

УДК 539.3

О ВЛИЯНИИ ВЯЗКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОБИВАНИЮ УДАРНИКОМ ГИБКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ С АУКСЕТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

© 2025 г. С. Ю. Иванова^а, К. Ю. Осипенко^а,
Н. В. Баничук^а, Д. С. Лисовенко^{а,*}

^а*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

^{*}*E-mail lisovenk@ipmnet.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2024

После доработки 10.01.2025

Принята к публикации 10.01.2025

Экспериментально исследовались свойства гибких метаматериалов с отрицательным коэффициентом Пуассона (с ауксетической структурой на основе ячейки в виде вогнутого шестиугольника) сопротивляться пробиванию по нормали жестким сферическим ударником. Образцы с хиральной структурой, изготовленные с помощью 3D-принтера из термопластичного полиуретана (TPU 95A пластика), с заполнением ячеек воздухом или желатином сравнивались по способности снижать кинетическую энергию ударников. Эксперименты проводились для двух скоростных режимов. Установлено, что заполнение желатином ауксетических хиральных образцов из TPU 95A пластика (в отличие от исследованных ранее жестких метаматериалов на основе e-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.

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

DOI: 10.31857/S1026351925020156, **EDN:** AOUQX

Библиографию по изучению свойств материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона (ауксетиков) можно найти, например, в [1–9]. Особенный интерес представляют искусственно создаваемые метаматериалы, которые могут быть использованы при проектировании ударо- и энергопоглощающих конструкций [10–26]. Данная работа является продолжением исследований механических свойств ауксетических метаматериалов, хиральная внутренняя структура которых состоит из ячеек на основе вогнутого шестиугольника [10, 12–15]. В [12–14] был сделан вывод о том, что наличие вязкого заполнителя внутри ячеек ауксетических образцов, изготовленных на 3D-принтере из e-PLA пластика, значительно усиливало

способность этих образцов сопротивляться пробиванию сферическим ударником, по сравнению с неауксетическими образцами, структура которых была обычной сотовой (на основе выпуклого шестиугольника). В работе [15] изучались метаматериалы 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. В [15] было установлено, что образцы метаматериалов из TPU 95A пластика оказывают значительно большее сопротивление при пробивании ударниками, чем метаматериалы из PLA пластика, и они могут быть перспективными для создания ударо- и энергопоглощающих конструкций.

Цель представленных в данной работе исследований заключается в определении влияния вязкого наполнения на структуры из TPU 95A пластика (по аналогии со структурами из PLA пластика в [12–14]) на сопротивляемость внедрению жестких ударников. Эксперименты проводились для ауксетических образцов с хиральной структурой на основе вогнутого шестиугольника. Также изучалась способность хиральных ячеистых структур отклонять внедряющийся ударник от первоначального направления движения.

Для проведения экспериментов с помощью 3D-принтера были изготовлены ауксетические хиральные образцы из TPU 95A пластика на основе 3D-модели, примененной ранее в [12–15] (см. рис. 1а) толщиной $H = 25; 38,5$ и 52 мм. Образцы заполнялись пищевым желатином, приготовленным из расчета 50 г желатина на 500 г воды (рис. 1б), закреплялись в штативе и простреливались стальным сферическим ударником на скоростях ~ 150 м/с и ~ 190 м/с по нормали к боковой поверхности, имеющей во всех случаях размеры 70×72 мм. Температура образцов была $\sim 16 \div 17^\circ\text{C}$. Ударник массой 4.06 г и диаметром 10 мм разгонялся 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

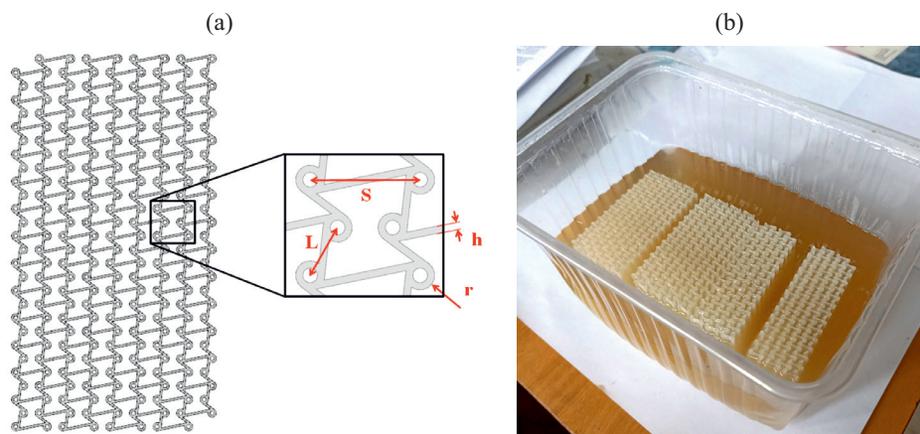


Рис. 1. Ауксетический хиральный образец из термопластичного полиуретана TPU 95A: (а) 3D-модель: $S = 6$ мм, $L = 3$ мм, $h = 0.4$ мм, $r = 0.8$ мм; (б) заполнение желатином.

Таблица 1. Пробивание хиральных ауксетических образцов из TPU 95A и PLA пластика на скорости ~150 м/с (результаты экспериментов)

| Номер эксперимента / образца | Материал | Масса образца, г/толщина, мм | Скорость входа ударника v_1 , м/с | Скорость выхода ударника v_2 , м/с | $\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$, % (с желатином)/ δ_0 , % |
|------------------------------|----------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 172/160 | TPU 95A | 124.9/25 | 154.5 | 91.5 | 64.9 / 57.9 |
| 186/174 | TPU 95A | 121.6/25 | 153 | 101.8 | 55.7 / 57.9 |
| 20/17 | PLA | 130.1/25 | 147 | 103.3 | 50.6 / 30.8 |
| 23/20 | PLA | 137.9/25 | 148.3 | 102 | 52.7 / 30.8 |
| 171/159 | TPU 95A | 192.4/38.5 | 151.5 | 53.3 | 87.6 / 100 |
| 185/173 | TPU 95A | 190.7/38.5 | 154.5 | 79.2 | 73.7 / 100 |
| 36/33 | PLA | 205.7/38.5 | 159 | 78 | 76 / 47.6 |
| 37/34 | PLA | 211/38.5 | 153 | 66 | 81 / 47.6 |
| 38/35 | PLA | 206/38.5 | 156 | 67.5 | 81.2 / 47.6 |
| 173/161 | TPU 95A | 268.5/52 | 151.5 | — | Пробил на 47/30 мм |
| 184/172 | TPU 95A | 262.7/52 | 153 | 43 | 92.1 / пробил на 30 мм |
| 29/26 | PLA | 280/52 | 150 | 31.4 | 95.6 / 58.9 |
| 31/28 | PLA | 269.5/52 | 150.2 | 33.8 | 94.9 / 58.9 |
| 32/29 | PLA | 276.5/52 | 153 | 45.8 | 91 / 58.9 |
| 33/30 | PLA | 269.5/52 | 153 | 30.8 | 95.9 / 58.9 |

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.

В табл. 1 приведены результаты серии экспериментов с заполненными желатином образцами из TPU 95A пластика для скоростного режима ударника ~150 м/с. Для сравнения в нее включены также данные для PLA-образцов из [12–14]. В крайнем правом столбце табл. 1 приведены значения параметра δ (%) относительной потери кинетической энергии ударника при пробивании образцов с желатином, а также для сравнения средние значения параметра δ_0 (%) для незаполненных образцов (с воздушным наполнением [12–15]) соответствующих метаматериалов той же толщины.

В табл. 2 приведены данные экспериментов по пробиванию аналогичных образцов со скоростью входа ударника порядка 190 м/с.

На рис. 2 маркерами различных типов представлены экспериментальные зависимости относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m образцов с желатином или воздухом для скорости входа ~150 м/с. Данные для хиральных ауксетических образцов метаматериалов на основе TPU 95A пластика, сравниваются с данными для образцов на основе PLA с теми же

Таблица 2. Пробивание хиральных ауксетических образцов из TPU 95A и PLA пластика на скорости ~190 м/с (результаты экспериментов)

| Номер эксперимента / образца | Материал | Масса образца, г/толщина, мм | Скорость входа ударника v_1 , м/с | Скорость выхода ударника v_2 , м/с | $\delta = (v_1^2 - v_2^2) / v_1^2$, % (с желатином) / δ_0 , % |
|------------------------------|----------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 169/157 | TPU 95A | 127.5/25 | 191.3 | 148.5 | 39.7 / 41.2 |
| 183/171 | TPU 95A | 120.8/25 | 193.1 | 145.4 | 43.3 / 41.2 |
| 187/175 | PLA | 118/25 | 191.3 | 136.5 | 49.1 / 32 |
| 188/176 | PLA | 117.6/25 | 191.3 | 135 | 50.2/ 32 |
| 168/156 | TPU 95A | 192.6/38.5 | 193.1 | 123 | 59.4 / 59.6 |
| 182/170 | TPU 95A | 194.7/38.5 | 193.1 | 121.5 | 60.4 / 59.6 |
| 189/177 | PLA | 185.9/38 | 193.1 | 93 | 76.8/ 45,4 |
| 190/178 | PLA | 186.8/38 | 191.3 | 96 | 75.1/ 45,4 |
| 170/158 | TPU 95A | 267/52 | 191.3 | 90 | 77.9 / 73.6 |
| 181/169 | TPU 95A | 268.1/52 | 193.1 | 97 | 74.8 / 73.6 |
| 66/63 | PLA | 256.5/52 | 186.4 | 57.6 | 90.4 / 58.9 |
| 67/64 | PLA | 258/52 | 190.7 | 45 | 94.4 / 58.9 |
| 68/66 | PLA | 255.5/52 | 190.7 | 47 | 93.9 / 58.9 |

геометрическими параметрами. Для наглядности добавлены соответствующие линии тренда 1–4. Из рис. 2 (и табл. 1) видно, что добавление вязкого наполнителя в виде желатина (линия тренда 1) в случае метаматериала на основе PLA привело к увеличению показателя δ по сравнению с незаполненными образцами (линия тренда 3). При этом масса образцов увеличилась примерно в 3.5 раза, а показатель δ вырос в 1.6 раза. Добавление наполнителя к жесткой PLA-структуре уменьшает ее хрупкость, увеличивает плотность и приводит к увеличению сопротивления пробиванию ударником, но также сильно утяжеляет образец. Обратим внимание, что для ауксетического TPU 95A-образца с воздухом массой 67.9 г и толщиной 38.5 мм на скорости входа ударника 154.5 м/с был достигнут баллистический предел ($\delta = 100\%$, линия тренда 4). Заполнение гибких образцов желатином, который является практически несжимаемым, приводило к значительному уменьшению деформаций образца при пробивании и к снижению относительной потери энергии в 1.25 раза на фоне утяжеления образцов примерно в 3 раза (линия тренда 2). Это позволяет сделать вывод, что самыми эффективными по сопротивлению пробиванию ударником оказались гибкие и легкие образцы из TPU 95A пластика (термопластичного полиуретана), заполненные воздухом.

Рис. 3 иллюстрирует процесс пробивания ударником образцов из e-PLA и TPU 95A пластиков с желатином и воздухом для более высокой скорости входа ~190 м/с. Из рис. 3 видно, что для данного скоростного режима при заполнении желатином наиболее эффективным является ауксетик из PLA (линия тренда 1), а не из TPU 95A (линия тренда 2), как для 150 м/с. Однако

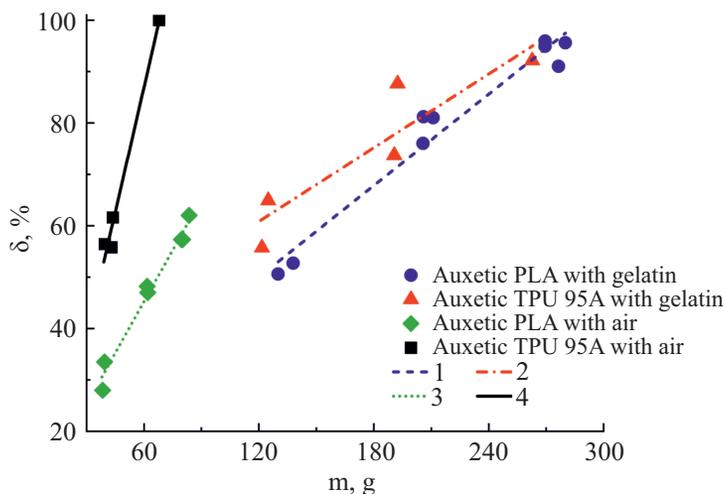


Рис. 2. Зависимость относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m образцов с желатином и воздухом для скорости входа ~ 150 м/с:

1 – Ауксетик PLA с желатином; 2 – Ауксетик TPU 95A с желатином;
3 – Ауксетик PLA с воздухом; 4 – Ауксетик TPU 95A с воздухом.

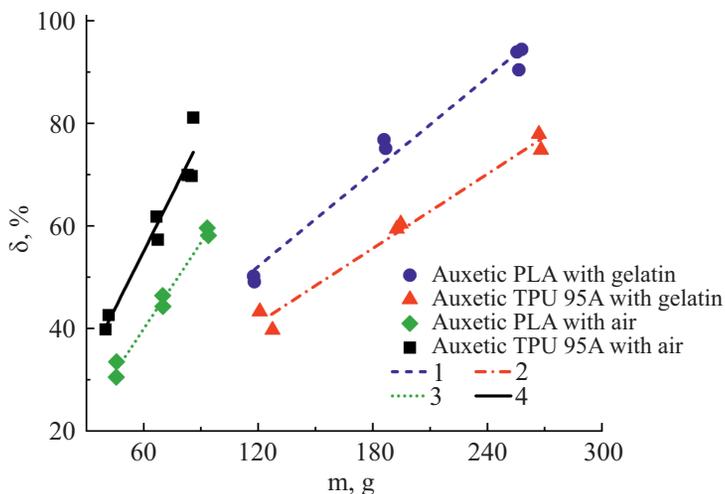


Рис. 3. Зависимость относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m образцов с желатином и воздухом для скорости входа ~ 190 м/с:

1 – Ауксетик PLA с желатином; 2 – Ауксетик TPU 95A с желатином;
3 – Ауксетик PLA с воздухом; 4 – Ауксетик TPU 95A с воздухом.

при заполнении воздухом сопротивление образцов из термопластичного полиуретана значительно выше, чем из PLA, так же, как и для скорости 150 м/с (линии 3, 4). Учитывая малую массу образцов с воздухом, также делаем вывод,

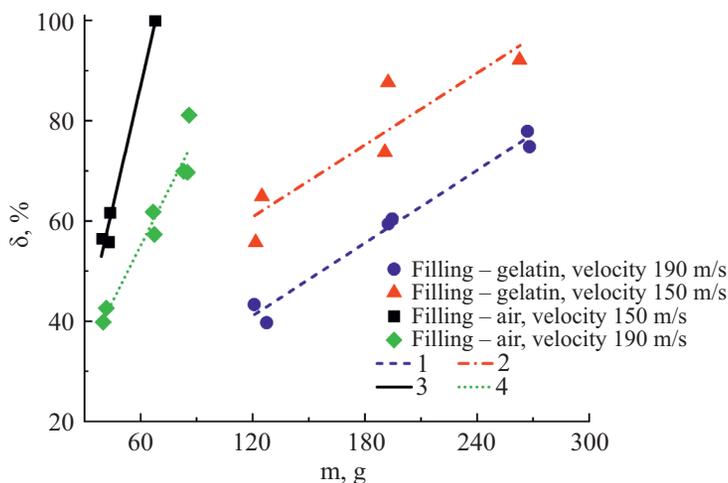


Рис. 4. Зависимость относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m образцов из TPU 95A с желатином и воздухом для скоростей входа ~ 150 и 190 м/с: 1 – Ауксетик TPU 95A с желатином, скорость 190 м/с; 2 – Ауксетик TPU 95A с желатином, скорость 150 м/с; 3 – Ауксетик TPU 95A с воздухом, скорость 150 м/с; 4 – Ауксетик TPU 95A с воздухом, скорость 190 м/с.

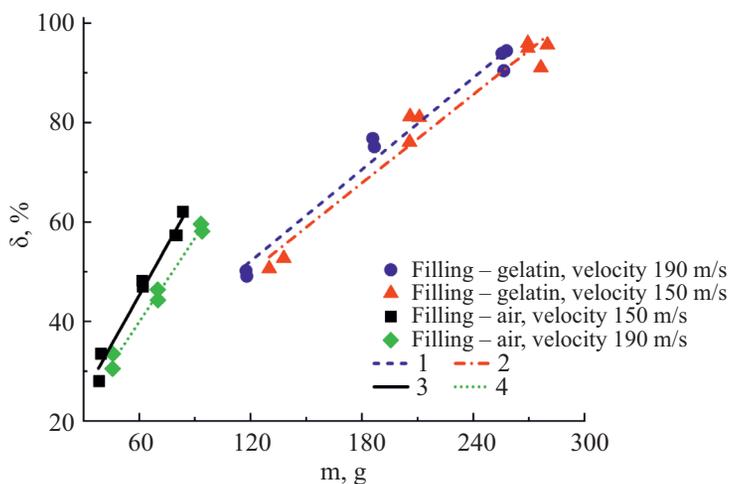


Рис. 5. Зависимость относительной потери кинетической энергии δ ударника от массы m образцов из PLA с желатином и воздухом для скоростей входа ~ 150 и 190 м/с: 1 – Ауксетик PLA с желатином, скорость 190 м/с; 2 – Ауксетик PLA с желатином, скорость 150 м/с; 3 – Ауксетик PLA с воздухом, скорость 150 м/с; 4 – Ауксетик PLA с воздухом, скорость 190 м/с.

что метаматериал на основе TPU 95A пластика с воздушным заполнением ячеек является наиболее эффективным по сопротивляемости пробиванию.

Зависимость относительной потери кинетической энергии от массы при двух скоростных режимах иллюстрируется также на рис. 4 (для образцов на

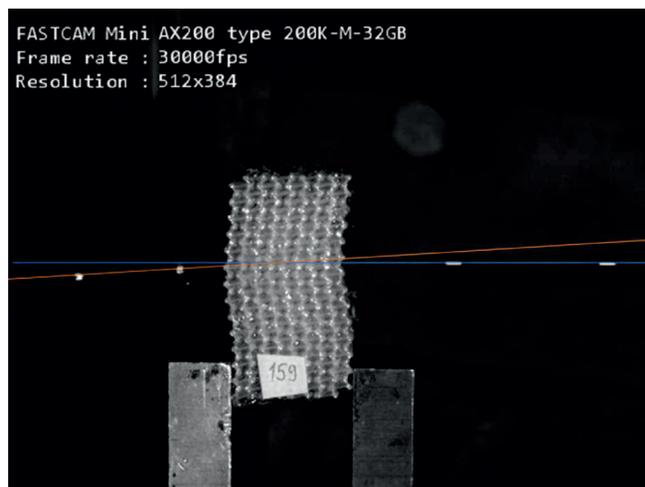


Рис. 6. Отклонение ударника вниз на вылете из образца (171/159).

основе TPU 95A) и на рис. 5 (для образцов на основе PLA). На всех рис. 2–5 видно, что наиболее сильный рост величины δ от массы m наблюдается для образцов с воздухом (линии 3, 4).

В ряде экспериментов с заполненными желатином хиральными образцами из TPU 95A фиксировалось отклонение направления движения ударника после вылета из образца. Так, в эксперименте 171/159 (см. табл. 1) наблюдалось отклонение ударника на вылете из образца вниз на 4° . Это показано на рис. 6 с помощью совмещения четырех кадров высокоскоростной камеры. Для наглядности добавлены линии, соединяющие положения центра ударника до и после взаимодействия с преградой.

Отклонение вверх на 1.5° было зафиксировано для эксперимента 184/172 (табл. 1). В большинстве случаев для заполненных желатином гибких образцов отклонение не наблюдалось (в отличие от заполнения их воздухом [15]).

Основные выводы по результатам проведенных экспериментов:

– В отличие от жестких метаматериалов на основе PLA, гибкие ауксеттики из термопластичного полиуретана TPU 95A при заполнении желатином не увеличивали, а снижали свою сопротивляемость пробиванию ударником.

– Для заполненных желатином образцов наблюдалась зависимость от подлетной скорости ударника: для скорости 150 м/с большее сопротивление оказывали ауксеттики на основе полиуретана, а для скорости 190 м/с – на основе PLA.

– По результатам проведенных экспериментов для двух скоростных режимов самыми эффективными по сопротивлению пробиванию ударником оказались гибкие и легкие образцы из TPU 95A пластика (термопластичного полиуретана), заполненные воздухом.

– Отмечен наиболее высокий рост сопротивляемости пробиванию при увеличении массы образца для заполненных воздухом ауксетиков из полиуретана.

– В большинстве случаев для заполненных желатином гибких образцов отклонение ударника на вылете не наблюдалось (в отличие от заполнения их воздухом).

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.* Ауксетика среди материалов с кубической анизотропией // Изв. 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 // Изв. 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 // 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.
<http://dx.doi.org/10.31857/S1026351924060114>

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/chgpru.2024.62.4.005> EDN: SFQXCI
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 // *Изв. РАН. МТТ*. 2025. № 1. С. 197–208.
<http://dx.doi.org/10.31857/S1026351925010108>
16. *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>
17. *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>
18. *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>
19. *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>
20. *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.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>
21. *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>
22. *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>
23. *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>
24. *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>

25. *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.
<http://doi.org/10.1134/S0025654424605159>
26. *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.
<http://doi.org/10.1134/S0025654424605640>

ON THE INFLUENCE OF VISCOUS FILLER ON THE IMPACT PENETRATION RESISTANCE OF FLEXIBLE METAMATERIALS WITH AUXETIC PROPERTIES

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

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

**E-mail lisovenk@ipmnet.ru*

Abstract. The properties of flexible metamaterials with negative Poisson's ratio (with auxetic structure based on a concave hexagonal cell) to resist normal punching by a rigid spherical impactor were experimentally investigated. Samples with a chiral structure fabricated using a 3D printer and made from thermoplastic polyurethane (TPU 95A plastic), with cells filled with air or gelatin were compared for their ability to reduce the kinetic energy of impactors. The experiments were conducted for two velocity regimes. It was found that gelatin filling of auxetic chiral samples made of TPU 95A plastic (in contrast to previously investigated rigid metamaterials based on PLA plastic) does not lead to enhancement of protective properties. According to the results of the experiments conducted for two speed modes, the most effective in terms of resistance to penetration by the impactor were flexible and lightweight samples made of thermoplastic polyurethane filled with air.

Keywords: metamaterials, auxetics, experimental studies, penetration, rigid impactors

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. No. 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. *Gorodcov V.A., Lisovenko D.S.* Auxetics among materials with cubic anisotropy // *Bulletin of the RAS. Mechanics of Solids.* 2020. № 4. P. 7–24. <https://doi.org/10.31857/S0572329920040054>
6. *Shitikova M.V.* Fractional Operator Viscoelastic Models in Dynamic Problems of Mechanics of Solids: A Review // *Mechanics of Solids.* 2022. № 1. P. 1–33. <https://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 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 // *Mechanics of Solids.* 2023. № 2. P. 524–528. <https://doi.org/10.31857/S0572329922600773>
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 // *Mechanics of Solids.* 2023. № 5. P. 1536–1544. <https://doi.org/10.31857/S0572329923600366>
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 // *Mechanics of Solids.* 2024. № 4. P. 1967–1972.
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 influence of viscous filler on the mechanical properties of metamaterials with negative and positive Poisson's ratio when penetrated by a rigid impactor // *Bulletin of I.Y. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State.* 2024. № 4 (62). P. 62–75. <https://doi.org/10.37972/chgpu.2024.62.4.005> EDN: SFQXCI
15. *Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu., Banichuk N.V., Lisovenko D.S.* Effect of temperature of metamaterials based on flexible TPU 95A plastic on resistance to penetration by a rigid impactor // *Mechanics of Solids.* 2025. № 1. <https://doi.org/10.1134/S0025654424606797>
16. *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>

17. *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>
18. *Skripnyak V.V., Chirkov M.O., Skripnyak V.A.* Modeling of mechanical response of auxetic metamaterials to dynamic impacts // *PNRPU Bulletin. Mekhanika*. 2021. № 2. P. 144–152.
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.2.13>
19. *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>
20. *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.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>
21. *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>
22. *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>
23. *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>
24. *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>
25. *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>
26. *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>