемых образцов: с заполнением ячеек воздухом (а) и желатином (б).

Заключение. Проведенные эксперименты показали лучшую сопротивляемость заполненных желатином хиральных АС-образцов из e-PLA пластика по сравнению с неауксетическими при пробивании жестким сферическим телом. Для АС-образцов из пластика с воздухом в ячейках вышеописанный (и установленный ранее для металлических структур в работе [1]) эффект не наблюдался. Это, возможно, связано с особенностями разрушения более хрупкого пластика, по сравнению с металлом, и может быть предметом для дальнейшего изучения.

Работа выполнена по темам госзадания (номера госрегистрации 124012500437-9, 124013000674-0). Авторы выражают благодарность А.И. Демину за помощь в подготовке 3D-моделей образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванова С.Ю., Осипенко К.Ю., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Баничук Н.В., Лисовенко Д.С.* Экспериментальное исследование свойств ауксетических и неауксетических метаматериалов из металла при проникании в них жестких ударников // Изв. РАН. МТТ. 2023. № 2. С. 176–180.
<https://doi.org/10.31857/S0572329922600773>
2. *Иванова С.Ю., Осипенко К.Ю., Демин А.И., Баничук Н.В., Лисовенко Д.С.* Изучение свойств метаматериалов с отрицательным коэффициентом Пуассона при пробивании жестким ударником // Изв. РАН. МТТ. 2023. № 5. С. 120–130.
<https://doi.org/10.31857/S0572329923600366>
3. *Lim T.-C.* Auxetic Materials and Structures. Singapore: Springer, 2015.
<http://doi.org/10.1007/978-981-287-275-3>
4. *Kolken H.M.A., Zadpoor A.A.* Auxetic Mechanical Metamaterials // RSC Adv. 2017. V. 7. № 9. P. 5111–5129.
<http://doi.org/10.1039/C6RA27333E>
5. *Ren X., Das R., Tran P., et al.* Auxetic Metamaterials and Structures: A Review // Smart Mater. Struct. 2018. V. 27. № 2. P. 023001.
<https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>
6. *Wu W., Hu W., Qian G. et al.* Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review // Mater. Des. 2019. V. 180. P. 107950.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950>
7. *Городцов В.А. Лисовенко Д.С.* Ауксетики среди материалов с кубической анизотропией // Изв. РАН. МТТ. 2020. № 4. С. 7–24.
<https://doi.org/10.31857/S0572329920040054>
8. *Шутикова М.В.* Обзор вязкоупругих моделей с операторами дробного порядка, используемых в динамических задачах механики твердого тела // Изв. РАН. МТТ. 2022. № 1. С. 3–40.
<http://doi.org/10.31857/S0572329921060118>
9. *Gao Y., Huang H.* Energy absorption and gradient of hybrid honeycomb structure with negative Poisson's ratio // Mech. Solids. 2022. V. 57. № 5. P.1118–1133.
<http://doi.org/10.3103/S0025654422050053>

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROPERTIES OF METAMATERIALS BASED ON PLA PLASTIC WHEN PERFORATED BY A RIGID STRIKER

S. Yu. Ivanova^a, K. Yu. Osipenko^a, N. V. Banichuk^a, D. S. Lisovenko^a, *

^a*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: lisovenk@ipmnet.ru*

Abstract – The mechanical properties of metamaterials with different cellular internal structures were experimentally studied when perforated along the normal by a rigid spherical striker. Auxetic and non-auxetic samples of metamaterials with a chiral structure of cells, respectively, in the form of concave or convex hexagons, were produced using a 3D printer from e-PLA plastic. Based on the penetration experiments, the properties of chiral auxetic and non-auxetic samples of the same mass were compared for the cases when there was air inside the cells and when the cells were filled with gelatin. The relative loss of kinetic energy of the striker when perforating gelatin-filled samples was significantly higher for the auxetic metamaterial than for the non-auxetic one. For unfilled (“air”) samples, the relative loss of kinetic energy was slightly higher for the nonauxetic.

Keywords: metamaterials, auxetics, experimental studies, penetration, perforation, rigid strikers

REFERENCES

1. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Kuznetsov V.A., Solovyov N.G., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* Experimental investigation of the properties of auxetic and non-auxetic metamaterials made of metal during penetration of rigid strikers // *Mech. Solids*. 2023. V. 58. № 2. P. 524–528.
<https://doi.org/10.3103/S0025654422601616>
2. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Demin A.I., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* Studying the properties of metamaterials with a negative Poisson’s ratio when punched by a rigid impactor // *Mech. Solids*. 2023. V. 58. № 5. P. 1536–1544.
<https://doi.org/10.3103/S0025654423600897>
3. *Lim T.-C.* Auxetic Materials and Structures. Singapore: Springer, 2015.
<http://doi.org/10.1007/978-981-287-275-3>
4. *Kolken H.M.A., Zadpoor A.A.* Auxetic Mechanical Metamaterials // *RSC Adv*. 2017. V. 7. № 9. P. 5111–5129.
<http://doi.org/10.1039/C6RA27333E>
5. *Ren X., Das R., Tran P., et al.* Auxetic Metamaterials and Structures: A Review // *Smart Mater. Struct*. 2018. V. 27. № 2. P. 023001.
<https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>
6. *Wu W., Hu W., Qian G. et al.* Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review // *Mater. Des*. 2019. V. 180. P. 107950.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950>
7. *Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S.* Auxetics among materials with cubic anisotropy // *Mech. Solids*. 2020. V. 55. № 4. P. 461–474.
<https://doi.org/10.3103/S0025654420040044>
8. *Shitikova M.V.* Fractional operator viscoelastic models in dynamic problems of mechanics of solids: A Review // *Mech. Solids*. 2022. V. 57. № 1. P. 1–33.
<http://doi.org/10.3103/S0025654422010022>
9. *Gao Y., Huang H.* Energy absorption and gradient of hybrid honeycomb structure with negative Poisson’s ratio // *Mech. Solids*. 2022. V. 57. № 5. P. 1118–1133.
<http://doi.org/10.3103/S0025654422050053>