

УДК 539.3

О ВЛИЯНИИ ХИРАЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ АУКСЕТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОБИВАНИЮ УДАРНИКОМ

© 2025 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

*E-mail: lisovenk@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 30.01.2025 г.

После доработки 17.02.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

Экспериментально исследовались свойства метаматериалов с отрицательным коэффициентом Пуассона (с ауксетической структурой на основе ячейки в виде вогнутого шестиугольника) сопротивляться пробиванию по нормали жестким сферическим ударником. С помощью 3D-принтера из гибкого термопластичного полиуретана TPU 95A пластика и жесткого e-PLA-пластика были изготовлены одинаковые по массе образцы с хиральной и нехиральной структурой, которые сравнивались по способности снижать кинетическую энергию ударников на скорости около 190 м/с. Было установлено, что хиральность структуры образцов (как для TPU, так и для PLA-пластиков) приводит к усилению их защитных свойств. Однако, при повороте структуры образцов на 90° лучшее сопротивление пробиванию оказывали образцы без хиральности. По результатам проведенной серии экспериментов с TPU и PLA образцами самыми эффективными по сопротивлению пробиванию ударником оказались ауксетики из термопластичного полиуретана, с развернутой на 90° нехиральной структурой.

Ключевые слова: метаматериалы, ауксетики, хиральные структуры, экспериментальные исследования, пробивание, жесткие ударники

DOI: 10.31857/S1026351925030157, **EDN:** BBTLSK

Литература по исследованию ауксетиков (материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона) достаточно обширна, ссылки на работы в данном направлении можно найти, например, в работах [1–9]. Важная роль отводится искусственно создаваемым метаматериалам, которые могут быть использованы при проектировании ударо- и энергопоглощающих конструкций [10–28]. В работе [28] рассматривалось проникновение жесткого ударника в изогнутые сэндвич-панели, заполненные полиуретаном или напечатанной из PLA ауксетической структурой с ячейкой в виде вогнутого шестиугольника. Авторы в экспериментах с шестью образцами

использовали жесткий стальной ударник радиусом 5 мм, который налетал со скоростью 100 м/с. В результате было продемонстрировано, что глубина проникновения ударника меньше для изогнутых сэндвич-панелей, которые содержат ауксетическую структуру (от 15.9 до 16.2 мм). Глубина проникновения в изогнутые сэндвич-панели, заполненные полиуретаном, находилась в диапазоне от 23.15 до 36.35 мм.

Данная работа является продолжением исследований механических свойств ауксетических метаматериалов, внутренняя структура которых состоит из ячеек на основе вогнутого шестиугольника [12–16]. В работах [13, 14] был сделан вывод о том, что наличие хиральности ячеек ауксетических образцов, изготовленных на 3D-принтере из e-PLA-пластика, приводило к увеличению способности данных образцов сопротивляться пробиванию сферическим ударником, по сравнению с нехиральными образцами. В последующих работах [15, 16] метаматериалы с хиральной внутренней структурой исследовались более детально. В работе [15] изучалось влияние температуры на механические свойства метаматериалов из термопластичного полиуретана (TPU 95A пластика) с ауксетическими и неауксетическими свойствами. В отличие от жесткого PLA-пластика, TPU 95A пластик обладает гибкостью, которая допускает значительные деформации образцов при их пробивании ударником. Оказалось, что образцы метаматериалов из TPU 95A пластика оказывают значительно большее сопротивление при пробивании ударниками, чем метаматериалы из PLA-пластика. В [16] было установлено, что заполнение желатином ауксетических хиральных образцов из TPU 95A пластика (в отличие от исследованных ранее в работах [12–14] жестких метаматериалов на основе PLA-пластика) не приводит к усилению защитных свойств. По результатам проведенных экспериментов для двух скоростных режимов самыми эффективными по сопротивлению пробиванию ударником оказались гибкие и легкие образцы из термопластичного полиуретана, заполненные воздухом.

Цель представленных в данной работе исследований заключается в определении влияния хиральности структуры из TPU 95A и PLA-пластиков на сопротивляемость внедрению жестких ударников. При этом для ауксетических образцов с хиральной и нехиральной структурой на основе вогнутого шестиугольника предполагалось также изучить влияние поворота внутренней структуры образцов на 90° .

Для проведения экспериментов с помощью 3D-принтера были изготовлены ауксетические хиральные образцы из TPU 95A и PLA-пластиков на основе 3D-модели, примененной ранее в работах [12–16] (см. рис. 1). Были также изготовлены из TPU 95A и PLA-пластиков близкие по массе ауксетические образцы без хиральности (рис. 2). Образцы закреплялись в штативе и простреливались стальным сферическим ударником на скорости ~ 190 м/с по нормали к боковой поверхности, имеющей для хиральных образцов размеры 70×71 мм и для образцов без хиральности – 70×73 мм. Температура образцов была $\sim 16 \div 17^\circ\text{C}$. Ударник массой 4.06 г и диаметром 10 мм разогнался пневматической пушкой и входил без вращения в преграду. Скорость входа ударника измерялась с помощью оптического рамочного хронографа ИБХ-АСС-0021 “Стрелец”, а также с помощью высокоскоростной видеокамеры FASTCAM

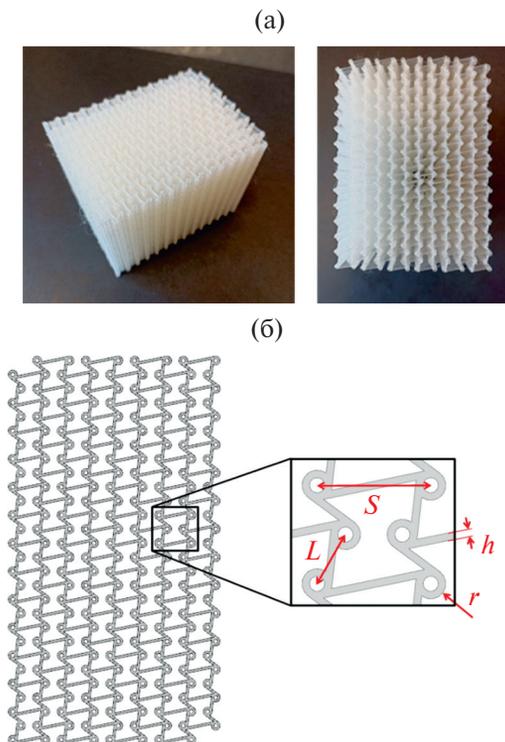


Рис. 1. Ауксетический хиральный образец: (а) напечатанный на 3D принтере образец из e-PLA-пластика; (б) 3D-модель: $S=6$ мм, $L=3$ мм, $h=0.4$ мм, $r=0.8$ мм.

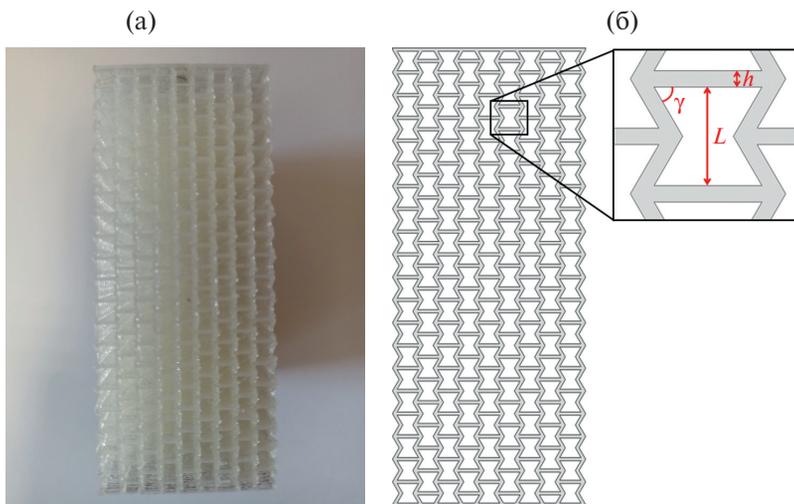


Рис. 2. Ауксетический образец без хиральности: (а) напечатанный на 3D-принтере образец из e-PLA-пластика; (б) 3D-модель: $L=3$ мм, $h=0.5$ мм, $\gamma=60^\circ$.

mini AX200, на которую записывался процесс пробивания образца. Камера применялась также для определения скорости вылета ударника из преграды.

В табл. 1 приведены результаты серии экспериментов с хиральными и нехиральными образцами из TPU 95A пластика. По аналогии, данные для PLA-образцов приводятся в табл. 2.

Таблица 1. Пробивание хиральных и нехиральных ауксетических образцов из TPU 95A пластика (результаты экспериментов)

Номер эксперимента/образца	Хиральность структуры (да/нет)	Кол-во слоев/масса, г	Скорость входа ударника v_1 , м/с	Скорость выхода ударника v_2 , м/с	$\delta = \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{v_1^2}, \%$
98/94	да	5/40	187.5	146.5	39.8
101/97	да	5/41.7	192	145.5	42.6
75/72	да	8/66.7	196.7	121.5	61.8
127/113	да	8/67.4	190.5	124.5	57.3
139/125	да	11/85.1	195	107.3	69.7
97/93	да	11/83	191.3	105	69.9
215/203	нет	6/44.5	193.3	148.9	40.7
217/205	нет	6/44.9	193.3	150	39.8
222/210	нет	9/65.4	192.3	137.5	48.9
224/212	нет	9/65.1	193.3	132.5	53
227/215	нет	9/67	191.7	133.8	51.3
216/204	нет	12/85.8	193.3	110	67.6
221/209	нет	12/87.8	193.3	110	67.6
223/211	нет	12/87.3	191.7	112.5	65.6

Таблица 2. Пробивание хиральных и нехиральных ауксетических образцов из PLA-пластика (результаты экспериментов)

Номер эксперимента/образца	Хиральность структуры (да/нет)	Кол-во слоев/масса, г	Скорость входа ударника v_1 , м/с	Скорость выхода ударника v_2 , м/с	$\delta = \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{v_1^2}, \%$
191/179	да	5/45.8	191.3	156	33.5
196/184	да	5/45.7	193.5	161.3	30.5
194/182	да	8/70.1	192	143.3	44.3
195/183	да	8/70	193.5	141.7	46.4
192/180	да	11/93.9	193.1	125	58.1

Окончание табл. 3

Номер эксперимента/образца	Хиральность структуры (да/нет)	Кол-во слоев/масса, г	Скорость входа ударника v_1 , м/с	Скорость выхода ударника v_2 , м/с	$\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$, %
193/181	да	11/93.3	193.5	123	59.6
226/214	нет	6/45.5	188.3	154.5	32.7
232/220	нет	6/44.5	193.5	160.5	31.2
230/218	нет	9/66.4	193.1	145	43.6
231/219	нет	9/66.1	193.3	144	44.5
225/213	нет	12/87.2	191.3	131.5	52.7
229/217	нет	12/87.2	192.9	133.8	51.9

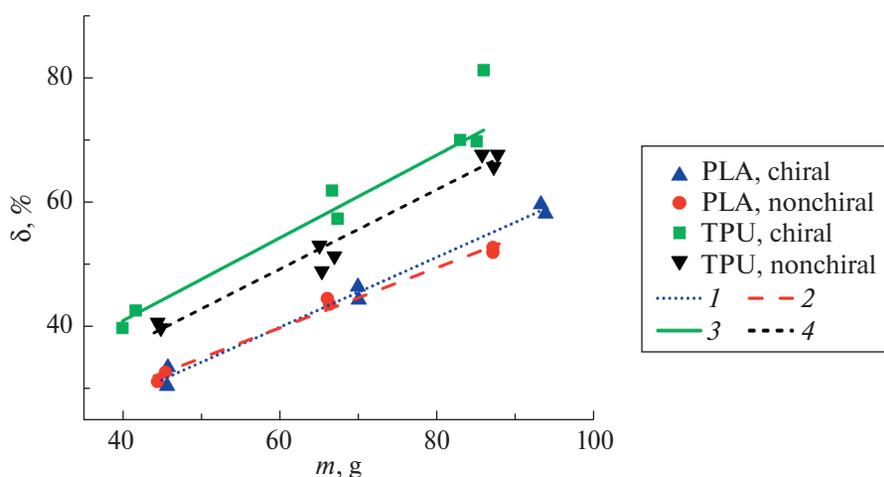


Рис. 3. Зависимость относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m хиральных и нехиральных образцов из e-PLA и TPU 95A для скорости входа ~ 190 м/с: 1 – ауксетик e-PLA с хиральностью; 2 – ауксетик e-PLA без хиральности; 3 – ауксетик TPU 95A с хиральностью; 4 – ауксетик TPU 95A без хиральности.

На рис. 3 маркерами различных типов представлены экспериментальные зависимости относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m хиральных и нехиральных образцов метаматериалов из PLA и TPU-пластиков при скорости входа ударника ~ 190 м/с. Для наглядности добавлены также линейные линии тренда. Видно, что для жестких образцов на основе PLA наличие хиральности структуры оказывает для выбранной скорости незначительное влияние, но все же для более массивных образцов оно приводит к увеличению сопротивляемости пробиванию. Для гибких хиральных образцов из термопластичного полиуретана сопротивляемость пробиванию возрас- тала по сравнению с образцами без хиральности на 5–7%.

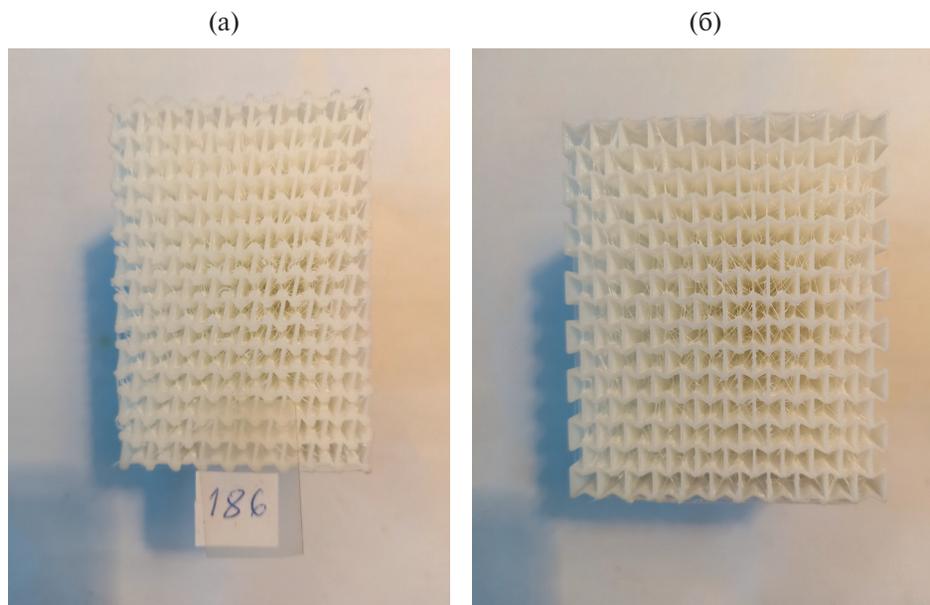


Рис. 4. Ауксетические образцы с поворотом структуры на 90° : (а) хиральный образец из TPU 95A пластика; (б) образец из TPU 95A пластика без хиральности.

Следующая серия экспериментов была подготовлена и проведена в тех же лабораторных условиях (температура и скорость) для образцов метаматериалов с внутренней структурой, повернутой относительно вертикальной оси на 90° (см. рис. 4). Целью исследования было установить, сохранится ли в данном случае влияние хиральности структуры метаматериалов на защитные свойства образцов.

В табл. 3 приведены результаты серии экспериментов с хиральными и нехиральными образцами из TPU 95A пластика при повороте структуры на 90° . Соответственно, экспериментальные данные для PLA-образцов с поворотом внутренней структуры на 90° приводятся в табл. 4.

Таблица 3. Пробивание хиральных и нехиральных ауксетических образцов из TPU 95A пластика при повороте структуры на 90° (результаты экспериментов)

Номер эксперимента/образца	Хиральность структуры (да/нет)	Кол-во слоев/масса, г	Скорость входа ударника v_1 , м/с	Скорость выхода ударника v_2 , м/с	$\delta = \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{v_1^2}, \%$
203/191	да	5/46.9	193.3	148.8	40.7
202/190	да	5/46.3	191.3	150	38.5
201/189	да	8/62.9	193.3	133.6	52.2
200/188	да	8/63.5	195	128.8	56.4

Окончание табл. 3

Номер эксперимента/образца	Хиральность структуры (да/нет)	Кол-во слоев/масса, г	Скорость входа ударника v_1 , м/с	Скорость выхода ударника v_2 , м/с	$\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2, \%$
199/187	да	11/79	193.1	116.5	63.6
198/186	да	11/81.4	195	113.1	66.4
213/201	нет	6/46.4	190.9	145	42.3
218/206	нет	6/47.7	193.3	141.9	46.1
211/199	нет	9/67	193.3	100.6	72.9
212/200	нет	9/67	191.7	114.6	64.3
219/207	нет	11/87.3	195	86.3	80.4
228/216	нет	11/87.3	195	68.3	87.7

Таблица 4. Пробивание хиральных и нехиральных ауксетических образцов из e-PLA-пластика с поворотом внутренней структуры на 90° (результаты экспериментов)

Номер эксперимента/образца	Хиральность структуры (да/нет)	Кол-во слоев/масса, г	Скорость входа ударника v_1 , м/с	Скорость выхода ударника v_2 , м/с	$\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2, \%$
246/234	да	5/46.5	193.3	154.5	36.1
250/238	да	5/45.3	195	156.3	35.8
247/235	да	8/71.5	193.3	135	51.2
249/237	да	8/70.6	193.3	139.1	48.2
245/233	да	11/89.1	191.7	118.8	61.6
248/236	да	11/88	195	124	59.6
233/221	нет	6/48.5	190.5	147.5	40
237/225	нет	6/48.8	193.3	150	39.8
235/223	нет	9/69.9	193.3	135	51.2
236/224	нет	9/69.4	195	136.2	51.2
234/222	нет	11/86.7	193.3	117	63.4
239/227	нет	11/81.9	193.3	120	61.5

На основе полученных экспериментальных данных из табл. 4 и 5 можно сделать вывод, что в случае поворота внутренней структуры на 90° большее сопротивление пробиванию оказывают нехиральные образцы метаматериалов (как PLA, так и TPU). Это хорошо видно из рис. 5. Линии тренда с номерами 2 и 4, соответствующие образцам без хиральности, проходят выше

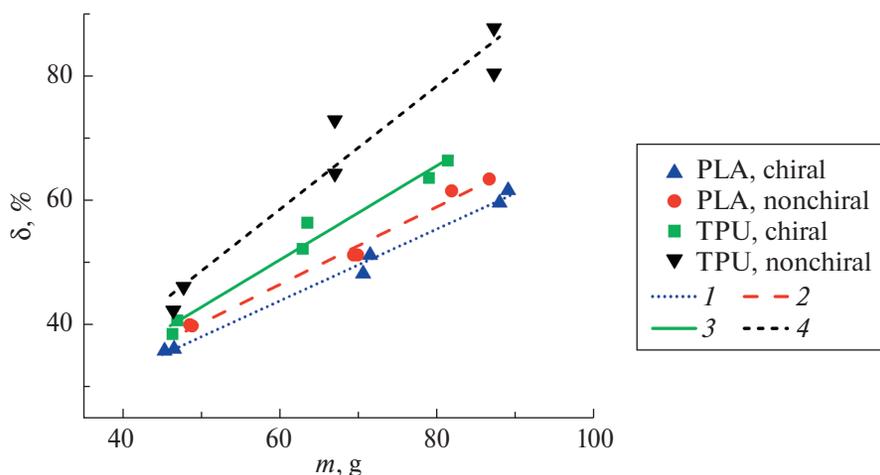


Рис. 5. Зависимость относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m образцов из TPU 95A и e-PLA с поворотом структуры на 90° для скорости входа ~ 190 м/с: 1 – ауксетик e-PLA с хиральностью; 2 – ауксетик e-PLA без хиральности; 3 – ауксетик TPU 95A с хиральностью; 4 – ауксетик TPU 95A без хиральности.

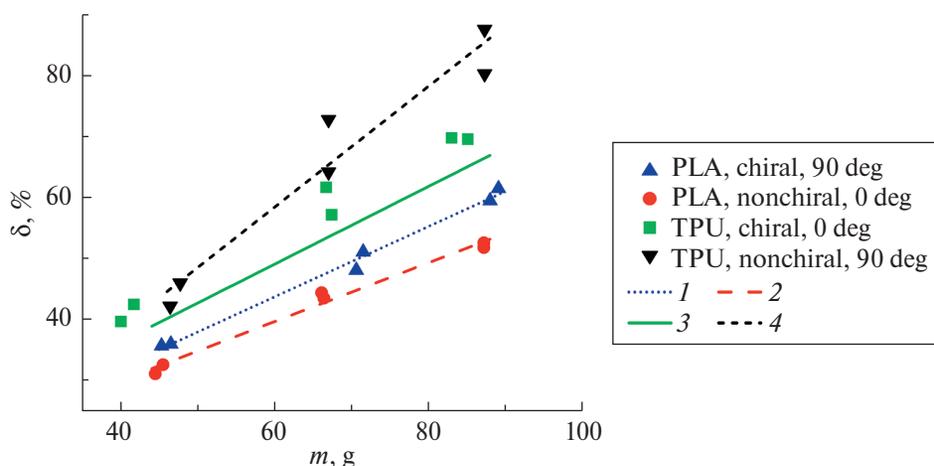


Рис. 6. Зависимость относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m ауксетических образцов из TPU 95A и e-PLA для скорости входа ~ 190 м/с: 1 – e-PLA с хиральностью и поворотом на 90° ; 2 – e-PLA без хиральности и поворота; 3 – TPU 95A с хиральностью без поворота; 4 – TPU 95A без хиральности с поворотом на 90° .

соответствующих линий 1 и 3. Для образцов из TPU выигрыш в сопротивляемости составляет более 10%.

Для наглядного сравнения на рис. 6 из рис. 3 и 5 перенесены зависимости, отвечающие максимальной и минимальной сопротивляемости пробиванию. Видно, что из всех рассмотренных вариантов наилучший результат достигается для метаматериала из TPU без хиральности при повороте структуры на 90°

(линия тренда 4). Наименьшее сопротивление оказывает нехиральный метаматериал на основе PLA без поворота (линия 2). Также можно наблюдать, что наиболее сильный рост величины δ с увеличением массы m наблюдается для образцов из TPU без хиральности при повороте структуры на 90° (линия 4).

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы и замечания.

Хиральность внутренней структуры ауксетического метаматериала оказывала существенное влияние на сопротивление пробиванию ударником. Относительная потеря кинетической энергии ударника отличалась у хиральных и нехиральных образцов на величину порядка 10%.

Как для жестких ауксетических e-PLA-образцов на основе вогнутого шестиугольника, так и для гибких ауксетиков из TPU 95A, имеющих внутреннюю структуру, изображенную на рис. 1 и 2, добавление хиральности приводило к усилению защитных свойств.

При внутренней структуре рассматриваемых образцов, повернутой на 90° по отношению к вертикали, хиральность снижала сопротивляемость пробиванию.

По результатам проведенных экспериментов самыми эффективными по сопротивлению пробиванию ударником оказались образцы из TPU 95A пластика (термопластичного полиуретана) без хиральности с поворотом внутренней структуры на 90° .

Отмечен наиболее высокий рост сопротивляемости пробиванию при увеличении массы образца для ауксетиков из полиуретана без хиральности с поворотом внутренней структуры на 90° .

Представляет интерес в дальнейшем более детальное изучение зависимости величины сопротивляемости метаматериалов пробиванию от угла поворота их внутренней ауксетической структуры.

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. *Lim T.-C.* Auxetic Materials and Structures. Singapore: Springer, 2015.
<https://doi.org/10.1007/978-981-287-275-3>
2. *Kolken H.M.A., Zadpoor A.A.* Auxetic Mechanical Metamaterials // RSC Adv. 2017. V. 7. № 9. P. 5111–5129.
<https://doi.org/10.1039/C6RA27333E>
3. *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>
4. *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>
5. *Городцов В.А., Лисовенко Д.С.* Ауксетики среди материалов с кубической анизотропией // Известия РАН. МТТ. 2020. № 4. С. 7–24.
<https://doi.org/10.31857/S0572329920040054>

6. *Шитикова М.В.* Обзор вязкоупругих моделей с операторами дробного порядка, используемых в динамических задачах механики твердого тела // Известия РАН. МТТ. 2022. № 1. С. 3–40.
<https://doi.org/10.31857/S0572329921060118>
7. *Novak N., Vesenjак M., Ren Z.* Auxetic cellular materials—a review // Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering. 2016. V. 62. № 9. P. 485–493.
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.3656>
8. *Kelkar P.U., Kim H.S., Cho K.-H. et al.* Cellular Auxetic Structures for Mechanical Metamaterials: A Review // Sensors. 2020. V. 20. № 11. P. 3132.
<https://doi.org/10.3390/s20113132>
9. *Joseph A., Manesh V., Harursampath D.* On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: A review // Adv. Manuf. 2021. V. 9. № 3. P. 342–368.
<https://doi.org/10.1007/s40436-021-00357-y>
10. *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 // Известия РАН. МТТ. 2023. № 2. С. 176–180.
<https://doi.org/10.31857/S0572329922600773>
11. *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 // Известия РАН. МТТ. 2023. № 5. С. 120–130.
<https://doi.org/10.31857/S0572329923600366>
12. *Иванова С.Ю., Осипенко К.Ю., Баничук Н.В., Лисовенко Д.С.* Экспериментальное исследование свойств метаматериалов на основе PLA пластика при пробивании жестким ударником // Известия РАН. МТТ. 2024. № 4. С. 207–215.
<https://doi.org/10.31857/S1026351924040146>
13. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* Investigation of the effect of a viscous filler on the punching process of auxetic and non-auxetic metamaterials // Mech. Solids. 2024. V. 59. № 7. P. 3727–3734.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424606633>
14. *Иванова С.Ю., Осипенко К.Ю., Баничук Н.В., Лисовенко Д.С.* Исследование влияния вязкого заполнителя на механические свойства метаматериалов с отрицательным и положительным коэффициентом Пуассона при пробивании жестким ударником // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2024. № 4 (62). С. 62–75.
<https://doi.org/10.37972/chgpu.2024.62.4.005>
15. *Иванова С.Ю., Осипенко К.Ю., Баничук Н.В., Лисовенко Д.С.* Влияние температуры метаматериалов на основе гибкого пластика TPU 95A на сопротивление пробиванию жестким ударником // Известия РАН. МТТ. 2025. № 1. С. 197–208.
<https://doi.org/10.31857/S1026351925010108>
16. *Иванова С.Ю., Осипенко К.Ю., Баничук Н.В., Лисовенко Д.С.* О влиянии вязкого заполнителя на сопротивление пробиванию ударником гибких метаматериалов с ауксетическими свойствами // Изв. РАН. МТТ. 2025. № 2. С. 267–278.
<https://doi.org/10.31857/S1026351925020156>
17. *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.
<https://doi.org/10.3103/S0025654422050053>

18. *Xing Y., Deng B., Cao M. et al.* Influence of structural and morphological variations in orthogonal trapezoidal aluminum honeycomb on quasi-static mechanical properties // *Mech. Solids*. 2024. V. 59. № 1. P. 445–458.
<https://doi.org/10.1134/S0025654423602550>
19. *Скрипняк В.В., Чирков М.О., Скрипняк В.А.* Моделирование механической реакции ауксетических метаматериалов на динамические воздействия // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2021. № 2. С. 144–152.
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.2.13>
20. *Imbalzano G., Tran P., Lee P.V.S. et. al.* Influences of material and geometry in the performance of auxetic composite structure under blast loading // *Appl. Mech. Mater.* 2016. V. 846. P. 476–481.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.846.476>
21. *Zhao X., Gao Q., Wang L. et. al.* Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure un-der impact loading // *Mater. Des.* 2018. V. 160. P. 527–537.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>
22. *Li C., Shen H.S., Wang H.* Nonlinear dynamic response of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core // *Nonlinear Dyn.* 2020. V. 100. P. 3235–3252.
<https://doi.org/10.1007/s11071-020-05686-4>
23. *Qiao J.X., Chen C.Q.* Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs // *Inter. J. Impact Eng.* 2015. V. 83. P. 47–58.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005>
24. *Novak N., Starcevic L., Vesenjак M. et. al.* Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core // *Compos. Struct.* 2019. V. 210. P. 167–178.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.050>
25. *Yu Y., Fu T., Wang S., Yang C.* Dynamic response of novel sandwich structures with 3D sinusoid-parallel-hybrid honeycomb auxetic cores: The cores based on negative Poisson's ratio of elastic jump // *Eur. J. Mech. – A/Solids*. 2025. V. 109. P. 105449.
<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105449>
26. *Shen Z.Y., Wen Y.K., Shen L.Y. et. al.* Dynamic response and energy absorption characteristics of auxetic concave honeycomb pad for ballistic helmet under shock wave and bullet impact // *Mech. Solids*. 2024. V. 59. № 5. P. 3050–3067.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424605159>
27. *Jiang Q., Hao B., Chen G. et. al.* Analysis of the penetration ability of exponential bullets on TPMS structures with variable density // *Mech. Solids*. 2024. V. 59. № 5. P. 3198–3211.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424605640>
28. *Usta F., Türkmen H.S., Scarpa F.* High-velocity impact resistance of doubly curved sandwich panels with re-entrant honeycomb and foam core // *Int. J. Impact Eng.* 2022. V. 165. P. 104230.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104230>

ON THE INFLUENCE OF CHIRALITY OF THE STRUCTURE OF AUXETIC METAMATERIALS ON THE RESISTANCE TO IMPACT PENETRATION

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 properties of metamaterials with negative Poisson's ratio (with an auxetic structure based on a cell in the form of a concave hexagon) to resist penetration by a rigid spherical striker along the normal were experimentally studied. Using a 3D printer, samples of the same mass with a chiral and non-chiral structure were made from flexible thermoplastic polyurethane (TPU 95A plastic) and rigid e-PLA plastic, which were compared by the ability to reduce the kinetic energy of strikers at a speed of about 190 m/s. It was found that the chirality of the sample structure (for both TPU and PLA plastics) leads to an increase in their protective properties. However, when the sample structure was rotated by 90 degrees, the samples without chirality showed the best resistance to penetration. Based on the results of a series of experiments with TPU and PLA samples, the most effective in terms of resistance to penetration by a striker were auxetics made of thermoplastic polyurethane, with a non-chiral structure turned by 90 degrees.

Keywords: metamaterials, auxetics, chiral structures, experimental studies, penetration, hard strikers

REFERENCES

1. *Lim T.-C.* Auxetic Materials and Structures. Singapore: Springer, 2015.
<https://doi.org/10.1007/978-981-287-275-3>
2. *Kolken H.M.A., Zadpoor A.A.* Auxetic Mechanical Metamaterials // RSC Adv. 2017. V. 7. № 9. P. 5111–5129.
<https://doi.org/10.1039/C6RA27333E>
3. *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>
4. *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>
5. *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>
6. *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.
<https://doi.org/10.3103/S0025654422010022>
7. *Novak N., Vesenjak M., Ren Z.* Auxetic cellular materials-a review // Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering. 2016. V. 62. № 9. P. 485–493.
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.3656>

8. *Kelkar P.U., Kim H.S., Cho K.-H. et. al.* Cellular Auxetic Structures for Mechanical Metamaterials: A Review // *Sensors*. 2020. V. 20. № 11. P. 3132.
<https://doi.org/10.3390/s201113132>
9. *Joseph A., Manesh V., Harursampath D.* On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: A review // *Adv. Manuf.* 2021. V. 9. № 3. P. 342–368.
<https://doi.org/10.1007/s40436-021-00357-y>
10. *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>
11. *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>
12. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* Experimental study of the properties of metamaterials based on PLA plastic when perforated by a rigid striker // *Mech. Solids*. 2024. V. 59. № 4. P. 207–215.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424604695>
13. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* Investigation of the effect of a viscous filler on the punching process of auxetic and non-auxetic metamaterials // *Mech. Solids*. 2024. V. 59. № 7. P. 3727–3734.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424606633>
14. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* Investigation of the effect of a viscous filler on the mechanical properties of metamaterials with negative and positive Poisson's ratio when punching with a rigid impactor // *Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost.* 2024. № 4 (62). P. 62–75.
<https://doi.org/10.37972/chgpu.2024.62.4.005>
15. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* Temperature influence of metamaterials based on flexible TPU 95A plastic on resistance to penetration by a rigid striker // *Mech. Solids*. 2025. № 1. P. 197–208.
16. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* On the effect of the viscous filler on the impact resistance of flexible metamaterials with auxetic properties // *Mech. Solids*. 2025. № 2. P.901–915.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424607225>
17. *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.
<https://doi.org/10.3103/S0025654422050053>
18. *Xing Y., Deng B., Cao M. et al.* Influence of structural and morphological variations in orthogonal trapezoidal aluminum honeycomb on quasi-static mechanical properties // *Mech. Solids*. 2024. V. 59. № 1. P. 445–458.
<https://doi.org/10.1134/S0025654423602550>
19. *Skripnyak V.V., Chirkov M.O., Skripnyak V.A.* Modeling the mechanical response of auxetic metamaterials to dynamic effects // *Vestn. PNIPU. Mekh.* 2021. № 2. P. 144–152.
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.2.13>
20. *Imbalzano G., Tran P., Lee P.V.S. et. al.* Influences of material and geometry in the performance of auxetic composite structure under blast loading // *Appl. Mech. Mater.* 2016. V. 846. P. 476–481.

- <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.846.476>
21. Zhao X., Gao Q., Wang L. et al. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure un-der impact loading // Mater. Des. 2018. V. 160. P. 527–537.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>
 22. Li C., Shen H.S., Wang H. Nonlinear dynamic response of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core // Nonlinear Dyn. 2020. V. 100. P. 3235–3252.
<https://doi.org/10.1007/s11071-020-05686-4>
 23. Qiao J.X., Chen C.Q. Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs // Inter. J. Impact Eng. 2015. V. 83. P. 47–58.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005>
 24. Novak N., Starcevic L., Vesenjак M. et al. Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core // Compos. Struct. 2019. V. 210. P. 167–178.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.050>
 25. Yu Y., Fu T., Wang S., Yang C. Dynamic response of novel sandwich structures with 3D sinusoid-parallel-hybrid honeycomb auxetic cores: The cores based on negative Poisson's ratio of elastic jump // Eur. J. Mech. – A/Solids. 2025. V. 109. P. 105449.
<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105449>
 26. Shen Z.Y., Wen Y.K., Shen L.Y. et al. Dynamic response and energy absorption characteristics of auxetic concave honeycomb pad for ballistic helmet under shock wave and bullet impact // Mech. Solids. 2024. V. 59. № 5. P. 3050–3067.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424605159>
 27. Jiang Q., Hao B., Chen G. et al. Analysis of the penetration ability of exponential bullets on TPMS structures with variable density // Mech. Solids. 2024. V. 59. № 5. P. 3198–3211.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424605640>
 28. Usta F., Türkmen H.S., Scarpa F. High-velocity impact resistance of doubly curved sandwich panels with re-entrant honeycomb and foam core // Int. J. Impact Eng. 2022. V. 165. P. 104230.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104230>