

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГИБКОГО ПЛАСТИКА TPU 95A НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОБИВАНИЮ ЖЕСТКИМ 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, Россия

*E-mail: lisovenk@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 02.12.2024 г.

После доработки 08.12.2024 г.

Принята к публикации 09.12.2024 г.

Экспериментально изучались механические свойства метаматериалов, имеющих ячеистую хиральную внутреннюю структуру, при пробивании по нормали жестким сферическим ударником. Образцы метаматериалов были напечатаны на 3D-принтере из TPU 95A пластика (термопластичного полиуретана). Они имели ауксетическую и неауксетическую хиральную структуру из ячеек, соответственно, в форме вогнутых или выпуклых шестиугольников. Приводятся результаты экспериментов по пробиванию образцов, проведенных для двух температурных и двух скоростных режимов. Относительная потеря кинетической энергии ударника при пробивании ауксетических образцов была существенно выше, чем неауксетических. Установлено, что для исследованных видов гибких метаматериалов сопротивляемость пробиванию ударником растет с возрастанием температуры в рассмотренном температурном диапазоне. Установлена зависимость отклонения ударника на вылете из гибкого образца от вида хиральности пробиваемой структуры.

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

DOI: 10.31857/S1026351925010108, **EDN:** SZUKEG

Ауксетические материалы (материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона) активно изучаются последние десятилетия [1–9]. Ауксетики проявляют уникальные механические свойства. Например, они имеют более высокое сопротивление индентированию по сравнению с обычными материалами, высокое удельное поглощения механической энергии. Эти свойства делают ауксетики перспективными для создания ударо- и энергопоглощающих конструкций [10–24].

Данная работа посвящена продолжению экспериментальных исследований механических свойств создаваемых метаматериалов с ячеистой структурой из металла [10] или e-PLA пластика [11–13] при пробивании

жестким сферическим ударником. На 3D-принтере из TPU 95A пластика (термопластичного полиуретана), который обеспечивает высокую ударную вязкость, были изготовлены ауксетические и неауксетические образцы метаматериалов, имеющие хиральную структуру из ячеек, соответственно, в форме вогнутых или выпуклых шестиугольников. По виду и геометрическим параметрам данные образцы полностью соответствовали образцам, представленным на фото и схемах в работах [12, 13], но, в отличие от жестких метаматериалов из e-PLA пластика с хиральной ячеистой структурой, в данной работе исследовался гибкий метаматериал, допускающий существенные упругие деформации в процессе пробивания ударником.

Целью проведенных исследований было изучить свойства гибких метаматериалов в плане их способности сопротивляться пробиванию, оценив относительную потерю кинетической энергии ударника при разных значениях температуры рассматриваемых образцов. Ауксетические и неауксетические образцы, одинаковые по количеству слоев в ячеистой структуре, имели приблизительно равные массы (насколько позволял процесс изготовления на 3D принтере и структура образцов), что дало возможность проводить сравнения их свойств. Образцы выдерживались в термостате не менее 5 ч при значениях температуры 16 или 25 °С. Пробивание образцов осуществлялось стальным сферическим ударником, имеющим диаметр 10 мм и массу 4.06 г на скоростях ~150 и ~190 м/с. Боковая сторона образцов, которая подвергалась удару, во всех случаях имела размеры ~70 × 72 мм. Скорость входа ударника измерялась с помощью оптического рамочного хронографа ИБХ-АСС-0021 “Стрелец”, а также с помощью осциллографа и высокоскоростной видеокамеры FASTCAM mini AX200, на которую записывался процесс пробивания образца. Камера размещалась таким образом, что на видеозаписи ударник пробивает образец, двигаясь справа налево. Она применялась также для определения скорости вылета ударника из преграды. Для рассматриваемых хиральных структур проверялась возможность отклонения направления движения ударника после пробивания от подлетного направления.

Данные экспериментов по пробиванию при температурах 16 и 25 °С, соответственно, приведены в таблицах 1 и 2 для хиральных ауксетических образцов, имеющих различную толщину (5, 8 и 11 слоев ячеек). Табл. 3 и 4 содержат экспериментальные данные для неауксетиков. В таблицах указаны номер эксперимента N_1 и номер образца N_2 , значения толщины H , количества слоев N , массы образцов m и вид хиральности для каждого испытываемого образца, значения скорости ударника v_1 на входе и v_2 на выходе из образца, значение относительной потери кинетической энергии ударника $\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$, а также данные по отклонению ударника на вылете от подлетного направления. Значения приведены для скоростных режимов ~150 и ~190 м/с.

В эксперименте 87/84 (табл. 1) наблюдался баллистический предел, ударник выпал из преграды (образца) с нулевой скоростью, а в экспериментах 74/71 (табл. 1), 73/70 (табл. 2) и 79/76 (табл. 4) сферический ударник застрял в образцах на глубине 30, 35 и 78 мм от точки входа соответственно.

Рис. 1а иллюстрирует экспериментально установленную зависимость величины δ (%) относительной потери кинетической энергии ударника от массы m [г] хирального ауксетического образца для двух режимов подлетной

Таблица 1. Экспериментальные данные по пробиванию хиральных ауксетических образцов при 16 °С

Ско- ростной режим, м/с	N_1/N_2	H , мм/ N/t , г	Вид хираль- ности	v_1 , м/с	v_2 , м/с	δ , %	От- кло- нение	Угол, град.
~150	76/74	25/5/43.1	\	155.6	103.5	55.8	вверх	2
	77/73	25/5/43.8	/	155	96	61.6	вниз	1.5
	92/88	25/5/39.6	/	150	99	56.4	вниз	1
	87/84	38.5/ 8/ 67.9	\	153	0	100		
	74/71	52/11/90	\	153.3	застрял. $L = 30$ мм	100		
~190	98/94	25/5/40	/	187.5	145.5	42.6	вниз	1
	101/97	25/ 5/41.7	\	192	145.5	42.6	—	0
	75/72	38.5/8/66.7	/	196.7	121.5	61.8	вниз	1
	127/113	38.5/8/67.4	\	190.5	124.5	57.3	—	0
	97/93	52/11/83	/	191.3	105	69.9	вниз	2
	100/96	52/11/86	\	190	82.5	81.1	—	0
	139/125	52/11/85.1	\	195	107.3	69.7	—	0

Таблица 2. Экспериментальные данные по пробиванию хиральных ауксетических образцов при 25 °С

Ско- ростной режим, м/с	N_1/N_2	H , мм/ N/t , г	Вид хираль- ности	v_1 , м/с	v_2 , м/с	δ , %	От- кло- нение	Угол, град.
~150	96/92	25/5/40.3	/	150	93	61.5	вниз	1
	99/95	25/5/41	/	153	89.2	66	вниз	3
	128/114	25/5/43.4	\	148.5	95.4	58.7	—	0
	94/90	38.5/8/ 62	/	153	63.5	82.8	вниз	3
	116/102	38.5/8/65.2	\	151.5	41.3	92.6	вверх	1.5
	140/126	38.5/8/66.6	\	154.5	58.8	85.5	вниз	2
	73/70	52/11/88.9	/	155	застрял. $L = 35$ мм	100		
~190	102/98	25/5/42	/	189	139.5	45.5	вниз	1
	103/99	25/5/41.5	\	192	146.3	41.3	—	0
	129/115	38.5/8/66.9	/	193.5	111	67.1	вниз	2
	130/116	38.5/8/65.5	\	192.9	118.5	62.3	—	0
	93/89	52/ 11/ 84	/	192.9	84.2	81	вниз	2.5
	95/91	52/11 / 83.6	\	188.6	79.5	82.2	—	0

Таблица 3. Экспериментальные данные по пробиванию хиральных неауксетических образцов при 16 °С

Скоростной режим, м/с	N_1/N_2	H , мм/ N/m , г	Вид хиральности	v_1 , м/с	v_2 , м/с	δ , %	Отклонение	Угол, град.
~150	124/110	40.5/ 5/ 47.7	/	148.5	103.5	51.4	вниз	1
	126/112	40.5/ 5/ 47.5	\	151.5	103	53.8	вверх	1
	134/120	55/ 8/ 70.1	/	154.3	87	68.2	вниз	1.5
	135/121	55/ 8/ 71.5	\	152.1	76	75	вверх	2
	138/124	85/ 11/ 97.5	\	151.9	45.8	90.9	вверх	3.5
	133/119	85/ 11/ 94.9	/	152.1	54	87.4	вниз	6
~190	122/108	40.5/ 5/ 47	/	192.9	150	39.5	—	0
	123/109	40.5/ 5/ 47.8	\	188.6	147	39.2	—	0
	136/122	55/ 8/ 71.9	/	193.1	130.5	54.3	вниз	1.5
	137/123	55/ 8/ 74.1	\	191.3	123.3	58.5	—	0
	125/111	85/ 11/ 96.9	\	189	101.5	71.2	вверх	3
	121/107	85/ 11/ 95.6	/	192	106.5	69.2	вниз	2

Таблица 4. Экспериментальные данные по пробиванию хиральных неауксетических образцов при 25 °С

Скоростной режим, м/с	N_1/N_2	H , мм/ N/m , г	Вид хиральности	v_1 , м/с	v_2 , м/с	δ , %	Отклонение	Угол, град.
~150	82/79	40.5/5/46.2	/	151.4	106.3	50.5	вниз	1
	83/80	40.5/5/47.3	\	151.4	102	54.6	вверх	1.5
	80/77	55/8/71.1	/	154.3	66.7	81.3	вниз	2
	81/78	55/8/71.4	\	151.6	71.2	77.9	вверх	4
	79/76	85/11/96.3	\	150	Застрял. $L = 78$ мм	100		
~190	117/103	40.5/5/47.3	\	197.1	153	39.7	—	0
	120/106	40.5/5/47.3	/	196.9	152.1	40.3	вниз	<1
	131/117	55/ 8/ 72.9	/	188.6	120	59.5	вниз	1
	132/118	55/ 8/ 72.9	\	190.7	116.7	62.6	вверх	2
	104/100	85/ 11/ 93	/	188.6	94.5	74.9	вниз	2
	118/104	85/ 11 / 98.4	\	192.9	97.5	74.5	вверх	2

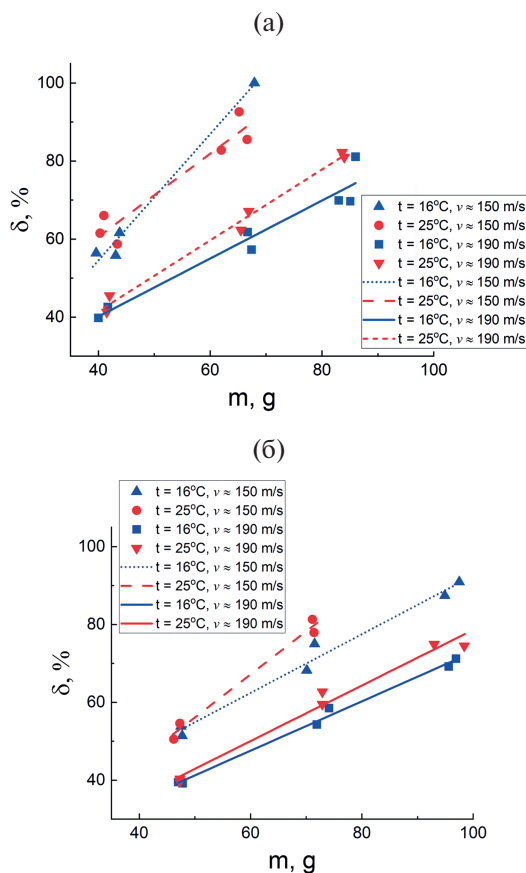


Рис. 1. Зависимость относительной потери кинетической энергии ударника δ (%) от массы m [г] пробиваемых хиральных ауксетических (а) и неауксетических (б) образцов: при подлетных скоростях ~ 150 и ~ 190 м/с.

скорости ударника: ~ 150 и ~ 190 м/с. Точки на графиках, соответствующие скорости ~ 150 м/с, обозначены треугольными маркерами с вершиной вверх для значения температуры образцов 16 °С и круглыми маркерами для 25 °С. Ниже на рисунке в тех же осях координат приведены графики для подлетной скорости ~ 190 м/с: квадратные маркеры для температуры для 16 °С, треугольные с вершиной вниз — для 25 °С. Для наглядности добавлены, соответственно, четыре линейные линии тренда. Видно, что относительная потеря энергии существенно больше при подлетной скорости ~ 150 м/с в рассмотренном диапазоне температур. Для неауксетических хиральных образцов аналогичные зависимости представлены на рис. 1б (для тех же режимов подлетных скоростей и значений температур).

Рис. 2а, б дает возможность продемонстрировать преимущество в гашении кинетической энергии ударника при пробивании ауксетических образцов по сравнению с неауксетиками. Данные для скоростного режима ~ 150 м/с

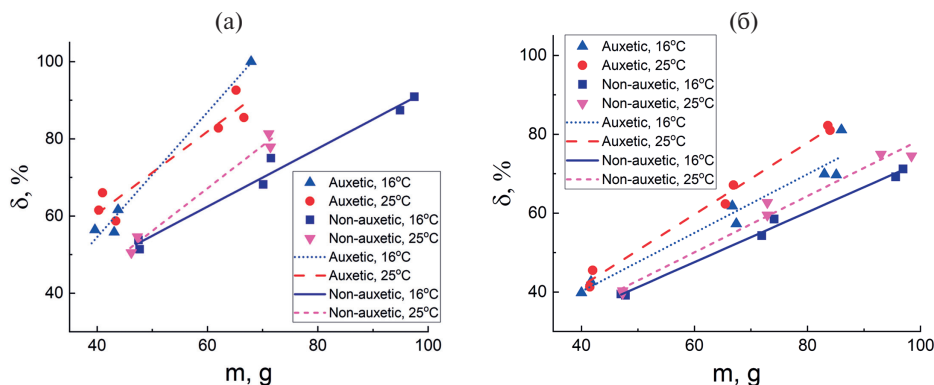


Рис. 2. Зависимость относительной потери кинетической энергии ударника δ (%) от массы m [г] пробиваемых хиральных ауксетических и неауксетических образцов: при подлетных скоростях ~150 м/с (а) и ~190 м/с (б).

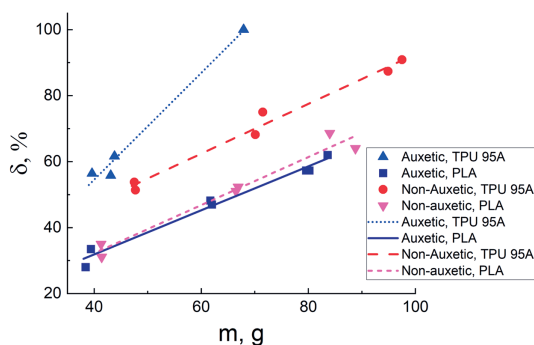


Рис. 3. Зависимость относительной потери кинетической энергии ударника δ (%) от массы m [г] пробиваемых хиральных ауксетических и неауксетических образцов из TPU 95A и PLA пластика при подлетных скоростях ~150 м/с и температуре 16 °С.

приведены на рис. 2а, для подлетной скорости ~190 м/с — на рис. 2б. При этом видно, что преимущество ауксетиков оказывается больше в первом случае. Из рис. 1, 2 и данных таблиц видно, что с повышением температуры в рассматриваемом диапазоне способность метаматериалов на основе TPU 95A пластика сопротивляться внедрению ударника возрастает. Это можно объяснить тем, что с ростом температуры растут и деформации в образце, и на это затрачивается дополнительная энергия.

Рис. 3 показывает лучшую способность метаматериалов из TPU 95A пластика сопротивляться внедрению ударников по сравнению с исследованными ранее в [12, 13] образцами из PLA пластика при тех же значениях подлетной скорости и температуры.

В ряде проведенных экспериментов ударник после вылета из пробиваемого образца не менял своего первоначального подлетного направления. Однако, в большинстве случаев наблюдалось отклонение направления движения вверх или вниз (см. табл. 1–4). Видно, что отклонение соответствует типу

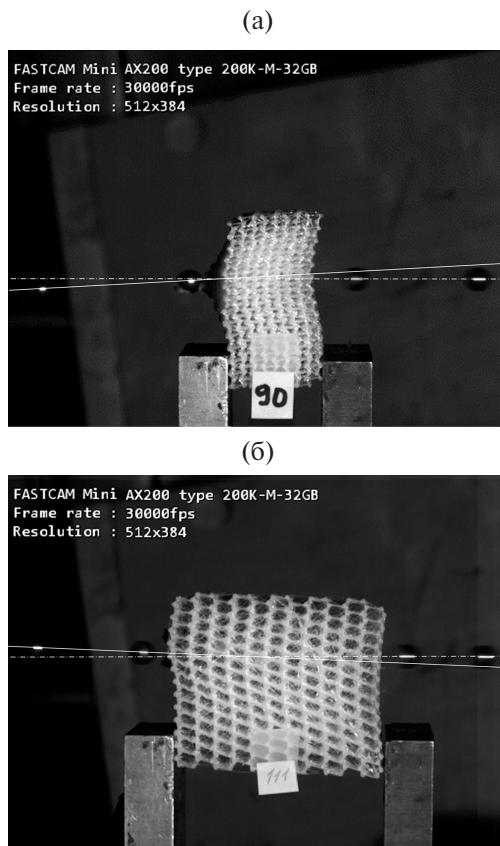


Рис. 4. Отклонение направления движения ударника на выходе из образцов от полетного: хиральный (“/”) ауксетический образец (94/90, табл. 2), отклонение вниз $\sim 3^\circ$ (а); хиральный (“\”) неауксетический образец (125/111, табл. 3), отклонение вверх $\sim 3^\circ$ (б).

хиральности образцов, имеющих как ауксетическую, так и неауксетическую структуру. На рис. 4а, б показаны по четыре положения ударника в процессе пробивания образцов, зафиксированные видеокамерой. Для наглядности были добавлены линии: штрих-пунктирная прямая соединяет два изображения ударника до входа в образец (справа от него), сплошная линия соединяет два его изображения слева, после вылета из образца. Рис. 4а демонстрирует процесс пробивания ауксетика с хиральностью типа “/” и отклонением ударника вниз, а рис. 4б соответствует пробиванию неауксетика с хиральной структурой “\” и отклонением ударника вверх. Характерные асимметричные деформации образцов в наблюдаемой плоскости сразу после вылета из них ударника зафиксированы во всех экспериментах и отражают особенность хиральных структур с хиральностью типа “/” (выпуклость тыльной поверхности образца направлена вниз, рис. 4а) и с хиральной структурой “\” (выпуклость тыльной поверхности образца направлена вверх, рис. 4б).

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сформулировать следующие выводы:

Сравнивая зависимости на рис. 1, 2, а также данные из таблиц, можно заключить, что для выбранных скоростных и температурных режимов рассмотренные ауксетические образцы лучше сопротивляются пробиванию, чем неауксетические образцы примерно той же массы.

При более высокой температуре $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдалась более значительная деформация пробиваемых гибких образцов, вследствие чего они лучше гасили энергию ударника, чем при $t = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Исключение составили ауксетические образцы наибольшей толщины при пробивании на подлетной скорости ударника $\sim 150\text{ м/с}$ (см. рис. 1а). Этот факт может быть объяснен более существенным вкладом прочностных свойств образцов при более низких значениях одновременно как температуры, так и скорости.

Установлено соответствие отклонения ударника после вылета из образца (вверх или вниз) типу хиральной структуры метаматериала (“\” или “/”, соответственно) как для ауксетиков, так и для неауксетиков (рис. 4).

Сопротивляемость пробиванию гибких образцов из TPU 95А пластика, исследованных в данной работе, была существенно выше, чем у образцов из e-PLA пластика, которые исследовались ранее в [12, 13] (рис. 3).

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.
<http://dx.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.
<http://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 // Изв. РАН. МТТ. 2020. № 4. С. 7–24.
<https://doi.org/10.31857/S0572329920040054>
6. *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://dx.doi.org/10.31857/S0572329921060118>
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 Meta-materials: 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 // *Изв. 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 // *Изв. 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 // *Изв. РАН. МТТ*. 2024. № 4. С. 207–215.
13. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* // *Mech. Solids*. 2024. V. 59. № 7.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424606633>
14. *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>
15. *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>
16. *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.
<http://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.2.13>
17. *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.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.846.476>
18. *Zhao X., Gao Q., Wang L. et al.* Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading // *Mater. Des.* 2018. V. 160. P. 527–537.
<http://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>
19. *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.
<http://doi.org/10.1007/s11071-020-05686-4>
20. *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.
<http://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005>
21. *Novak N., Starcevic L., Vesenjak 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>

22. 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>
23. 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>
24. 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>

TEMPERATURE INFLUENCE OF METAMATERIALS BASED ON FLEXIBLE TPU 95A PLASTIC ON RESISTANCE TO PENETRATION 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 a cellular chiral internal structure were experimentally studied during normal penetration by a rigid spherical striker. The metamaterial samples were 3D printed from TPU 95A plastic (thermoplastic polyurethane). They had auxetic and non-auxetic chiral structures of cells in the form of concave and convex hexagons, respectively. The results of the experiments on sample penetration, conducted for two temperature and two speed modes, are presented. The relative loss of kinetic energy of the striker during penetration of auxetic samples was significantly higher than that of non-auxetic ones. It was found that for the studied types of flexible metamaterials, the resistance to striker penetration increases with increasing temperature in the considered temperature range. The dependence of the striker deviation on exit from the flexible sample on the type of chirality of the structure being penetrated was established.

Keywords: metamaterials, auxetics, experimental studies, penetration, punching, hard impactors, temperature

REFERENCES

1. Lim T.-C. *Auxetic Materials and Structures*. Singapore: Springer, 2015. <http://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. <http://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. N 1. P. 1–33.
<http://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/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. *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. 1967–1972.
<http://doi.org/10.1134/S0025654424604695>
13. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* // *Mech. Solids.* 2024. V. 59. № 7. P. 3727–3734.
<https://doi.org/10.1134/S0025654424606633>
14. *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>
15. *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>
16. *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.
<http://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.2.13>

17. *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.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.846.476>
18. *Zhao X., Gao Q., Wang L. et. al.* Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading // *Mater. Des.* 2018. V. 160. P. 527–537.
<http://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>
19. *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.
<http://doi.org/10.1007/s11071-020-05686-4>
20. *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.
<http://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005>
21. *Novak N., Starcevic L., Vesenjak 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>
22. *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>
23. *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>
24. *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>