



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.13

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ АУКСЕТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В.В. Скрипняк, М.О. Чирков, В.А. Скрипняк

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 8 февраля 2021 г.
Принята: 31 мая 2021 г.
Опубликована: 12 июля 2021 г.

Ключевые слова:

ауксетики, численное моделирование, высокоскоростные деформации, импульсные нагрузки, удары, метаматериалы, титановые сплавы, диссипативные свойства, ударопрочность, вычислительная механика, упругость, механические свойства материалов.

АННОТАЦИЯ

Исследуется механический отклик на динамические воздействия 3D ауксетической структуры, созданной на основе элементарной ячейки с предварительно изогнутыми структурными элементами из титанового сплава. Цель работы состояла в изучении закономерностей деформации ауксетической структур при осевом сжатии со скоростью 100 м/с, получении данных о диссипативных свойствах структуры при высокоскоростной деформации, оценке характерного времени процесса уплотнения объема метаматериала с относительной плотностью 0,0115.

Исследование процесса деформации объема метаматериала при эффективной скорости деформации 2000 с^{-1} выполнено методом численного моделирования с использованием решателя LS DYNA. Численно моделировались процессы деформации, повреждения и разрушения структуры метаматериала, вследствие деформаций и разрушения титановых каркасных элементов. Для описания механического поведения титанового сплава в каркасных элементах применялась модель упругопластической повреждаемой среды, учитывающей скоростную чувствительность пластического течения, изменение температуры вследствие диссипативных эффектов, влияние параметра трехосности напряженного состояния на зарождение и рост поврежденных структуры.

В результате проведенных численных исследований показано, что ауксетический эффект в исследуемом метаматериале сохраняется при высокоскоростном упругопластическом деформировании. При скорости осевого сжатия 100 м/с деформация в объеме материала протекает неоднородно. При динамическом нагружении рассмотренного ауксетического метаматериала режимы деформации и разрушения зависят не только от параметров геометрии ячейки, но и от механического поведения материала каркаса, а также от относительной плотности. Это позволяет управлять деформациями ячеек при механических воздействиях. Вблизи поверхности динамического нагружения формируются слои уплотненных ячеек. Неустойчивость ячеек ауксетических метаматериалов способствует увеличению поглощенной энергии. Расчетная величина удельной поглощенной энергии при динамическом одноосном сжатии достигает 3,4 кДж/кг и сопоставима со значениями для каркасных структур из Ti-6Al-4V с эквивалентной удельной массовой плотностью.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности создания защитных конструкций с применением ауксетических ячеистых структур, созданных с использованием предварительно изогнутых элементов из металлического проката.

© ПНИПУ

© Скрипняк Владимир Владимирович – к.ф.-м.н., доц., e-mail: skrp2012@yandex.ru, iD: [0000-0003-2238-5856](https://orcid.org/0000-0003-2238-5856).

Чирков Максим Олегович – асп., e-mail: chirkovmaksim@mail.ru, iD: [0000-0002-1801-5871](https://orcid.org/0000-0002-1801-5871).

Скрипняк Владимир Альбертович – д.ф.-м.н., проф., зав. каф., e-mail: skrp2006@yandex.ru, iD: [0000-0001-7162-3983](https://orcid.org/0000-0001-7162-3983).

Vladimir V. Skripnyak – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: skrp2006@yandex.ru, iD: [0000-0003-2238-5856](https://orcid.org/0000-0003-2238-5856).

Maxim O. Chirkov – PhD Student, e-mail: chirkovmaksim@mail.ru, iD: [0000-0002-1801-5871](https://orcid.org/0000-0002-1801-5871).

Vladimir A. Skripnyak – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: skrp2012@yandex.ru, iD: [0000-0001-7162-3983](https://orcid.org/0000-0001-7162-3983).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

MODELING THE MECHANICAL RESPONSE OF AUXETIC METAMATERIALS TO DYNAMIC EFFECTS

V.V. Skripnyak, M.O. Chirkov, V.A. Skripnyak

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 8 February 2021

Accepted: 31 May 2021

Published: 12 July 2021

Keywords:

auxetic metamaterials, numerical simulation, high strain rates, impulse loadings, impacts, metamaterials, titanium alloys, dissipative properties, crashworthiness, computational mechanics, elasticity, mechanical properties of materials.

ABSTRACT

The paper investigates the mechanical response of a 3D auxetic structure created on the basis of a unit cell with pre-buckled structural elements to dynamic loading. The aim of the work is to study deformations of the auxetic structure made of an alpha titanium alloy during uniaxial compression at 100 m/s, to evaluate dissipative properties of the structure during high-speed deformation, and to estimate the characteristic time of the metamaterial's compaction with a relative density of 0.0115.

The numerical simulation of the metamaterial at effective strain rate of 2000 1/s has been performed using LS DYNA solver. To describe the mechanical behavior of the titanium alloy in frame elements, we use a model of an elastic-plastic damaged medium, which takes into account the strain rate sensitivity of the plastic flow, temperature changes due to dissipative effects, and the effect of the stress state triaxiality parameter on nucleation and growth of structural damages.

The numerical studies have shown that the auxetic effect in the studied metamaterial is retained under high-rate elastoplastic deformation. At a speed of the uniaxial compression of 100 m/s, deformation in the volume of the metamaterial proceeds nonuniformly. Under dynamic loading of the considered auxetic metamaterial, the deformation and fracture modes depend not only on the parameters of the cell geometry, but also on the mechanical behavior of the framework material, as well as on the relative density. This makes it possible to control the deformations of the cells under mechanical stress. Layers of compacted cells are formed near the dynamic loading surface. The instability of the cells of the auxetic metamaterials increases the absorbed energy. The calculated value of the specific absorbed energy under dynamic uniaxial compression reaches 3.4 kJ/kg, and is comparable with the values for frame structures made of Ti-6Al-4V with an equivalent specific mass density.

The results indicate the possibility of creating protective structures using auxetic cellular structures on the base of the pre-buckled elements of the rolled metal.

© PNRPU

Введение

Метаматериалы с отрицательным коэффициентом Пуассона, или ауксетические механические метаматериалы, исследуются в течение последних 30 лет [1–5]. Механические метаматериалы представляют группу искусственных структур с необычными механическими свойствами, обусловленными геометрией их структурных элементов, а не составом материала. Ауксетические метаматериалы представляют один из трех основных классов механических метаматериалов, обладающих определенным сочетанием модуля Юнга E , модуля сдвига μ , модуля объемного сжатия K и коэффициента Пуассона ν [6–18].

Интерес к ауксетическим материалам обусловлен уникальным комплексом их механических свойств, включая высокие показатели удельного поглощения механической энергии. В настоящее время предложено более 7 топологических схем ауксетических метаматериалов, обладающих отрицательным коэффициентом Пуассона (при $\mu > K$) [12]. Четыре подкласса ауксетических метаматериалов разработаны на основе структурного дизайна с использованием исходных возвратных структур, микроструктур с открытыми ячейками, вращающимися квадратами или треугольниками [13]. Ряд ауксетических структур построены с использованием

хиральных строительных блоков, хиральных или антихиральных решеток, часть – с использованием принципов оригами [13, 14].

Исследованные типы ауксетических метаматериалов демонстрируют сочетание высокой удельной жесткости и прочности [6]. Некоторые материалы обладают высокой скоростной чувствительностью деформационного упрочнения, что существенно влияет на характер их механического отклика на динамические воздействия [8–11].

Развитие аддитивных технологий, включая селективное лазерное плавление, позволило создать и исследовать ауксетические метаматериалы с различной топологией ячеек [7, 12, 15]. Вместе с тем были выявлены проблемы и ограничения в создании ауксетических метаматериалов с помощью аддитивных технологий производства, включая высокую стоимость конечного материала, неизбежную пористость в структурах, которая отрицательно влияет на механическое поведение под нагрузкой, отсутствие 3D иерархических систем, которые демонстрируют удовлетворительное поведение при повторном сжатии [15, 16].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что механические свойства ауксетических структур могут быть изменены с помощью варьирования топологических параметров [1, 12, 17,

18]. Это позволяет управлять упругими характеристиками метаматериалов, их удельными диссипативными свойствами, удельными прочностными свойствами, теплофизическими характеристиками.

В данной работе методом численного моделирования исследовалась реакция на динамические воздействия объема метаматериала, полученного трансляцией трехмерной ауксетической решетки. Ауксетичность достигается за счет использования криволинейных элементов ячеек, которые могут быть изготовлены из проката металлов и сплавов. Использование таких элементов открывает возможность производства и применения более дешевых, но не менее эффективных ауксетических метаматериалов из легких сплавов. Применение проката для изготовления каркасных элементов позволяет управлять механическими свойствами материала каркаса в широком диапазоне.

1. Модельная ауксетическая ячеистая структура и метаматериала

В работе рассмотрен вариант ауксетической структуры, построенной трансляцией элементарной ячейки с изогнутыми структурными элементами, описываемой с помощью четырех параметров: длины стороны кубической ячейки L , расстояния между верхними и нижними дугами a , ширины D_w и толщины D_a структурных элементов [18].

При построении модельного объема метаматериала предполагалось, что геометрические параметры могут изменяться в следующих диапазонах: $L \in]0; +\infty[$; $a \in]0; L/2[$; $D_w \in]0, a[$; $D_a \in]0; 2a[$. Ячейка состояла из дугообразных элементов, имевших прямоугольное поперечное начальное сечение с размерами $D_w \times D_a$. Дугообразные элементы ориентированы выпуклостью внутрь объема ячейки. Структура ячейки метаматериала обеспечивает эффект ауксетичности при сжатии. Моделировался механический отклик объема метаматериала $V \sim 10\,218\,313\text{ мм}^3$ с массой 0,843 кг и относительной плотностью $\rho/\rho_s \sim 0,0185$ на нагружение со стороны жесткой пластины, движущейся с постоянной скоростью.

Конечно-элементная модель объема метаматериала показана на рис. 1. Рассмотренный модельный объем имел размеры $215 \times 215 \times 215\text{ мм}$, а геометрические характеристики ячейки были приняты следующими: $L = 54\text{ мм}$, $a = 5,95\text{ мм}$, $D_a = 0,6\text{ мм}$, $D_w = 6\text{ мм}$.

Конечно-элементная модель была создана путем дискретизации каркасной структуры метаматериала с помощью структурированной трехмерной сетки шестигранных элементов. Для решения задачи применялся решатель программного комплекса LS-DYNA, входящий в состав WB ANSYS (ANSYS, Inc., Канонсбург, Пенсильвания, США). Расчеты проводились с использованием схемы второго порядка точности и условия устойчивости решения Куранта – Фридрихса – Леви.

Процесс деформации каркасных элементов при воздействии импульсной нагрузки на верхнюю поверх-

ность описывается системой уравнений сохранения (массы, импульса и энергии), кинематическими уравнениями и определяющим уравнением повреждаемой упругопластической среды.

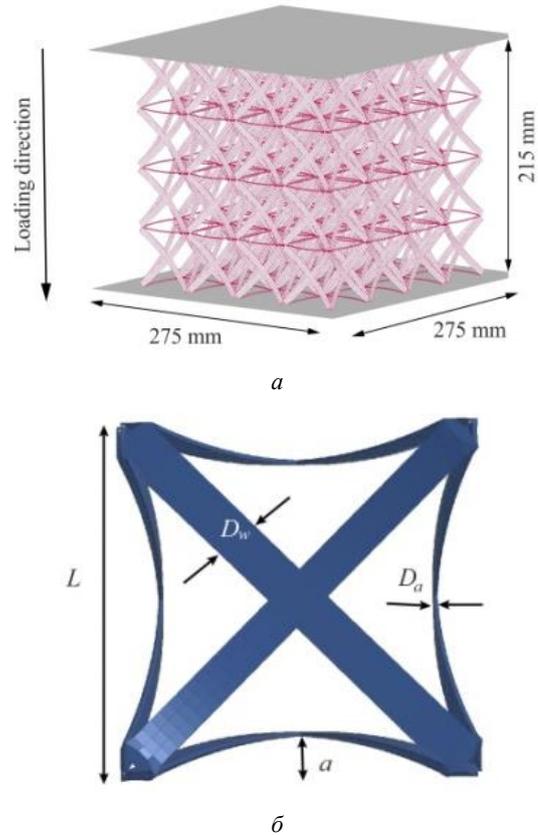


Рис. 1. Конечно-элементная модель объема ауксетического метаматериала (а) и элемент ауксетической конструкции (б)

Fig. 1. A finite element model of the volume of the auxetic metamaterial (a), and an element of the auxetic structure (b)

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{du_i}{dt}, \quad \rho \frac{dE}{dt} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = (1/2)[\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i], \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_{ij} = (1/2)[\partial u_i / \partial x_j - \partial u_j / \partial x_i], \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = -p^{(m)} \delta_{ij} + S_{ij}^{(m)}, \quad (4)$$

$$p^{(m)} = p_x^{(m)}(\rho) + \Gamma(\rho)\rho E_T, \quad E_T = C_p T, \quad (5)$$

$$DS_{ij}^{(m)} / Dt = 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij}^e - \delta_{ij} \dot{\epsilon}_{kk}^e / 3), \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p, \quad \dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}^p + \delta_{ij} \dot{\epsilon}_{kk}^p / 3, \quad \dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \partial \Phi / \partial \sigma_{ij},$$

где ρ – массовая плотность; u_i – компоненты вектора скорости материальных частиц; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; $p^{(m)}$ – давление; x_i – декартово координаты, $i = 1, 2, 3$; E – удельная внутренняя энергия; $\dot{\epsilon}_{ij}, \dot{\omega}_{ij}$ – компоненты тензора скорости деформации и тензора изгиба – кручения; $\dot{\epsilon}_{ij}^e, \dot{\epsilon}_{ij}^p$ – компоненты тен-

зора скорости упругой и пластической деформации соответственно; $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ – компоненты девиатора тензора скорости пластической деформации; $p_x^{(m)}$ – холодное давление; Γ – коэффициент Грюнайзена; T – температура; E_T – тепловая часть удельной внутренней энергии; C_p – удельная теплоемкость; $D(\bullet)/Dt$ – производная Яуманна; μ – модуль сдвига; λ – пластический множитель, полученный из условия $\dot{\Phi} = 0$, Φ – пластический потенциал.

Напряжения течения и модель повреждения были откалиброваны с использованием данных из ранее проведенных нами исследований поведения сплава Ti-5Al-2.5Sn [19]. Параметры состояния определялись с использованием данных по альфа-титану [20, 21]. Температурная зависимость модуля сдвига μ для альфа-титанового сплава описывается уравнением [22, 23]

$$\mu(T, \rho) = \mu_0 [1 + \mu_1 p(\rho_0 / \rho)^{1/3} - \mu_2 (T - 295)], \quad (6)$$

где μ_0 , μ_1 , μ_2 – постоянные материала; ρ_0 – начальная массовая плотность; p – давление.

Холодная часть давления рассчитывается с использованием уравнения Берча-Мурнагана

$$p_x^{(m)} = \frac{3}{2} B_0 \cdot ((\rho_0 / \rho)^{-7/3} - (\rho_0 / \rho)^{-5/3}) \times \\ \times [1 - \frac{3}{4} (4 - B_1) \cdot ((\rho_0 / \rho)^{-2/3} - 1)] \text{ if } p^{(m)} \geq 0, \quad (7) \\ p_x^{(m)} = B_0 (1 - \rho_0 / \rho) \text{ if } p^{(m)} < 0,$$

где B_0 , B_1 – модуль всестороннего сжатия и его производная соответственно.

Применение уравнения в форме (7) обусловлено необходимостью определения давлений для материальных частиц после уплотнения ячеек метаматериала.

Напряжение пластического течения в широком диапазоне скоростей деформации и температурах до 1150 К описывается уравнением

$$\sigma_s = \sigma_0 \frac{\mu(T, \rho)}{\mu(295, \rho_0)} + A_0 \exp(-\beta_0 T) \times \\ \times \exp \left(\beta_1 T \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p} \right) \right) \exp(-\sqrt{2\pi} |N|) \\ + C_0 \sqrt{\varepsilon_{eq}^p} \exp(-\alpha_0 T) \exp \left(\alpha_1 T \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p} \right) \right), \quad (8) \\ N = \sum_k \Delta N_k, \\ \Delta N_k = \text{sgn}(S_2) \frac{\Delta \varepsilon_k^p}{n_1 \exp \left(-n_2 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p} \right) \right)} \frac{\mu(T, \rho)}{\mu(295, \rho_0)} \times \\ \times \exp[\sqrt{2\pi} \cdot \text{Min}\{\text{sgn}(-S_2) \cdot N, 0\}],$$

где σ_s – напряжение течения; S_2 – вторая составляющая девиатора тензора главных напряжений; n_1 , n_2 , σ_0 , A_0 , α_0 , α_1 , β_0 , β_1 – константы материала; N – параметр релаксации напряжений при развитии локализации пластического течения на мезоскопическом уровне; $\dot{\varepsilon}_{eq}^p$ – эквивалентная скорость пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_0^p$ – нормирующая постоянная.

Расчеты проводились с использованием следующих значений коэффициентов для титанового сплава ВТ5-1: $\sigma_0 = 0,8$ ГПа; $\alpha_0 = 0,0016$; $\alpha_1 = 0,002$; $C_0 = 0,47$ ГПа; $\beta_0 = 0,00017$; $A_0 = 0,9$ ГПа; $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0$ с⁻¹; $\mu_0 = 39,5$ ГПа; $\mu_1 = 0,05$ ГПа⁻¹, $\mu_2 = 0,0089$ К⁻¹, $B_0 = 115,5$ ГПа, $B_1 = 4,9$; $P_{\min} = -4,9$ ГПа.

Мы использовали комбинированные параметры скорости термоактивационной деформации, включенные в дислокационную модель пластического течения [24, 25].

Температура при высокоскоростной деформации рассчитывалась в адиабатическом приближении с учетом диссипативного эффекта пластического течения

$$T = T_0 + (0,9 / \rho_s C_p) \int_0^{\varepsilon_{eq}^p} \sigma_{eq} d\varepsilon_{eq}^p, \quad (9)$$

где T_0 – начальная температура; $\rho_s = 4,408 \cdot 10^{-6}$ кг / мм³; $C_p = 458 + 0,35T - 1,929 \cdot 10^{-4} T^2 + 8,758 \cdot 10^{-8} T^3$ Дж/кг·К [19, 24, 26].

Удельная поглощенная энергия при деформации объема метаматериала определялась по формуле

$$AE = \frac{1}{m} \int_0^t F_z \cdot u_z(t) dt, \quad (10)$$

где m – масса метаматериала; F_z – эффективное усилие сопротивления деформированию объема метаматериала; u_z – перемещение границы объема метаматериала при его сжатии.

Альфа-титановые сплавы проявляют вязкий характер разрушения в широком диапазоне скоростей деформации, температуры и величины параметра трехосности напряженного состояния [27, 28]. Поэтому для описания механического отклика ауксетических структур важно адекватно учесть развитие повреждений и разрушения материала каркасных элементов.

В данной работе была использована феноменологическая модель эволюции повреждений GISSMO (Generalized Incremental Stress State dependent Model). Модель позволяет прогнозировать развитие повреждений и вязкого разрушения сплавов [29]. Модель GISSMO успешно применялась для прогнозирования вязкого разрушения конструкций из титановых сплавов, в том числе 3D-структур, полученных по аддитивным технологиям [30, 31].

Для учета возможности откольного разрушения при высоких отрицательных давлениях в модель был дополнительно включен критерий по величине давления P_{\min}

$$\Delta D = \frac{DMGEXP}{\varepsilon_f^p(\eta)} D \left(1 - \frac{1}{DMGEXP}\right) \Delta \varepsilon_{eq}^p, \quad 0 \leq D \leq 1,$$

$$\Delta F = \frac{DMGEXP}{ECRIT} F \left(1 - \frac{1}{DMGEXP}\right) \Delta \varepsilon_{eq}^p, \quad 0 \leq F \leq 1, \quad (11)$$

$$\sigma^* = \sigma_s \left(1 - D^{FADEXP}\right),$$

где ΔD – приращение параметра поврежденности; $\Delta \varepsilon_{eq}^p$ – приращение эквивалентной пластической деформации; ΔF – приращение параметра устойчивости пластического течения; $\varepsilon_f^p(\eta)$ – до разрушения пластической деформации; $\eta = -p/\sigma_{eq}$ – параметр трехосности напряженного состояния; DMGEXP, FADEXP, ECRIT – константы материала; σ_s – предел текучести; σ^* – предел текучести поврежденной среды; D – параметр поврежденности; F – параметр устойчивости пластического течения. Связь накопленных повреждений с тензором напряжений определена, пока значение параметра F не достигает единицы.

При моделировании использовались следующие коэффициенты модели DMGEXP = 2, FADEXP = 2, ECRIT_{77K} = 0,12, ECRIT_{295K} = 0,35, ECRIT_{885K} = 0,63.

Значения пластической деформации до разрушения от параметра трехосности напряженного состояния η показаны в таблице.

Деформации до разрушения от параметра трехосности напряженного состояния

Strain to fracture versus the stress triaxiality values

η	$\varepsilon_{f,77K}$	η	$\varepsilon_{f,295K}$	η	$\varepsilon_{f,885K}$
-1	0,9	-1	1,5	-1	10
-0,4	0,6	-0,4	0,7	-0,4	10
-0,33	0,45	-0,33	0,45	-0,33	10
0	0,4	0	0,7	0	1,2
0,33	0,28	0,33	0,47	0,33	0,85
0,45	0,24	0,45	0,45	0,45	0,75
0,56	0,2	0,56	0,25	0,56	0,6
1	0,2	1	0,25	1	0,6

Начальные условия были заданы в предположении об отсутствии предварительных напряжений и деформаций в структурных элементах метаматериала, находящихся в однородном температурном поле с начальной температурой T_0 .

Динамическое воздействие осуществляется посредством воздействия на ячеистый материал жесткой стенки, движущейся с постоянной скоростью V_0 , вектор которой принимался коллинеарным нормали к подвижной поверхности.

На нижней неподвижной поверхности опорной пластины были заданы контактные условия для соответствующих каркасных элементов. Под воздействием жесткой подвижной поверхности объем метаматериала сжимался в осевом направлении метаматериала с эффективной скоростью деформации $\sim V_0/L$. Поверхности

каркасных элементов в начальном состоянии задавались свободными от нагрузок. В процессе деформации метаматериала появлялись зоны контакта между элементами каркаса. При появлении таких зон в них задавались контактные граничные условия.

Начальное напряженное состояние в зоне стыков каркасной конструкции задавалось равным нулю.

2. Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 2 показаны расчетные эквивалентные напряжения в структурных элементах метаматериала. Наибольшие эквивалентные напряжения действуют в зоне соединения структурных элементов при одноосном сжатии объема метаматериала.

Результаты моделирования демонстрируют эффект макроскопической ауксетичности у рассмотренной ячеистой структуры метаматериала. При одноосном сжатии модельного объема отсутствуют поперечные деформации при отсутствии ограничений на боковых поверхностях. Слои потерявших устойчивость ячеек метаматериалов начинают образовываться вблизи контактной поверхности нагружающей пластины. После уплотнения слоя ячеек нагрузка передается к следующим слоям ячеек метаматериала.

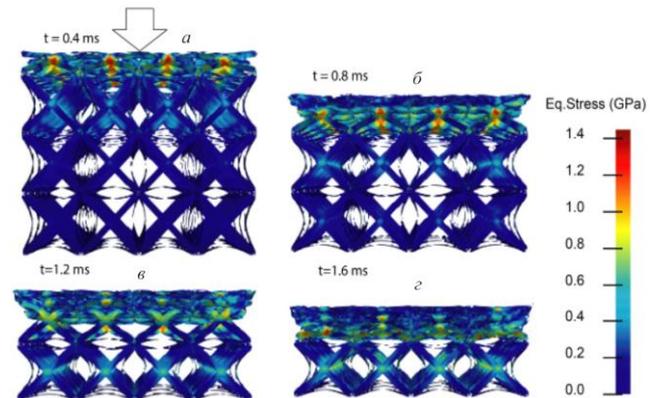


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в ауксетическом метаматериале при одноосном сжатии с эффективной скоростью деформации 2000 s^{-1} в моменты времени: а – 0,4 мс; б – 0,8 мс; в – 1,2 мс; г – 1,6 мс

Fig. 2. Equivalent stresses in the auxetic metamaterial under uniaxial compression with an effective rate of 2000 s^{-1} at times of (a) 0.4 ms, (b) 0.8 ms, (c) 1.2 ms, (d) 1.6 ms

Полученные результаты свидетельствуют о том, что процесс уплотнения метаматериалов протекает неравномерно во времени и неоднородно в объеме. Уплотнение метаматериала при осевом сжатии объема метаматериала достигается за счет уплотнения слоев ячеек. До уплотнения ячеек эффективная массовая плотность изменяется незначительно, а коэффициент Пуассона остается близким к начальному значению. Деформация ячеек метаматериала развивается в волнах квазиизэнтропического сжатия, что сопровождается уменьшением эффективных скоростей деформации. Увеличение эффективной скорости волн напряжения вызвано увели-

чением эффективного модуля объемной упругости метаматериала вследствие его уплотнения за счет перемещений структурных элементов в ячейках. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными о закономерностях деформации и послойном разрушении ячеек ауксетических метаматериалов [6, 30–36].

На рис. 3 показано изменение величины адсорбированной энергии в процессе осевого сжатия объема ауксетического метаматериала. В моменты времени, соответствующие точкам А, В, С, D, Е, начинается уплотнение последующих слоев ячеек метаматериала. При этом эффект ауксетичности пропадает, и уплотненный материал реагирует на механические воздействия аналогично материалам с невысокой пористостью. Резкое возрастание адсорбированной энергии после уплотнения ячеек в объеме метаматериала связано с ростом давления при дальнейшем сжатии объема.

Возрастание поглощенной механической энергии при динамическом сжатии ячеистых ауксетических структур определяется преимущественно работой эквивалентных сдвиговых напряжений на пластических деформациях. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными об адсорбированной энергии при сжатии и сдвиге различных конструктивных сплавов и перспективных ячеистых структур [33, 37].

Рассмотренные модельные ауксетические структуры, созданные из элементов титанового проката, обладают в 3,5 раза более высокими показателями поглощения энергии по сравнению с каркасными структурами из Ti-6Al-4V с эквивалентной удельной массовой плотностью.

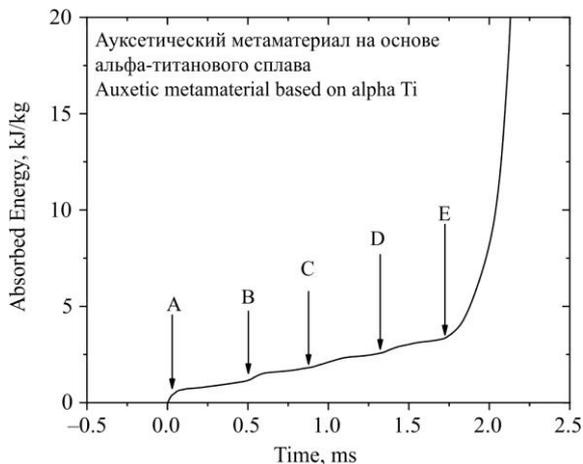
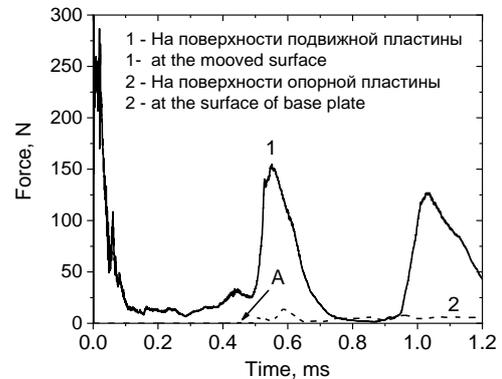


Рис. 3. Поглощенная энергия (АЕ) ауксетического метаматериала при динамическом сжатии

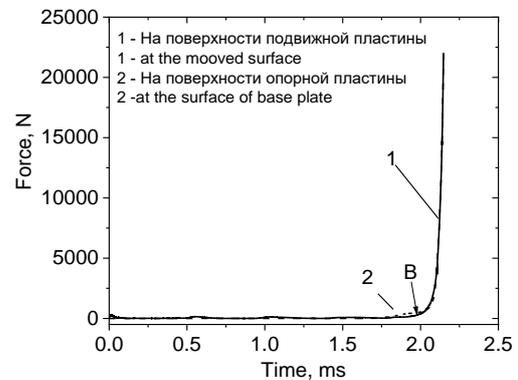
Fig. 3. Absorbed energy (AE) of the auxetic metamaterial under dynamic compression

Расчетные показатели поглощения энергии при деформации у рассмотренной ауксетической структуры сопоставимы с соответствующими характеристиками каркасных структур Кагоме (Kagome) из Ti-6Al-4V, полученных с помощью селективного лазерного спекания [33].

На рис. 4 показаны расчетные значения интегральных усилий, действующих на поверхности нагружающей и опорной пластин. В момент времени А на рис. 4, а волна напряжений, распространявшаяся по ячейкам метаматериала, достигла поверхности опорной пластины.



а



б

Рис. 4. Результирующая сила на подвижной пластине (линия 1) опорной пластине (линия 2) при импульсном нагружении с амплитудой 100 м/с при 295 К. Усилия в начальный момент нагружения (а), усилия при уплотнении слоев ячеек метаматериала (б)

Fig. 4. The resulting forces on the movable plate (curve 1) of the base plate (curve 2) under impulse loading with an amplitude of 100 m/s at 295 K. (a) Forces at the initial moment of loading, (b) forces upon compaction of the layers of the cells of the metamaterial

Возрастание сопротивления деформированию на рис. 4, а обусловлены окончанием процесса коллапса слоя ячеек метаматериала. Релаксация усилий обусловлена потерей устойчивости каркасной структуры ячеек метаматериала в следующем слое и протеканием деформации их уплотнения. Уплотнение слоя исследуемого ауксетического метаматериала толщиной 215 мм завершалось за 2 мс при скорости сжатия 100 м/с. Учитывая, что скорость продольной упругой волны в титановом сплаве составляет 6,15 км/с, слой ауксетического метаматериала задерживает импульс нагружения на 1,965 мс и уменьшает энергию удара.

Неравномерная деформация объемов ауксетического метаматериала может быть использована при разработке защитных устройств, позволяющих избежать передачи волн напряжений с большой интенсивностью. Использование эффекта локализации неупругой деформации позволяет управлять процессом поглощения энергии всей конструкцией и контролировать процесс разрушения.

Выводы

Методом численного моделирования исследован механический отклик на динамическую нагрузку 3D ауксетической структуры метаматериала на основе предварительно изогнутых элементов.

Показано, что ауксетический эффект рассмотренной структуры сохраняется при высокоскоростном упруго-пластическом деформировании.

При скорости нагружения 100 м/с в рассмотренном метаматериале деформация протекает неоднородно с формированием уплотненных слоев ячеек вблизи поверхности нагружения. Неустойчивость ячеек ауксетических метаматериалов при динамическом нагружении способствует увеличению адсорбированной энергии.

Результаты численного моделирования позволили оценить диссипативные свойства. Расчетная величина

удельной поглощенной энергии при динамическом одноосном сжатии достигает 3,4 кДж/кг и сопоставима со значениями для каркасных структур из Ti-6Al-4V с эквивалентной удельной массовой плотностью.

Режимы деформации и разрушения при динамическом нагружении рассмотренного ауксетического метаматериала зависят не только от параметров геометрии ячейки, но и от механического поведения материала каркаса, а также от относительной плотности. Это позволяет управлять деформациями ячеек при механических воздействиях.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности создания защитных конструкций с использованием ауксетических ячеистых структур созданных с использованием предварительно изогнутых элементов из металлического проката.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Д.И. Менделеева ТГУ (проект № 8.1.13.2018 Л).

Acknowledgment

This work was supported by the D.I. Mendeleev TSU (Project No. 8.1.13.2018 L).

Библиографический список

1. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review / P.U. Kelkar, H.S. Kim, K.-H. Cho, J.Y. Kwak, C.-Y. Kang, H.-C. Song // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – Article number 3132. DOI: 10.3390/s20113132
2. Колпаков А.Г. К определению усредненных характеристик упругих каркасов // *Прикладная математика и механика*. – 1985. – Т. 99, вып. 6. – С. 969–977/
3. Algre R.F. An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio $\nu = -1$ // *J Elasticity*. – 1985 – Vol. 15. – P.427–430. DOI: 10.1007/BF00042531
4. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона / Д.А. Конек, К.В. Войцеховски, Ю.М. Плескачевский, С.В. Шилько // *Механика композитных материалов и конструкций*. – 2004. – Т. 10. – С. 35–69.
5. Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Ауксетики среди материалов с кубической анизотропией // *Известия РАН. Механика твердого тела*. – 2020. – № 4. – С. 7–24. DOI: 10.31857/S0572329920040054
6. Zhang J., Lu G., You Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review // *Composites Part B: Engineering*. – 2020. – Article number 108340. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108340
7. Auxetic metamaterials and structures: A review / X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie // *Smart Materials and Structures*. – 2018. – Vol. 27, no 2. – Article number 023001. DOI: 10.1088/1361-665x/aaa61c
8. Influences of material and geometry in the performance of auxetic composite structure under blast loading / G. Imbalzano, P. Tran, P.V.S. Lee, D. Gunasegaram, T.D. Ngo // *Applied Mechanics and Materials*. – 2016. – Vol. 846. – P. 476–481. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.846.476

9. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading / X. Zhao, Q. Gao, L. Wang, Q. Yu., Z.D. Ma // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 160. – P. 527–537. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.041
10. Li C., Shen H.S., Wang H. Nonlinear dynamic response of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core // *Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Vol. 100. – P. 3235–3252. DOI: 10.1007/s11071-020-05686-4
11. Qiao J.X., Chen C.Q. Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs // *International Journal of Impact Engineering*. – 2015. – Vol. 83. – P. 47–58. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005
12. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review / X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu // *Progress in Materials Science*. – 2018. – Vol. 94. – P. 114–173. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.12.003
13. Meena K., Singamneni S. A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects // *Materials & Design*. – 2019. – Vol. 173. – Article number 107779. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107779
14. Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review / W. Wu, W. Hu, G. Qian, H. Liao, X. Xu, F. Berto // *Materials & Design*. – 2019. – Vol. 180. – Article number 107950. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107950
15. Auxetic cellular structures through selective electron beam melting / P. Schwerdtfeger, R. Heinel, F. Singer, C. Körner // *Phys. Status Solidi B*. – 2010. – Vol. 247. – P. 269–272. DOI: 10.1002/pssb.200945513
16. Chen D., Zheng X. Multi-material additive manufacturing of metamaterials with giant, tailorable negative Poisson's ratios / P. Schwerdtfeger, R. Heinel, F. Singer, C. Körner // *Scientific Re-*

ports. – 2018. – Vol. 8. – Article number 9139. DOI: 10.1038/s41598-018-26980-7.

17. Review on auxetic materials / W. Yang, Z. M. Li, W. Shi, B. H. Xie, M. B. Yang // *J. Mater. Sci.* – 2004. – Vol. 39. – P. 3269–3279.

18. Computational investigation of the effective mechanical behavior for 3D pre-buckled auxetic lattices / F. Albertini, J. Dirrenberger, A. Molotnikov, C. Sollogoub // *J. Appl. Mech.* – 2019. – Vol. 86, no. 11. – Article number 111003. DOI: 10.1115/1.4044542

19. Skripnyak V.V., Skripnyak E.G., Skripnyak V.A. Fracture of titanium alloys at high strain rates and under stress triaxiality // *Metals.* – 2020. – Vol. 10. – Article number 305. DOI: 10.3390/met10030305

20. Experimental study on the dynamic tensile behavior of a poly-crystal pure titanium at elevated temperatures / W. Huang, X. Zan, X. Nie, M. Gong, Y. Wang, Y.M. Xia // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2007. – Vol. 443. – P. 33–41. DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.041

21. Strain-rate-dependent tensile response of Ti–5Al–2.5Sn alloy / B. Zhang, J. Wang, Y. Wang, Y. Wang, Z. Li // *Materials.* – 2019. – Vol. 12. – Article number 659. DOI: 10.3390/ma12040659-8

22. Bros H., Michel M.-L., Castanet R. Enthalpy and heat capacity of titanium based alloys // *J. Therm. Anal.* – 1994. – Vol. 41. – P. 7–24. DOI: 10.1007/bf02547007

23. Dynamic strain-rate effect on uniaxial tension deformation of Ti5Al2.5Sn α -titanium alloy at various temperatures / B. Zhang, J. Wang, Y. Wang, Z. Li, Y. Wang // *Mater. High Temper.* – 2019. – Vol. 36. – P. 1–10. DOI: 10.1080/09603409.2019.1638659

24. Armstrong R.W., Zerilli F.J. Dislocation mechanics aspects of plastic instability and shear banding // *Mech. Mater.* – 1994. – Vol. 17. – P. 319–327. DOI: 10.1016/0167-6636(94)90069

25. Gao C.Y., Zhang L.C., Yan H.X. A new constitutive model for HCP metals // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2011. – Vol. 528. – P. 4445–4452. DOI: 10.1016/j.msea.2011.02.053

26. Donachie M.J., Jr. Titanium. A Technical Guide, 2nd ed. – USA: Materials Park, OH: ASM, 2000. – 381 p.

27. Experimental study on the dynamic tensile behavior of a poly-crystal pure titanium at elevated temperatures / W. Huang, X. Zan, X. Nie, M. Gong, Y. Wang, Y.M. Xia // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2007. – Vol. 443. – P. 33–41. DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.041

References

1. Kelkar, P. U., Kim, H. S., Cho, K.-H., Kwak, J. Y., Kang, C.-Y., Song, H.-C. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review. *Sensors*, 2020, vol. 20, Article number 3132. DOI:10.3390/s20113132

2. Kolpakov A.G. Determination of the average characteristics of elastic frameworks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1985, vol. 49, pp. 739–745.

3. Algreem R.F. An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio $=-1$. *J Elasticity*, 1985, vol. 15. pp. 427–430. DOI:10.1007/BF00042531

4. Konyok D.A., Wojciechowski K.W., Pleskachevsky Yu.M., and Shilko S.V. Materials with negative Poisson's ratio (review). *Mechanics of composite materials and structures*, 2004, vol. 10, pp. 35–69. (in Russian)

5. Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Auxetics among materials with cubic anisotropy. *Mechanics of solids*, 2020, vol. 55, 461–474. DOI:10.3103/S0025654420040044

6. Zhang, J., Lu, G., You, Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review. *Composites Part B: Engineering.*, 2020, Article number 108340. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108340

28. Needleman A., Tvergaard V., Bouchaud E. Prediction of ductile fracture surface roughness scaling // *J. Appl. Mech.* – 2012. – Vol. 79. – Article number 031015. DOI: 10.1115/1.4005959

29. Xiao Y., Hu Y. An extended iterative identification method for the GISSMO model // *Metals.* – 2019. – Vol. 9. – Article number 568. DOI: 10.3390/met9050568

30. Mechanical characterisation of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods / N. Novak, M. Vesenjaj, L. Krstulović-Opara, Z. Ren // *Composite Structures.* – 2018. – Vol. 196. – P. 96–107. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.024

31. Tabacu S., Ducu C. Numerical investigations of 3D printed structures under compressive loads using damage and fracture criterion: Experiments, parameter identification, and validation // *Extreme Mechanics Letters.* – 2020. – Vol. 39. – Article number 100775. DOI: 10.1016/j.eml.2020.100775

32. Additively-manufactured lightweight metamaterials for energy absorption / M. Mohsenizadeh, F. Gasbarri, M. Munther, A. Beheshti, K. Davami // *Materials & Design.* – 2018. – Vol. 139. – P. 521–530. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.037

33. Ullah I., Brandt M., Feih S. Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures // *Materials & Design.* – 2016. – Vol. 92. – P. 937–948. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.12.058

34. Kolken H.M.A., Zadpoor A.A. Auxetic mechanical metamaterials // *RSC Advances.* – 2017. – Vol. 7. – P. 5111–5129. DOI: 10.1039/c6ra27333e

35. Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact / S. Hou, T. Li, Z. Jia, L. Wang // *Materials & Design.* – 2018. – Vol. 160. – P. 1305–1321. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.002

36. Crushing behavior of graded auxetic structures built from inverted tetrapods under impact / N. Novak, M. Borovinšek, M. Vesenjaj, M. Wormser, C. Körner, S. Tanaka, K. Hokamoto, Z. Ren // *Physica Status Solidi B.* – 2018. – Vol. 256. – Article number 1800040. DOI: 10.1002/pssb.201800040

37. Al-Rifaie H., Sumelka W. The development of a new shock absorbing uniaxial graded auxetic damper (UGAD) // *Materials.* – 2019. – Vol. 12. – Article number 2573. DOI: 10.3390/ma12162573

7. Ren, X., Das, R., Tran, P., Ngo, T. D., Xie, Y. M. Auxetic metamaterials and structures: A review. *Smart Materials and Structures*, 2018, vol. 27, Article number 023001. DOI: 10.1088/1361-665x/aaa61c

8. Imbalzano, G., Tran, P., Lee, P. V. S., Gunasegaram, D., Ngo, T. D. Influences of material and geometry in the performance of auxetic composite structure under blast loading. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 846, pp. 476–481. DOI:10.4028/www.scientific.net/amm.846.476

9. Zhao, X., Gao, Q., Wang, L., Yu, Q., Ma, Z. D. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading. *Materials & Design*, 2018, vol. 160, pp. 527–537. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.041

10. Li, C., Shen, H.-S., Wang, H., Nonlinear dynamic response of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core. *Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 100, pp. 3235–3252. DOI: 10.1007/s11071-020-05686-4

11. Qiao, J. X., Chen, C. Q. (2015). Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 83, 47–58. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005

12. Yu, X., Zhou, J., Liang, H., Jiang, Z., Wu, L. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibil-

ity: A brief review. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 94, pp. 114–173. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.12.003

13. Meena, K., Singamneni, S. A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects. *Materials & Design*, 2019, vol. 173, Article number 107779. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107779

14. Wu, W., Hu, W., Qian, G., Liao, H., Xu, X., Berto, F. Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. *Materials & Design*, 2019, vol.180, Article number 107950. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107950

15. Schwerdtfeger, P., Heinel, R., Singer, F., Körner, C. Auxetic cellular structures through selective electron beam melting. *Phys. Status Solidi B*, 2010, vol. 247, pp. 269–272. DOI: 10.1002/pssb.200945513

16. Chen, D., Zheng, X. Multi-material additive manufacturing of metamaterials with giant, tailorable negative Poisson's Ratios. *Scientific Reports*, 2018, vol.8, Article number 9139. DOI: 10.1038/s41598-018-26980-7

17. Yang, W., Li, Z. M., Shi, W., Xie, B. H., Yang, M. B. Review on auxetic materials. *J. Mater. Sci.*, 2004, vol. 39, pp. 3269–3279.

18. Albertini, F., Dirrenberger, J., Molotnikov, A., Sollogoub, C. Computational investigation of the effective mechanical behavior for 3D pre-buckled auxetic lattices, *J. Appl. Mech.*, 2019, vol.86, Article number 111003. DOI: 10.1115/1.4044542

19. Skripnyak, V.V., Skripnyak, E.G., Skripnyak, V.A. Fracture of titanium alloys at high strain rates and under stress triaxiality. *Metals*, 2020, vol.10, Article number 305. DOI: 10.3390/met10030305

20. Huang, W., Zan, X., Nie, X., Gong, M., Wang, Y., Xia, Y.M. Experimental study on the dynamic tensile behavior of a poly-crystal pure titanium at elevated temperatures. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2007, vol. 443, pp. 33–41. DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.041

21. Zhang, B., Wang, J., Wang, Y., Li, Z., Wang, Y. Dynamic strain-rate effect on uniaxial tension deformation of Ti5Al2.5Sn α -titanium alloy at various temperatures. *Mater. High Temper.*, 2019, vol.36, pp. 1–10. DOI: 10.1080/09603409.2019.1638659

22. Bros, H. Michel, M.-L., Castanet, R. Enthalpy and heat capacity of titanium based alloys, *J. Therm. Anal.*, 1994, vol. 41, pp. 7–24. DOI: 10.1007/bf02547007

23. Zhang, B., Wang, J., Wang, Y., Wang, Y., Li, Z. Strain-rate-dependent tensile response of Ti–5Al–2.5Sn alloy. *Materials*, 2019, vol. 12, Article number 659. DOI: 10.3390/ma12040659

24. Armstrong, R.W., Zerilli, F.J. Dislocation mechanics aspects of plastic instability and shear banding. *Mech. Mater.*, 1994, vol. 17, pp. 319–327. DOI: 10.1016/0167-6636(94)90069-8

25. Gao, C.Y., Zhang, L.C., Yan, H.X. A new constitutive model for HCP metals. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2011, 528, pp. 4445–4452. DOI:10.1016/j.msea.2011.02.053.

26. Donachie, M.J., Jr. Titanium A Technical Guide, 2nd ed.; ASM: Materials Park, OH, USA, 2000. –381 p.

27. Huang, W., Zan, X., Nie, X., Gong, M., Wang, Y., Xia, Y.M. Experimental study on the dynamic tensile behavior of a poly-crystal pure titanium at elevated temperatures. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2007, vol.443, pp. 33–41. DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.041

28. Needleman, A., Tvergaard, V., Bouchaud, E. Prediction of ductile fracture surface roughness scaling. *J. Appl. Mech.*, 2012, vol.79, Article number 031015. DOI:10.1115/1.4005959

29. Xiao, Y., Hu, Y. An extended iterative identification method for the GISSMO model. *Metals*, 2019, vol. 9, Article number 568. DOI:10.3390/met9050568

30. Novak, N., Vesenjajk, M., Krstulović-Opara, L., Ren, Z. Mechanical characterisation of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods. *Composite Structures*, 2018, vol. 196, pp. 96–107. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.024

31. Tabacu, S., Ducu, C. Numerical investigations of 3D printed structures under compressive loads using damage and fracture criterion: Experiments, parameter identification, and validation. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, vol.39, Article number 100775. DOI: 10.1016/j.eml.2020.100775

32. Mohsenizadeh, M., Gasbarri, F., Munther, M., Beheshti, A., Davami, K. Additively-manufactured lightweight metamaterials for energy absorption. *Materials & Design*, 2018, vol. 139, pp. 521–530. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.037

33. Ullah, I., Brandt, M., Feih, S. Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures. *Materials & Design*, 2016, vol. 92, pp. 937–948. DOI:10.1016/j.matdes.2015.12.058

34. Kolken, H. M. A., Zadpoor, A. A. Auxetic mechanical metamaterials. *RSC Advances*, 2017, vol. 7, pp. 5111–5129. DOI:10.1039/c6ra27333e

35. Hou, S., Li, T., Jia, Z., Wang, L. Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact. *Materials & Design*, 2018, vol. 160, pp. 1305-1321. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.002

36. Novak, N., Borovinšek, M., Vesenjajk, M., Wormser, M., Körner, C., Tanaka, S., Hokamoto, K., Ren, Z. Crushing behavior of graded auxetic structures built from inverted tetrapods under impact. *Physica Status Solidi B*, 2018, vol. 256, Article number 1800040. DOI: 10.1002/pssb.201800040

37. Al-Rifaie H., Sumelka W. The development of a new shock absorbing uniaxial graded auxetic damper (UGAD). *Materials*, 2019, vol. 12, Article number 2573. DOI: 10.3390/ma12162573