

С. Ю. Иванова, К. Ю. Осипенко, Н. В. Баничук, Д. С. Лисовенко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ И ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУАССОНА ПРИ ПРОБИВАНИИ ЖЕСТКИМ УДАРНИКОМ

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

**Аннотация.** Проведены эксперименты по пробиванию сферическим жестким ударником образцов метаматериалов на основе e-PLA пластика, изготовленных с помощью 3D принтера. Образцы со структурой на основе ячеек в виде вогнутого шестиугольника обладали отрицательным коэффициентом Пуассона (ауксетики) и сравнивались с неауксетиками с обычной сотовой структурой в виде выпуклого шестиугольника по способности сопротивляться пробиванию. Рассматривались в том числе структуры, обладающие хиральностью. Эксперименты проводились в условиях воздушного наполнения ячеек структуры и наполнения желатином. Установлен факт существенного повышения сопротивляемости пробиванию при заполнении желатином ауксетических хиральных образцов по сравнению с заполненными хиральными неауксетиками. Для хиральных метаматериалов с желатином фиксировалось отклонение направления движения ударника после вылета из пробиваемого образца.

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

**Иванова Светлана Юрьевна**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории механики и оптимизации конструкций; e-mail: ivanova@ipmnet.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5096-2759>; AuthorID: 146039

**Осипенко Кирилл Юрьевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики и оптимизации конструкций; e-mail: osipenko@ipmnet.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9653-1831>; AuthorID: 16440

**Баничук Николай Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией механики и оптимизации конструкций; e-mail: banichuk@ipmnet.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0652-0934>; AuthorID: 8002

**Лисовенко Дмитрий Сергеевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией механики технологических процессов; e-mail: lisoventk@ipmnet.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0485-3433>; AuthorID: 167930

**для цитирования:** 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. DOI: 10.37972/chgpu.2024.62.4.005 EDN: SFQXCI

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

© Иванова С. Ю., Осипенко К. Ю., Баничук Н. В., Лисовенко Д. С. 2024

Поступила: 01.10.24; принята в печать: 10.12.24; опубликована: 27.12.24.

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

## 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

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

**Abstract.** Experiments were performed on the penetration of metamaterial samples based on e-PLA plastic, prepared using a 3D printer, by a spherical rigid striker. Samples with a structure based on cells in the form of a concave hexagon had a negative Poisson's ratio (auxetics) and were compared with non-auxetics with a conventional honeycomb structure in the form of a convex hexagon in terms of their ability to resist penetration. Structures with chirality were also considered. Experiments were conducted under conditions of air filling of the structure cells and filling with gelatin. The fact of a significant increase in resistance to penetration was established when auxetic chiral samples were filled with gelatin compared to those filled with chiral non-auxetics. For chiral metamaterials with gelatin, a deviation in the direction of the striker's movement after leaving the sample being penetrated was recorded.

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

**Svetlana Yu. Ivanova**, Cand. Sci. Phys. & Math., Leading Researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS;

<https://orcid.org/0000-0001-5096-2759>; AuthorID: 146039

**Kirill Yu. Osipenko**, Cand. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS;

<https://orcid.org/0000-0001-9653-1831>; AuthorID: 16440

**Nikolay V. Banichuk**, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Head of Laboratory, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS;

<https://orcid.org/0000-0002-0652-0934>; AuthorID: 8002

**Dmitry S. Lisovenko**, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor RAS, Head of Laboratory, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS; e-mail: [lisovenk@ipmnet.ru](mailto:lisovenk@ipmnet.ru);

<https://orcid.org/0000-0003-0485-3433>; AuthorID: 167930

**to cite this article:** 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. No 4(62). p. 62–75. DOI: 10.37972/chgpu.2024.62.4.005 EDN: SFQXCI

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)*

*Received: 01.10.24;*

*accepted: 10.12.24;*

*published: 27.12.24.*

**Введение.** Данная работа является продолжением опубликованных ранее статей [1–3] и посвящена экспериментальному изучению сопротивляемости пробиванию жестким ударником ячеистых структур (метаматериалов), обладающих ауксетическими и (для сравнения) неауксетическими свойствами. В [1] был сделан вывод о том, что металлические образцы, обладающие ауксетической ячеистой структурой на основе вогнутого шестиугольника, оказывали большее сопротивление пробиванию сферическим ударником, чем образцы, структура которых была обычной сотовой (на основе выпуклого шестиугольника). А в [2] было продемонстрировано, что при пробивании хиральных ауксетических метаматериалов наблюдалось отклонение направления движения ударника после вылета из пробиваемого образца от подлетного направления. Основываясь на результатах работ, например, [1–11] можно сказать, что ауксетики могут быть перспективными для создания ударо- и энергопоглощающих конструкций.

В данной работе аналогичное сравнение проводилось для образцов из другого материала (пластика e-PLA, изготовленных с помощью 3D принтера) в условиях воздушного наполнения ячеек структуры и наполнения их вязким веществом (желатином). Изучалось влияние ауксетических свойств рассматриваемых образцов метаматериалов на относительную потерю кинетической энергии ударника по сравнению с неауксетическими образцами той же массы. При этом главная цель исследований заключалась в определении влияния вязкого наполнения структур из пластика e-PLA на сопротивляемость внедрению жестких ударников. Эксперименты проводились в том числе и для образцов с хиральной структурой на основе вогнутого или выпуклого шестиугольников. Изучалась способность хиральных ячеистых структур отклонять внедряющийся ударник от первоначального направления движения.

**1. Пробивание ауксетических и неауксетических ячеистых структур из пластика e-PLA.** Для проведения сравнительных экспериментов по пробиванию ауксетических и неауксетических структур с помощью 3D принтера были изготовлены образцы из пластика e-PLA (см. рис. 1, 2) толщиной  $H \sim 29$  мм. Образцы закреплялись в штативе и простреливались стальным сферическим ударником по нормали к боковой поверхности, имеющей размеры  $70 \times 71$  мм. Ударник массой 4.06 г и диаметром 10 мм разгонялся пневматической пушкой и входил без вращения в преграду. Для первых экспериментов давление в камере пушки выставлялось таким образом, чтобы скорость вылета ударника, как и в [2], составляла приблизительно 240 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 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

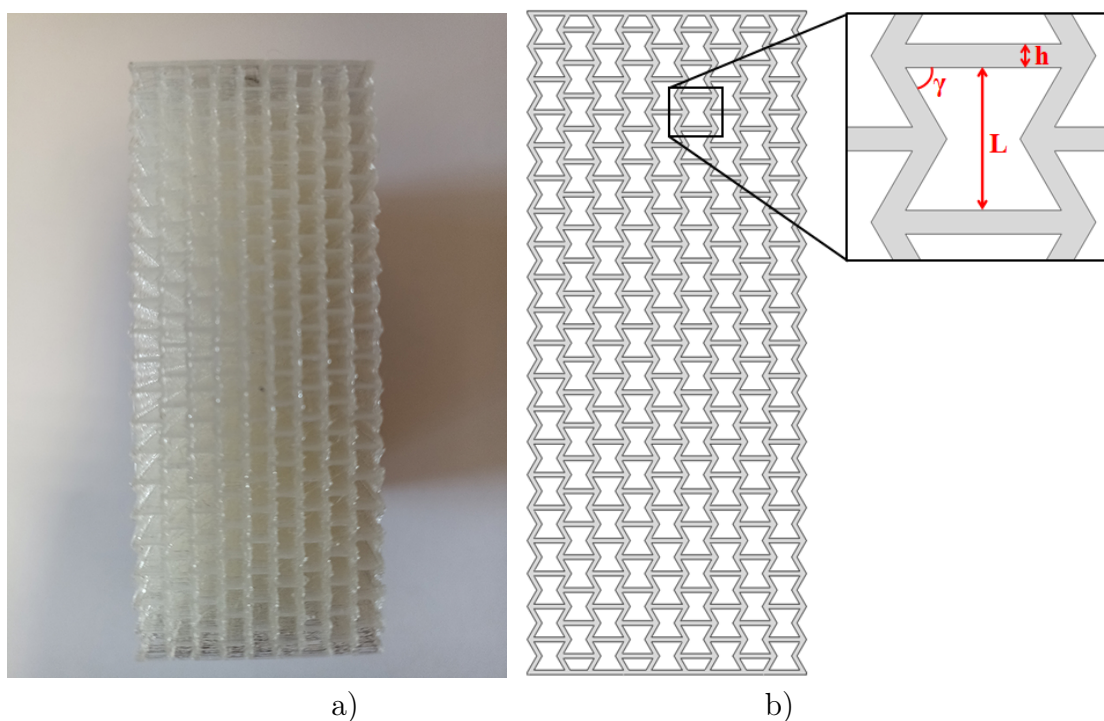


Рис. 1. Ауксетический (АС) образец из пластика e-PLA: (а) напечатанный на 3D-принтере; (б) 3D модель –  $L = 3$  мм,  $h = 0.5$  мм,  $\gamma = 60^\circ$ .

справа налево. Она применялась также для определения скорости вылета ударника из преграды.

Номер эксперимента/образца	Структура материала	Масса образца, г	Скорость входа ударника, $v_1$ , м/с	Скорость выхода ударника, $v_2$ , м/с	$\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$ , %
3/1	АС	44	240	207	25.6
4/3	сотовая	45.4	236.3	198	29.8
5/2	АС	43.6	220	184.3	29.8
6/5	сотовая	44.9	225	187.5	30.5

Таблица 1. Пробивание образцов на скорости 240-220 м/с (результаты экспериментов).

Образец, представленный на рис.1а, имеет ауксетическую (АС) структуру, характеризующуюся ячейками на основе вогнутого шестиугольника (схематичное изображение на рис.1б). На рис.2а показан неауксетический (сотовый) образец

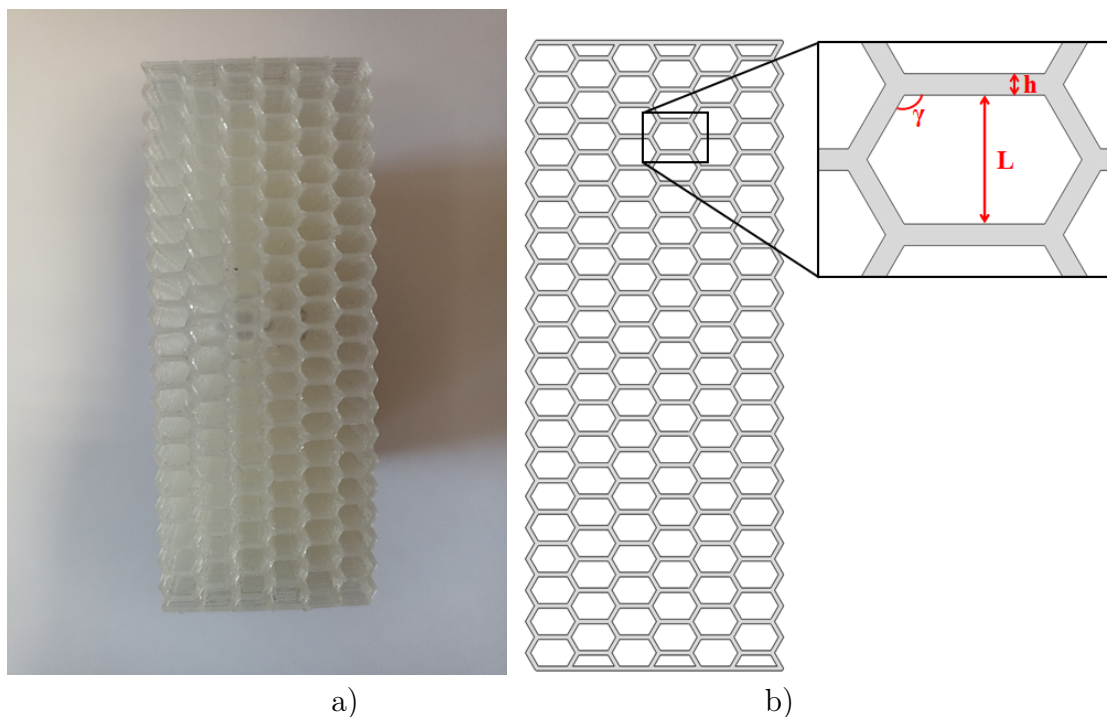


Рис. 2. Неауксетический (сотовый) образец из пластика e-PLA: (а) напечатанный на 3D-принтере; (б) 3D модель –  $L = 3$  мм,  $h = 0.5$  мм,  $\gamma = 120^\circ$ .

метаматериала, ячейки которого представляют собой в плане выпуклый шестиугольник (схема представлена на рис.2б). Целью экспериментов было установить, как влияет внутренняя структура метаматериала на сопротивляемость движению ударника при пробивании образцов. Результаты серии экспериментов приведены в таблице 1.

Из приведенных в таблице 1 данных видно, что все испытанные образцы имели приблизительно одинаковые массы и отличались только своей внутренней структурой. В указанном диапазоне скоростей относительная потеря кинетической энергии ударника  $\delta$  при пробивании образцов практически не зависела от их внутренней структуры. В таблице 2 приведены данные экспериментов по пробиванию аналогичных образцов со скоростью входа ударника порядка 140-150 м/с.

Как можно видеть из таблицы 2, образцы, обладающие обычной сотовой структурой метаматериала, оказывали большее сопротивление пробиванию при снижении скорости полета ударника. Поворот структуры ауксетика в образце на  $90^\circ$  (рис. 3) незначительно изменил его параметры (толщина  $H = 28.5$  мм, боковая поверхность  $70 \times 73$  мм, масса  $m = 44.3$  г) и привел к небольшому росту показателя  $\delta$  (см. таблицу 2).

Номер эксперимента/ образца	Структура мета-материала	Скорость входа ударника, $v_1$ , м/с	Скорость выхода ударника, $v_2$ , м/с	$\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$ , %
8/4	АС	146	120	32.4
9/6	сотовая	143.6	102	49.5
10/8	АС	139.6	114	33.3
11/7	сотовая	143.1	103.8	47.3

Таблица 2. Пробивание образцов на скорости 140-150 м/с (результаты экспериментов).

Номер эксперимента/ образца	Структура мета-материала	Скорость входа ударника, $v_1$ , м/с	Скорость выхода ударника, $v_2$ , м/с	$\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$ , %
12/12	АС+90°	147.7	118.1	36
13/14	АС+90°	144	114	37.3

Таблица 3. Пробивание ауксетических образцов с поворотом структуры на 90° (результаты экспериментов).

Номер эксперимента/ образца	Структура мета-материала	Масса образца, г	Скорость входа ударника, $v_1$ , м/с	Скорость выхода ударника, $v_2$ , м/с	$\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$ , %
14/9	сотовая	151.2	143.6	80.6	68.5
15/10	сотовая	150	141.4	79	68.8
16/11	АС	153.1	147.3	97.5	56.2
17/13	АС	153.9	147	96	57.4
18/15	АС+90°	153.6	145.5	90	61.7
19/16	АС+90°	154.9	147	90	62.5

Таблица 4. Пробивание образцов из пластика e-PLA, заполненных желатином (результаты экспериментов).

**2. Пробивание ауксетических и неауксетических структур, заполненных желатином.** Как можно заметить из предыдущего раздела, ауксетические образцы из жесткого и достаточно хрупкого PLA пластика в отличие от металлических образцов [1] не имели преимуществ по сравнению с сотовыми образцами при пробивании в различных диапазонах скоростей ударников. С научной и практической стороны интересен ответ на вопрос, как повлияет

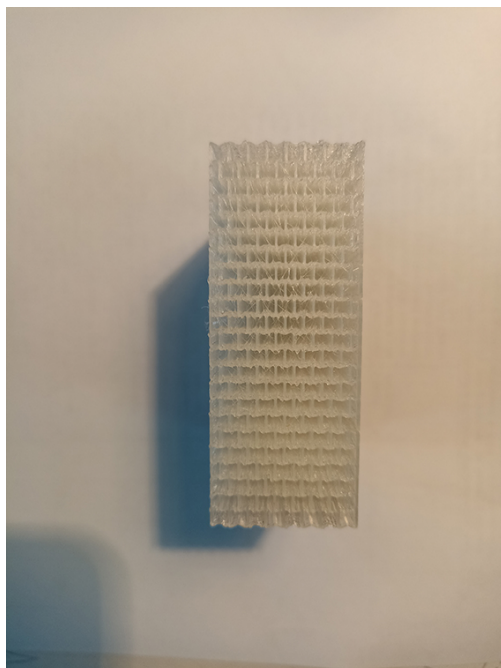


Рис. 3. Ауксетический образец из пластика e-PLA с поворотом структуры метаматериала на  $90^\circ$  (AC+ $90^\circ$ ).

на свойства метаматериалов при пробивании заполнение ячеек каким-либо вязким веществом. Для проведения серии сравнительных экспериментов образцы, аналогичные описанным в разделе 1, были заполнены пищевым желатином, приготовленным из расчета 50 г желатина на 500 г воды. Массы полученных образцов были примерно одинаковы. Результаты экспериментов представлены в таблице 4.

Данные из таблиц 2–4 позволяют сделать вывод, что для всех проведенных экспериментов по пробиванию ауксетических образцов из e-PLA пластика показатель относительной потери энергии ударника  $\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$  был ниже, чем при пробивании образцов, обладающих сотовой структурой. Однако, видно, что заполнение образцов желатином привело к уменьшению разницы в значениях показателя  $\delta$  между ауксетическими и сотовыми структурами.

**3. Пробивание хиральных ауксетических и неауксетических структур на основе выпуклого и вогнутого шестиугольника.** В [2] экспериментально исследовалось пробивание образцов из e-PLA пластика, обладающих хиральной структурой, образованной элементами в виде спиралевидных звездочек. При этом было установлено, что ударник на вылете из образца отклоняется от своего подлетного направления вверх или вниз в зависимости от направления закрутки этих элементов по или против часовой стрелки. В недавно опубликованной статье [3] представлены результаты экспериментов по

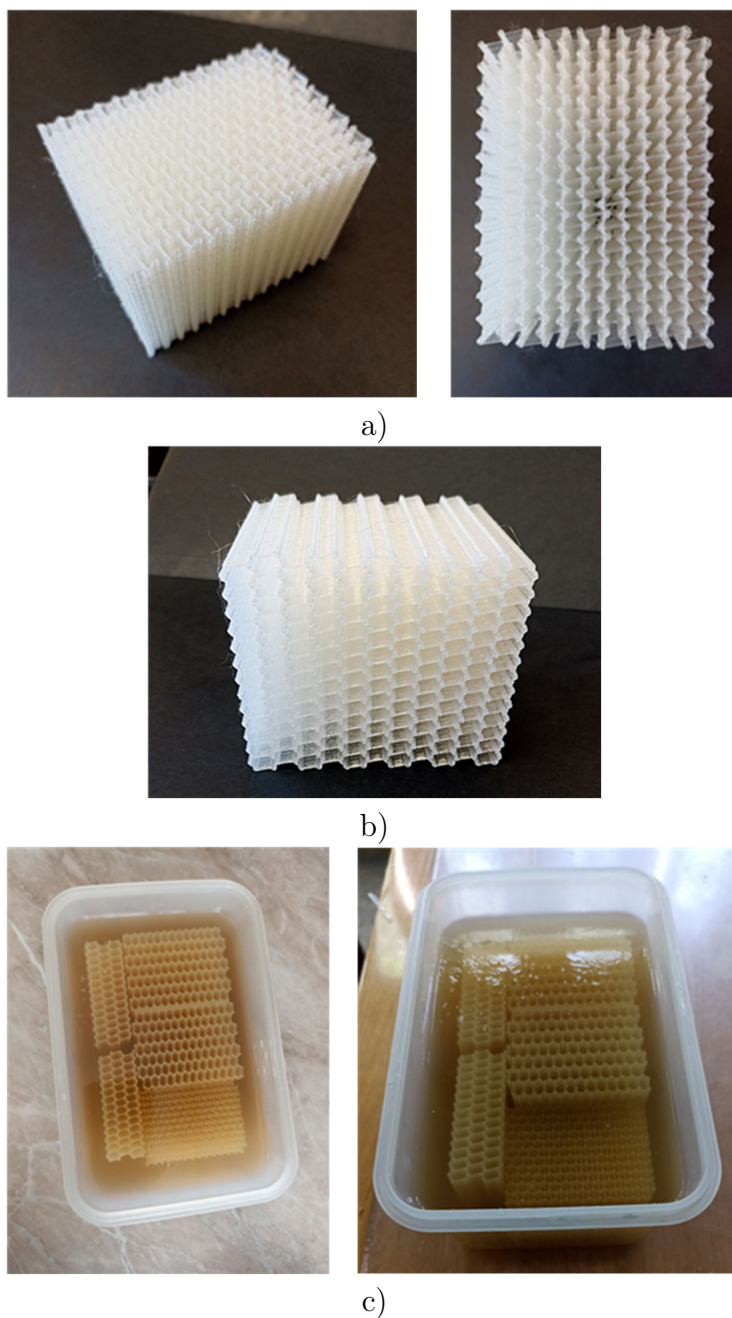
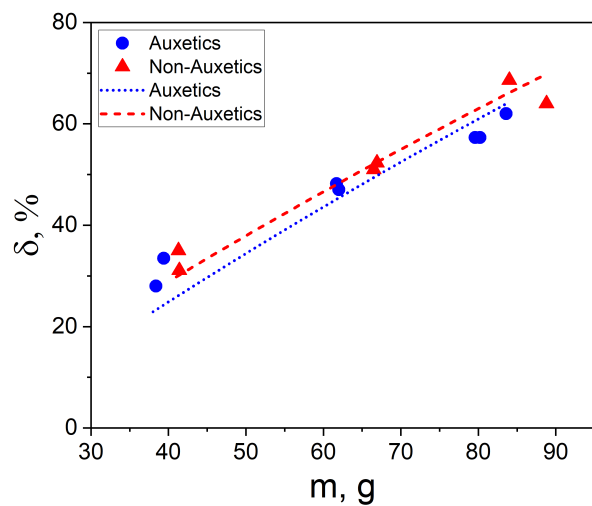


Рис. 4. Образцы метаматериалов с хиральной структурой: а) ауксетический (АС); б) неауксетический (сотовый); в) подготовленные образцы с желатином.

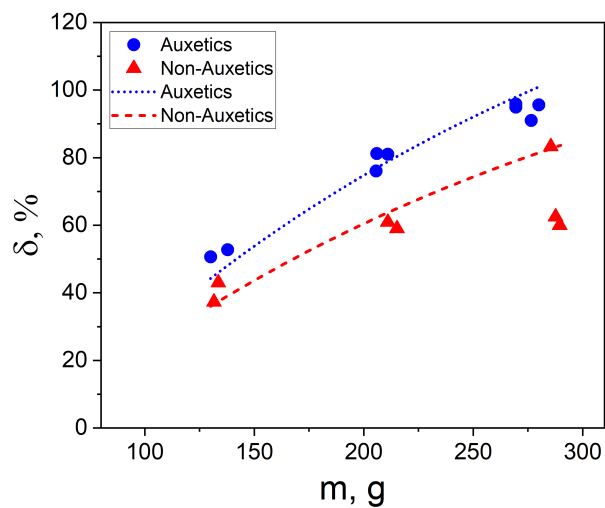
пробиванию образцов с хиральной структурой на основе вогнутого (АС) или выпуклого (сотовый) шестиугольника. При этом для каждой пары сравнительных экспериментов были подготовлены приблизительно одинаковые по массе



ауксетический и неауксетический хиральные образцы, как с воздушным наполнением, так и заполненные желатином (рис. 4).



a)



b)

Рис. 5. Зависимость относительной потери кинетической энергии ударника  $\delta$  [%] от массы  $m$  [г] пробиваемых образцов: с заполнением ячеек воздухом (а) и желатином (b).

В [3] в двух таблицах приведены экспериментально определенные скорости сферического ударника  $v_1$  на входе и  $v_2$  на выходе из хиральных PLA-образцов

как с воздушным заполнением ячеек, так и заполненных желатином. Температура образцов в экспериментах была  $\sim 16^\circ\text{C}$ . На рис. 5а,б представлены экспериментальные данные из [3] зависимости относительной потери кинетической энергии ударника  $\delta = (v_1^2 - v_2^2)/v_1^2$  (%) от массы  $m$  (г) пробиваемых образцов с воздухом (а) и желатином (б). Рис. 5б показывает преимущество защитных свойств хиральной ауксетической структуры по сравнению с сотовой в случае заполнения ячеек вязким наполнителем (желатином). Кривые на рис. 5а,б характеризуют зависимость  $\delta = \delta(m)$ , полученную в результате приближенного оценивания скорости выхода ударника по аналогии с расчетной моделью, примененной в статье [2]. Для приближенного оценивания сопротивляемости пробиванию рассматриваемых образцов с ауксетической структурой и прогнозирования скорости выхода ударника предлагается использовать хорошо известную двучленную формулу для зависимости силы сопротивления среды  $D$  от скорости внедряющегося цилиндрического тела  $v = v(x)$  [12, 13]

$$D = -\pi R^2 (A_0 + \kappa A_2 v^2), \quad 0 \leq x \leq H. \quad (1)$$

Здесь  $R$  – радиус ударника,  $\kappa$  – коэффициент, характеризующий форму головной части цилиндрического ударника [13–15],  $x$  – координата, отсчитываемая в направлении движения тела от крайней точки образца (точки входа),  $H$  – толщина образца, а заданные константы  $A_0$  и  $A_2$  характеризуют, соответственно, прочностные и инерционные свойства среды. Как и в работе [2] будем считать, что на первом этапе пробивания образца ( $x \in [0, l]$ ) параметры, характеризующие его прочностные и инерционные свойства, остаются постоянными. На втором этапе ( $x \in [l, H]$ ) они линейно уменьшаются до нуля в момент вылета ударника из образца:

$$a_0(x) = \frac{A_0}{H-l}(H-x), \quad a_2(x) = \frac{A_2}{H-l}(H-x). \quad (2)$$

Такой подход основан на наблюдении, что все простреленные образцы из исследуемых метаматериалов на основе PLA-пластика имели конический кратер (каверну) на тыльной стороне. При этом размер кратера (его глубина и ширина) были примерно одинаковы у всех образцов вне зависимости от их толщины. В данном случае для хиральных образцов на основе шестиугольной внутренней структуры глубина кратера была равна двум диаметрам сферического ударника. Из второго закона Ньютона для первого этапа внедрения ударника массы  $M$  имеем уравнение, описывающее изменение скорости тела в сопротивляющейся среде, и начальное условие в виде

$$\frac{dv^2}{dx} = -(\alpha A_0 + \beta A_2 v^2), \quad 0 \leq x \leq l, \quad (3)$$

$$(v^2)_{x=0} = v_1^2. \quad (4)$$

Здесь введены обозначения

$$\alpha = \frac{2\pi R^2}{M}, \quad \beta = \frac{2\pi R^2 \kappa}{M}.$$

Скорость ударника на втором участке определим из решения следующей краевой задачи:

$$\frac{dv^2}{dx} = -(\alpha a_0 + \beta a_2 v^2), \quad l \leq x \leq H, \quad (5)$$

$$(v^2)_{x=l} = v_l^2, \quad (6)$$

где скорость  $v_l = v(l)$  определяется из решения задачи (3)-(4) и принимается в качестве начальной скорости входа на втором этапе внедрения. Опуская элементарные выкладки, получим выражение для квадрата скорости ударника на выходе из преграды в виде

$$v_2^2 = \left( \frac{A_0}{\kappa A_2} + v_0^2 \right) \exp \left( -\frac{l+L}{2} \beta A_2 \right) - \frac{A_0}{\kappa A_2}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что в рассматриваемом случае  $l = H - 4R$ ,  $\kappa = 0.5$  для сферического ударника и обозначая через  $S_0$  площадь боковой (ударной) поверхности образца, получим следующее выражение для зависимости величины  $\delta$  от массы образца  $m$

$$\delta = \delta(m) = \left( 1 + \frac{2A_0}{A_2 v_1^2} \right) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\beta m}{S_0} + 2R\beta A_2 \right) \right]. \quad (8)$$

Расчетные кривые (точечные линии для ауксетика и штриховые линии для неауксетика) на рис. 5а,б построены для экспериментально определенных средних значений постоянных параметров  $A_0$  и  $A_2$  для каждого типа рассматриваемых хиральных структур и скорости входа ударника 150 м/с. Видно, что аналитическая оценка энергетических потерь при пробивании лучше соответствует экспериментальным данным для больших толщин (масс) образцов, а при небольших толщинах является заниженной.

В условиях проведенных экспериментов отклонение направления движения ударника после пробивания образцов с рассматриваемым видом хиральности (в отличие от хиральных звездчатых структур (hexachiral honeycomb) из [2]) было незначительным, наблюдалось не всегда и только для образцов с заполнением желатином.

**4. Некоторые замечания и выводы.** Преимущество в сопротивляемости пробиванию АС-образцов перед сотовыми неауксетическими, установленное ранее для металлических структур в [1], в случае воздушного заполнения ячеек метаматериала из PLA в проведенных экспериментах выявлено не было. Это, возможно, связано с особенностями разрушения более хрупкого пластика по сравнению с металлом и может быть предметом для дальнейшего изучения.

Заполнение ячеек желатином без добавления хиральности в структуру метаматериала из PLA приводит к уменьшению преимуществ сотовых образцов перед ауксетическими. При наличии хиральности в структуре метаматериала с желатином проведенные эксперименты показали лучшую сопротивляемость АС-образцов из e-PLA пластика по сравнению с неауксетическими хиральными образцами той же массы при пробивании жестким сферическим телом. При проведении исследований было установлено, что заполнение ячеек АС-структуры метаматериала из PLA-пластика вязким наполнителем в целом усиливает его ауксетические свойства. Представляет интерес проверить этот факт в дальнейшем для АС-конструкций из металла и других материалов.

Авторы выражают благодарность А.И. Демину за помощь в подготовке 3D моделей образцов.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** С. Ю. Иванова проведение экспериментов, написание текста рукописи, согласование финальной версии рукописи, К. Ю. Осипенко проведение экспериментов, редактирование текста рукописи, Н. В. Баничук редактирование текста рукописи, согласование финальной версии рукописи, Д. С. Лисовенко подготовка образцов для эксперимента, редактирование текста рукописи, согласование финальной версии рукописи.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Работа выполнена по темам Госзадания (номера государственной регистрации 124012500437-9, 124013000674-0).

### ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** S. Yu. Ivanova conducting experiments, writing the text of the manuscript, agreeing on the final version of the manuscript, K.Y. Osipenko conducting experiments, editing the text of the manuscript, N. V. Banichuk editing the text of the manuscript, agreeing on the final version of the manuscript, D. S. Lisovenko preparing samples for the experiment, editing the text of the manuscript, agreeing on the final version of the manuscript.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding.** The work was carried out on the topics of the State Assignment (state registration numbers 124012500437-9, 124013000674-0).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванова С. Ю., Осипенко К. Ю., Кузнецов В. А. и др. Экспериментальное исследование свойств ауксетических и неауксетических метаматериалов из металла при проникании в них жестких ударников // Известия РАН. МТТ. 2023. № 2. С. 176–180. DOI: 10.31857/S0572329922600773.
- [2] Иванова С. Ю., Осипенко К. Ю., Демин А. И. и др. Изучение свойств метаматериалов с отрицательным коэффициентом Пуассона при пробивании жестким ударником // Известия РАН. МТТ. 2023. № 5. С. 120–130. DOI: 10.31857/S0572329923600366.
- [3] 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.

- [4] Gao Y., Huang H. Energy absorption and gradient of hybrid honeycomb structure with negative Poisson's ratio // *Mech. Solids*. 2022. Vol. 57, no. 5. P. 1118–1133. DOI: 10.3103/S0025654422050053.
- [5] 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. Vol. 59, no. 1. P. 445–458. DOI: 10.1134/S0025654423602550.
- [6] 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. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.13.
- [7] 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. Vol. 846. P. 476–481. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.846.476.
- [8] Zhao X., Gao Q., Wang L. et al. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading // *Mater. Des.* 2018. Vol. 160. P. 527–537. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.041.
- [9] Li C., Shen H.-S., Wang H. Nonlinear dynamic response of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core // *Nonlinear Dyn.* 2020. Vol. 100, no. 4. P. 3235–3252. DOI: 10.1007/s11071-020-05686-4.
- [10] Qiao J. X., Chen C. Q. Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs // *Inter. J. Impact Eng.* 2015. Vol. 83. P. 47–58. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005.
- [11] Novak N., Starčević L., Vesenjāk M., Ren Z. Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core // *Compos. Struct.* 2019. Vol. 210. P. 167–178. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.11.050.
- [12] Витман Ф. Ф., Иоффе Б. С. Простой метод нахождения динамической твердости металлов с помощью двустороннего конуса // *Заводская лаборатория*. 1948. Т. XIV, № 6. С. 727–732.
- [13] Витман Ф. Ф., Степанов В. А. Влияние скорости деформирования на сопротивление деформированию металлов при скоростях удара  $10^2 \nabla \cdot 10^3$  м/сек // *Некоторые проблемы прочности твердого тела*. Изд-во АН СССР. 1959. С. 207–221.
- [14] Каниболотский М. А., Уржумцев Ю. С. Оптимальное проектирование слоистых конструкций. Новосибирск: Наука, 1989.
- [15] Баничук Н. В., Иванова С. Ю., Макеев Е. В., Турутько А. И. Некоторые аналитические и численные оценки параметров оптимальной структуры защитной плиты // *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Т. 75, № 3. С. 206–214. DOI: 10.32326/1814-9146-2013-75-3-206-214.

## REFERENCES

- [1] Ivanova S. Yu., Osipenko K. Yu., Kuznetsov V. A. et al. Experimental investigation of the properties of auxetic and non-auxetic metamaterials made of metal muring penetration of rigid strikers // *Mech. Solids*. 2023. Vol. 58, no. 2. P. 524–528. DOI: 10.3103/S0025654422601616.
- [2] Ivanova S. Yu., Osipenko K. Yu., Demin A. I. et al. Studying the properties of metamaterials with a negative Poisson's ratio when punched by a rigid impactor // *Mech. Solids*. 2023. Vol. 58, no. 5. P. 1536–1544. DOI: 10.3103/S0025654423600897.
- [3] 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. Vol. 59, no. 4. P. 1967–1972. DOI: 10.1134/S0025654424604695.

- [4] Gao Y., Huang H. Energy absorption and gradient of hybrid honeycomb structure with negative Poisson's ratio // *Mech. Solids*. 2022. Vol. 57, no. 5. P. 1118–1133. DOI: 10.3103/S0025654422050053.
- [5] 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. Vol. 59, no. 1. P. 445–458. DOI: 10.1134/S0025654423602550.
- [6] Skripnyak V. V., Chirkov M. O., Skripnyak V. A. Modeling the mechanical response of auxetic metamaterials to dynamic effects // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2021. no. 2. P. 144–152. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.13.
- [7] 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. Vol. 846. P. 476–481. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.846.476.
- [8] Zhao X., Gao Q., Wang L. et al. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading // *Mater. Des.* 2018. Vol. 160. P. 527–537. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.041.
- [9] Li C., Shen H.-S., Wang H. Nonlinear dynamic response of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core // *Nonlinear Dyn.* 2020. Vol. 100, no. 4. P. 3235–3252. DOI: 10.1007/s11071-020-05686-4.
- [10] Qiao J. X., Chen C. Q. Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs // *Inter. J. Impact Eng.* 2015. Vol. 83. P. 47–58. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005.
- [11] Novak N., Starčević L., Vesenjāk M., Ren Z. Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core // *Compos. Struct.* 2019. Vol. 210. P. 167–178. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.11.050.
- [12] Vitman F. F., Ioffe B. S. A simple method of determining dynamic hardness of metals using a double cone // *Zavod. Lab.* 1948. Vol. XIV, no. 6. P. 727–732.
- [13] Vitman F. F., Stepanov V. A. Effect of the strain rate on the resistance of metals to deformation at impact velocities of 100–1000 m/s // *Some Problems of the Strength of Solids (AN SSSR)*. 1959. P. 207–221.
- [14] Kanibolotskii M. A., Urzhumtsev Yu. S. Optimal design of layered structures. Nauka, Novosibirsk, 1989.
- [15] Banichuk N. V., Ivanova S. Yu., Makeev E. V., Turutko A. I. Some analytical and computational estimates of parameters of optimal protective plate structure // *Probl. Prochn. Plast.* 2013. Vol. 75, no. 3. P. 206–214. DOI: 10.32326/1814-9146-2013-75-3-206-214.