

УДК 531.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АУКСЕТИЧЕСКИХ
И НЕАУКСЕТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ИЗ МЕТАЛЛА
ПРИ ПРОНИКАНИИ В НИХ ЖЕСТКИХ УДАРНИКОВ**

© 2023 г. С. Ю. Иванова^а, К. Ю. Осипенко^а, В. А. Кузнецов^а, Н. Г. Соловьев^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 10.10.2022 г.

После доработки 18.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Экспериментально изучались свойства металлических сотовых метаматериалов, имеющих различную внутреннюю структуру при пробивании по нормали жестким сферическим ударником. Проведенные эксперименты с металлическими образцами метаматериалов с отрицательным коэффициентом Пуассона (ауксетиков), показали большее сопротивление прониканию ударников, чем эксперименты с металлическими образцами, имеющими сотовую структуру с положительным коэффициентом Пуассона.

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

DOI: 10.31857/S0572329922600773, EDN: DHLUFH

При проектировании новых метаматериалов для механических конструкций важно удовлетворять ряду требований, диктуемых экономией места, снижением веса и стоимости производства и пр. Одной из важных эксплуатационных характеристик элементов конструкций является устойчивость к пробиванию ударником. Данная работа посвящена экспериментальному изучению сопротивляемости пробиванию жестким ударником ячеистых структур из металла (метаматериалов). Исследуется влияние таких структур на глубину проникания жесткого сферического ударника. Дано сравнение результатов для сотовых структур с положительным коэффициентом Пуассона и отрицательным коэффициентом Пуассона.

Таблица 1. Толщина и масса образцов, а также значения скорости входа для каждого образца

Номер эксперимента	Рисунок	Структура образца	Толщина, мм	Масса, г	Скорость входа, м/с
1	2а	ауксетик	52	685	282
2	2б	неауксетик	55	550	283
3	3а, б (слева)	неауксетик	55	545	281
4	3а, б (справа)	ауксетик	37	490	280
5	4	сплошная пластина	5	477	281

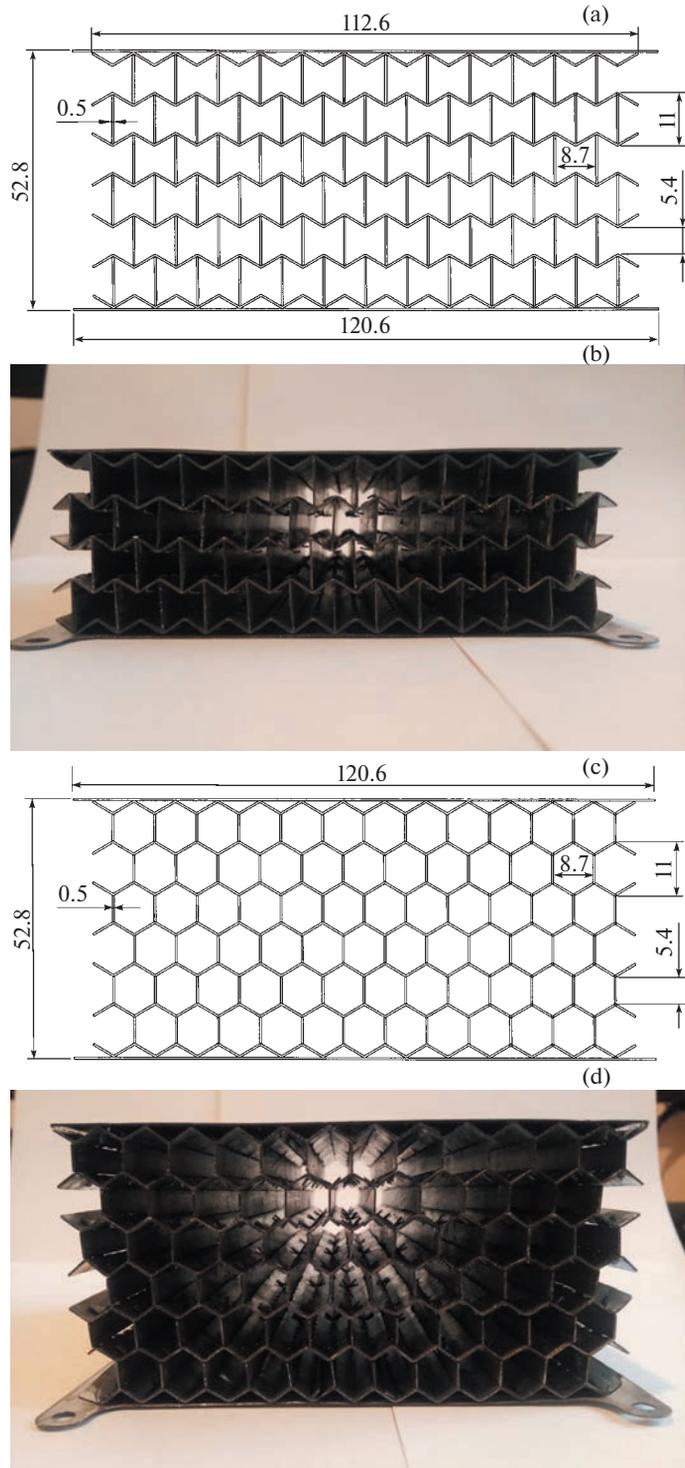


Рис. 1. Внутренняя структура образцов метаматериалов и их геометрические размеры в мм: (а), (b) – акустический; (с), (d) – неакустический сотовые образцы.

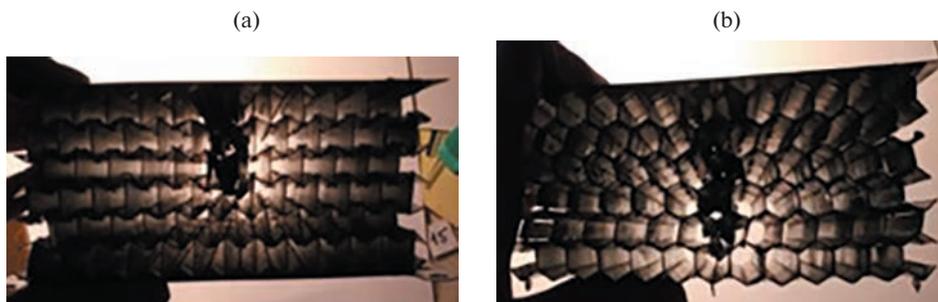


Рис. 2. Проникание ударника в ауксетический (а) и неауксетический (б) сотовые образцы в экспериментах № 1 и № 2.

В отличие от обычных материалов с положительным коэффициентом Пуассона для ауксетических материалов (материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона) продольное растяжение приводит к поперечному расширению [1–7]. Ауксетики имеют более высокое сопротивление индентированию по сравнению с обычными материалами. Можно предположить, что данный факт может способствовать увеличению сопротивления пробиванию ударником непосредственно в месте удара, что делает ауксетики перспективными для создания ударо- и энергопоглощающих конструкций.

С целью проверки такого предположения была проведена серия экспериментов. Для экспериментов с помощью лазерной технологии из листовой оцинкованной ста-

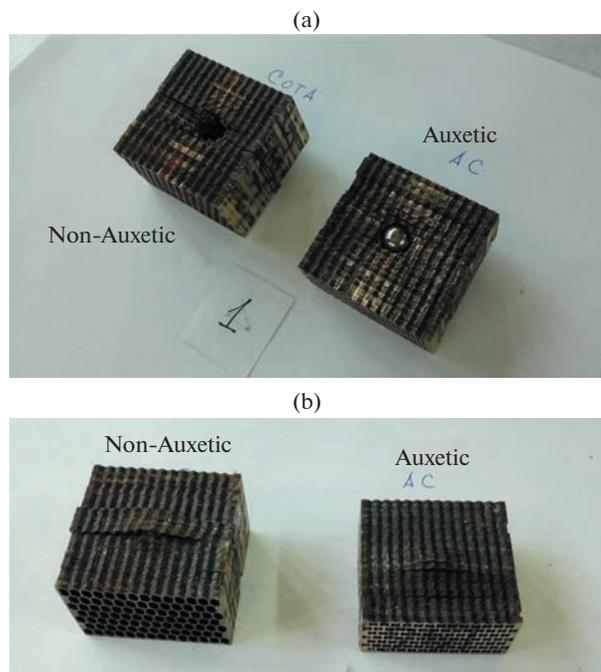


Рис. 3. Проникание ударника в неауксетический образец (слева) и ауксетик (справа) в экспериментах № 3 и № 4: (а) – вход, (б) – выход.



Рис. 4. Сплошная пластинка из стали после удара (эксперимент № 5).

ли толщиной 0.5 мм были изготовлены образцы метаматериала с ячеистой ауксетической структурой на основе вогнутого шестиугольника (рис. 1a,b). Для сравнения были изготовлены также образцы с сотовой внутренней структурой, не обладающей ауксетическими свойствами (рис. 1c,d). Элементом такой конструкции являлся выпуклый шестиугольник.

Пробивание образцов осуществлялось стальным сферическим ударником, имеющим диаметр 9.95 мм и массу 3.53 г. Образцы устанавливались на 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 280 м/с. Скорость ударника на вылете из ствола пушки принималась за скорость входа в преграду, 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”. Данные серии экспериментов приведены в табл. 1. Боковая сторона образцов, которая подвергалась удару, во всех случаях имела размеры 100 · 120 мм и закрывалась ровной металлической пластинкой толщиной 0.5 мм тех же размеров.

На рис. 2a,b представлены фотографии образцов после проникновения ударника в экспериментах № 1 и № 2. Толщина пробиваемого ауксетического образца была 52.5 мм, неауксетического сотового – 55 мм (толщины были примерно одинаковыми, насколько это позволяли условия изготовления). Массы составляли 685 г и 550 г соответственно. Из рис. 2 видно, что глубина проникновения ударника в ауксетический образец (рис. 2,a) меньше, чем в неауксетический сотовый (рис. 2b). Скорость входа ударника была, соответственно, равна 282 и 283 м/с.

На рис. 3 представлены неауксетический сотовый образец и ауксетик после воздействия ударником со скоростью входа 281 м/с и 280 м/с соответственно (эксперименты № 3 и № 4). Образцы, представленные на рис. 3, были изготовлены методом лазерной резки из листовой латуни толщиной 2 мм с последующей спайкой слоев оловянно-свинцовым припоем. В этих экспериментах были выравнены, на сколько это было технологически возможно, значения массы образцов. Видно, что и в этом случае глу-

бина проникания ударника в ауксетический образец меньше, чем в неауксетический сотовый.

Для сравнения был проведен эксперимент № 5 по пробиванию примерно эквивалентной по массе (477 г) сплошной стальной пластинки с размерами $100 \cdot 120$ мм толщиной 5 мм. На скорости вылета 281 м/с пластинка не была пробита (рис. 4), что говорит о ее большей эффективности как защиты от пробивания. Но если для функционирования конструкции нужна именно ячеистая структура, то эффективнее против пробивания будет работать именно ауксетик.

Проведенные эксперименты показали преимущество ауксетической структуры металлических образцов перед неауксетической сотовой при высокоскоростном внедрении жесткого сферического тела.

Работа выполнена по темам госзадания ИПМех РАН (номера госрегистрации 123021700045-7, 123021700050-1, 123021700057-0).

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 // 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. *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>