

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.17223/19988621/93/14

Механическое поведение трехслойных структур из алюминиевого сплава со слоями ауксетического метаматериала при динамических воздействиях в диапазоне температур от 153 до 473 К

**Владимир Владимирович Скрипняк¹,
Евгения Георгиевна Скрипняк², Владимир Альбертович Скрипняк³**

^{1, 2, 3} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ skrp2012@yandex.ru

² eva.skrp@mail.ru

³ skrp2006@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования – изучение деформации, разрушения и возможности поглощения энергии трехслойными структурами с прослойкой из ауксетического метаматериала при динамических нагрузках в диапазоне температур от 153 до 473 К. Исследовался отклик слоистых структур из алюминиевого сплава 1520 на динамические нагрузки при ударно-импульсных воздействиях и циклическом знакопеременном нагружении в зависимости от начальных температур. Рассмотрены трехмерные слоистые структуры с прослойкой ауксетического метаматериала, обладающие способностью эффективно поглощать и рассеивать энергию импульсных и циклических воздействий в температурном диапазоне от 153 до 473 К. Показано, что изменение диссипативных свойств рассмотренных трехслойных структур при динамических воздействиях обусловлено как уплотнением слоя ауксетического метаматериала, так и повреждением и разрушением его каркасных элементов. Резкое снижение коэффициента диссипации энергии при импульсном нагружении структур происходит при превышающей 69% деформации сжатия слоя ауксетического метаматериала с рассмотренными топологическими характеристиками. Влияние повышения температуры за счет диссипации энергии в условиях рассмотренных динамических воздействий на геометрические параметры метаматериала и его физико-механические и теплофизические характеристики незначительно. Более существенным является влияние изменения характеристик за счет вариации начальной температуры в диапазоне от 153 до 473 К.

Ключевые слова: слоистые структуры, ауксетический метаматериал, импульсные нагрузки, поглощение энергии, диссипативные свойства, влияние температуры

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-29-00349).

Для цитирования: Скрипняк В.В., Скрипняк Е.Г., Скрипняк В.А. Механическое поведение трехслойных структур из алюминиевого сплава со слоями ауксетического метаматериала при динамических воздействиях в диапазоне температур от 153 до 473 К // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 93. С. 172–185. doi: 10.17223/19988621/93/14

Mechanical behavior of three-layer structures made of aluminum alloy with layers of auxetic metamaterial under dynamic impacts in the temperature range of 153–473 K

Vladimir V. Skripnyak¹, Evgeniya G. Skripnyak², Vladimir A. Skripnyak³

^{1,2,3} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ skrp2012@yandex.ru

² eva.skrp@mail.ru

³ skrp2006@yandex.ru

Abstract. This paper presents the results of a numerical study of deformation, fracture, and energy absorption by three-layer structures with an auxetic metamaterial interlayer under dynamic loads in the temperature range of 153–473 K. The response of layered systems made of aluminum alloy 1520 to the shock-pulse impacts and cyclic loading at initial temperatures within the specified range is investigated. The 3D layered structures with the auxetic metamaterial interlayer that can effectively absorb and dissipate the energy of pulse impacts are considered. It is shown that a decrease in the dissipative properties of the three-layer structures with the auxetic metamaterial layer made of aluminum alloy 1520 under dynamic loading is a result of the irreversible compaction of the metamaterial layer and concurrent damages and fractures of the metamaterial elements. A sharp decrease in the energy dissipation factor occurs when the compression strain of the auxetic metamaterial layer exceeds 69% regardless of the initial temperature. The effect of increasing temperature due to energy dissipation on the geometric, physical, mechanical, and thermal characteristics of the metamaterial layer is inconsiderable. These characteristics are significantly affected by initial temperature variations in the range of 153–473 K.

Keywords: layered systems, auxetic metamaterial, pulse loads, energy absorption, dissipative properties, temperature effect

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00349).

For citation: Skripnyak, V.V., Skripnyak, E.G., Skripnyak, V.A. (2025) Mechanical behavior of three-layer structures made of aluminum alloy with layers of auxetic metamaterial under dynamic impacts in the temperature range of 153–473 K. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 93. pp. 172–185. doi: 10.17223/19988621/93/14

Введение

Интенсивность экспериментальных и теоретических исследований свойств и закономерностей механической реакции при квазистатических и динамических режимах нагружения пространственных 2D и 3D каркасных структур и метаматериалов на их основе обусловлена расширением возможностей производства новых типов полимерных и металлических метаматериалов с использованием 3D-печати. Большой интерес проявляется к особенностям механического поведения ауксетических метаматериалов, обладающих, в отличие от традиционных

конструкционных металлических, керамических и полимерных материалов, отрицательным коэффициентом Пуассона. В последние годы в связи с перспективами использования в различных технических и медицинских приложениях поведение в условиях динамического нагружения слоистых структур, содержащих прослойки ауксетических метаматериалов, интенсивно изучалось экспериментально и с применением методов численного моделирования. Механическое поведение 3D-объемов из ауксетических метаматериалов, изготовленных из разных материалов: алюминиевого сплава, АБС (Акрилонитрил Бутадиен Стирола) пластика и стали авторами было исследовано при динамическом изгибе и сжатии со скоростями 5 и 25 м/с [1]. Показано, что в отличие от механического поведения ауксетических метаматериалов в условиях квазистатического нагружения их отклик на динамические воздействия, приводящие к сжатию и изгибу, зависит не только от их относительной массовой плотности и топологических параметров элементарных ячеек, но и от эффективной скорости деформации (скорости деформации представительного объема метаматериала), а также прочностных свойств конструкционных материалов, используемых для изготовления каркасных элементов.

При сжатии в широком диапазоне скоростей деформации объемы рассмотренных ауксетических метаматериалов показывают относительно высокие пиковые напряжения в области упругих деформаций и высокие удельные характеристики диссипации механической энергии, обусловленные пластической деформацией каркасных элементов. Было установлено, что при переходе от АБС пластика на алюминиевый сплав при создании метаматериалов с эквивалентными структурными параметрами пиковое напряжение увеличивается в 6,3 раза, а величина диссипируемой энергии – в 47,6 раза. Полученные в [1] результаты указывают на перспективность применения алюминиевых ауксетических метаматериалов в качестве демпфирующих структур.

Авторы [2] выполнили экспериментальные и численные исследования поведения при динамических воздействиях с амплитудами скорости от 1 до 70 м/с модельных возвратных ауксетических структур с вогнутыми каркасными элементами, изготовленных из АБС полимерного материала по технологии 3D-печати. Было показано, что при увеличении угла между каркасными элементами в элементарных ячейках возвратного ауксетического метаматериала сопротивление ударному воздействию уменьшается, а количество поглощенной энергии увеличивается. При фиксированном начальном указанном угле с увеличением скорости удара напряжение деформирования и величина поглощенной энергии возрастают.

Авторы [3] исследовали поглощение механической энергии при динамическом воздействии на модельные структуры ауксетических метаматериалов с криволинейными каркасными элементами. Ими показано, что градиентная настройка толщины стенок каркасных элементов приводит к увеличению абсолютной величины отрицательного коэффициента Пуассона на 44,6%, а настройка отношения высоты к длине элементарной ячейки увеличивает максимальную эффективность поглощения энергии на 14,7%. Экспериментальные исследования ударного воздействия на модельную структуру трехслойной панели с прослойкой из ауксетического метаматериала показали, что гофрированная градиентная структура имеет лучшие характеристики рассеивания энергии, чем гофрированная классическая возвратная структура.

Авторы [4] выполнили экспериментальные и конечно-элементные численные исследования колебаний трехслойных структур с промежуточным слоем из ауксетического метаматериала с каркасными элементами, созданными из полимерного композита с эпоксидной матрицей, армированной углеродным волокном. Они показали, что для рассмотренных трехслойных структур полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными о собственных частотах шести первых мод. Обнаружено, что собственные частоты рассмотренных трехслойных пластин зависят от толщины и площади слоя ауксетического метаматериала и увеличиваются с ростом его относительной плотности.

Авторы [5] выполнили экспериментальные и численные исследования ауксетических метаматериалов, изготовленных по технологии 3D-печати из полимерного материала WEILA 8000, при вибрационных воздействиях в диапазоне частот 0–16 кГц. Было показано, что ауксетические возвратные метаматериалы обладают способностью поглощения энергии и обеспечивают виброизоляцию на низких и высоких частотах.

Отметим, что исследования механических и функциональных свойств слоистых структур и ауксетических метаматериалов при квазистатических и динамических нагрузках проводились преимущественно при комнатной температуре. В то же время существует большое количество технических и медицинских задач, требующих демпфирования динамических нагрузок и диссипации энергии механических воздействий при повышенных и пониженных температурах относительно комнатной температуры.

Цель исследования, результаты которого представлены ниже, – изучение деформации, разрушения и возможности поглощения и диссипации энергии трехслойными структурами с промежуточным слоем из ауксетического метаматериала при динамических нагрузках в температурном диапазоне от 153 до 473 К.

1. Модель трехслойной структуры с прослойкой из ауксетического метаматериала

Численно исследован механический отклик модельного трехслойного демпфера из алюминиевого сплава 1520 (AA5052 H32) с внутренним слоем из алюминиевого ауксетического метаматериала при температурах до начала нагружения 153, 295 и 474 К при воздействии на поверхность верхней панели интенсивных ударных импульсов с амплитудами от 100 до 25 м/с и длительностью до 10 мс или интенсивных гармонических нагрузок.

Трехслойный механический демпфер с внутренним слоем из ауксетического метаматериала, рассмотренный в данном исследовании, представлен на рис. 1, *a*.

Геометрические параметры элементарной ячейки ауксетического метаматериала представлены на рис. 1, *b*. Изучался отклик модельного объема трехслойного демпфера механических нагрузок с размерными параметрами $L = 120$ мм, $H = 87$ мм, $w = 20$ мм, $t = 1$ мм, $l = 11,87$ мм, $h = 28$ мм, $\theta = 47,9^\circ$. Масса трехслойной конструкции составляет 0,1524 кг. Масса прослойки ауксетического метаматериала равна 0,1224 кг, средняя массовая плотность прослойки метаматериала 522 кг/м³.

Геометрические параметры элементарной ячейки метаматериала определяют его эффективные физико-механические характеристики: массовую плотность, модули упругости и предел текучести, а также коэффициенты теплового расши-

рения [6]. Геометрические характеристики элементарной ячейки метаматериала меняются при воздействии нагрузок или при отклонении температуры от комнатной. Вследствие указанных изменений топологических параметров элементарной ячейки меняются и эффективные механические и тепловые характеристики деформированного метаматериала.

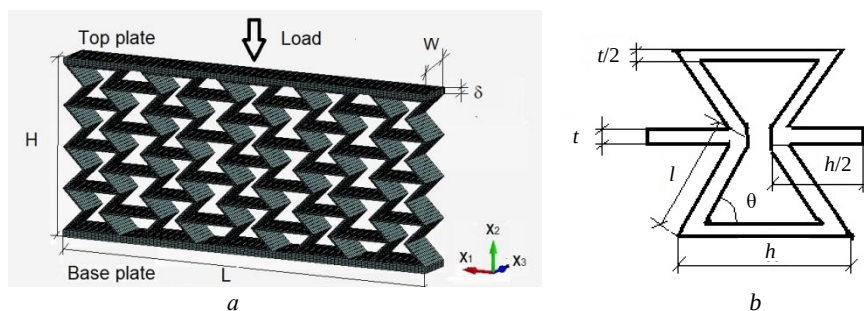


Рис. 1. Трехслойный механический демпфер с внутренним слоем из ауксетического метаматериала (a); геометрические параметры элементарной ячейки ауксетического метаматериала (b)

Fig. 1. (a) Three-layer mechanical damper with an inner layer of the auxetic metamaterial and (b) geometric parameters of a unit cell of the auxetic metamaterial

Отметим, что зависимость геометрических параметров и эффективных модулей упругости метаматериала от начальной температуры приводит к изменению частот собственных мод колебаний, что учитывалось при анализе воздействия циклических нагрузок на демпфер.

2. Модель механического поведения алюминиевой трехслойной структуры с прослойкой из ауксетического метаматериала

Вычислительная модель механического поведения алюминиевой трехслойной структуры с прослойкой из ауксетического метаматериала использует теоретическую основу механики сплошных сред с повреждениями [6–11]. Для характеристики диссипативных свойств слоистых структур с межслоевым каркасом из метаматериала при высоких скоростях деформации применялся коэффициент диссипации энергии λ [12]:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \int_0^t \frac{W^s(t) - W_{\text{int}}^s(t)}{W^s(t)} dt, \\ W^s(t) &= \int_0^t F_{TP}(t) v dt, \\ W_{\text{int}}^s(t) &= \int_V \left[\int_0^{\varepsilon_{ij}(t)} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right] dV + 0.5 \int_V \rho v^2 dV, \\ W^{\text{diss}}(t) &= \int_V \left[\int_0^{\varepsilon_{ij}^p(t)} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p \right] dV, \end{aligned} \quad (1)$$

$$W^k(t) = \int_V 0.5 \rho v^2 dV.$$

где $W^S(t)$ – величина поглощенной энергии, изменяющаяся во времени в процессе нагружения слоистой структуры, W_{int}^S – величина внутренней энергии слоистой структуры, зависящая от времени деформирования, ρ – массовая плотность материалов элементов слоистой структуры, в том числе каркасных элементов метаматериала, W^k – кинетическая энергия слоистой структуры в момент времени t , W^{diss} – величина диссипированной энергии, v – модуль вектора скорости материальных частиц в элементах слоистой структуры, $F_{TP}(t)$ – усилие нагружения, приложенное к верхней поверхности слоистой структуры, $\sigma_{ij}(t)$ – компоненты тензора напряжений, $d\varepsilon_{ij}$ – приращение компонент тензора деформаций материальных частиц каркасных элементов, $d\varepsilon_{ij}^p$ – приращение компонент тензора пластических деформаций материальных частиц каркасных элементов, V – объем конденсированной фазы материалов в элементах трехслойной структуры.

Поскольку в объеме метаматериала между элементами каркаса присутствует поровое пространство, объем которого уменьшается в процессе деформации сжатия метаматериала, при вычислении энергетических характеристик слоистой структуры с использованием (1) интегрирование выполняется по объему конструктивных материалов, из которых изготовлены элементы слоистой структуры. Отметим, что, в отличие от квазистатического нагружения, при динамических воздействиях часть энергии внешнего воздействия, поглощаемой демпфером, определяется кинетической энергией элементов его конструкции, учитываемой в W_{int}^S .

3. Результаты и обсуждение

Механический отклик трехслойной структуры с внутренним слоем ауксетического метаматериала на динамические нагрузки моделировался с использованием трехмерных лагранжевых элементов и контроля эффекта «песочных часов» искажения элемента сетки. Моделирование выполнялось с использованием явного решателя WB ANSYS LS DYNA 19.2. В расчетах использовалась сетка из восьми узловых гексаэдрических твердотельных элементов со средним размером 0.3 мм. При численном решении достигнута сходимость расчетных параметров напряженно-деформированного состояния и параметров процесса рассеяния энергии, связанного с развитием повреждений.

Сопротивление сжатию алюминиевого слоя метаматериала в трехслойной структуре уменьшается при повышении начальной температуры. В результате достижение максимального уплотнения слоя метаматериала происходит за меньшее время по сравнению с условиями нагружения при более низких температурах.

Результаты, представленные на рис. 2, свидетельствуют, что на опорной поверхности трехслойной структуры величина нагрузки существенно ниже, чем на верхней поверхности нагружаемой структуры. Таким образом, способность демпфирования импульсных воздействий сохраняется у рассматриваемой слоистой структуры из алюминиевого сплава 1520 как для пониженных температур от 153 К, так и для повышенных – до 473 К. Отметим, что демпфирующие свойства рассматриваемых трехслойных структур определяются деформацией слоя ауксетического метаматериала. Изменение удельной диссипируемой энергии трех-

слоистой алюминиевой структуры с прослойкой из ауксетического метаматериала в исследуемом диапазоне температур обусловлено деформацией каркасных элементов и уплотнением слоя метаматериала.

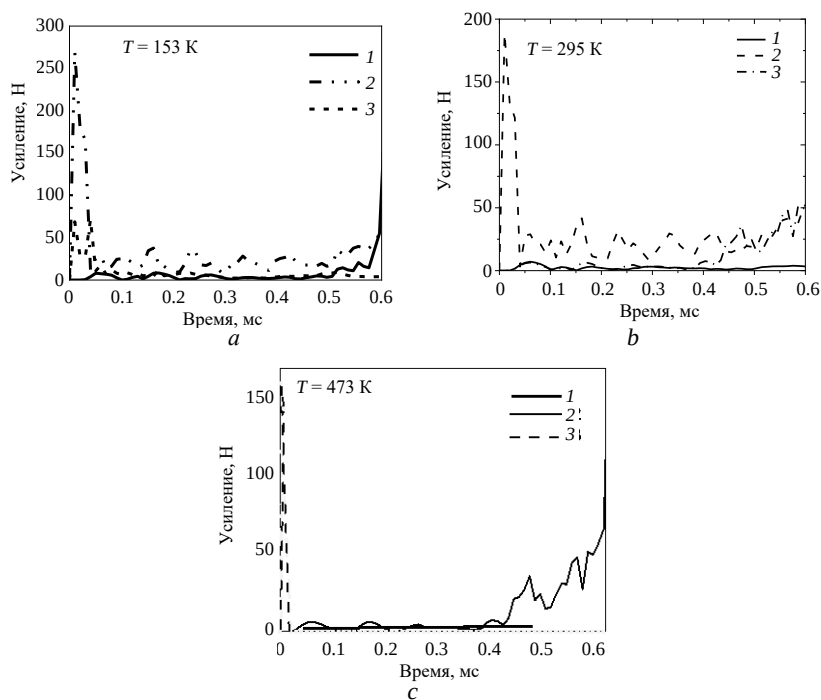


Рис. 2. Расчетная зависимость силы реакции от времени при импульсном нагружении трехслойной алюминиевой структуры со слоем ауксетического метаматериала при начальных температурах 153 К (а), 295 К (b) и 473 К (c) с амплитудами 100 м/с (линии 1, 2) и 50 м/с (линия 3) на опорной поверхности (линия 1) и верхней поверхности (линии 2, 3)

Fig. 2. Calculated reaction force versus time under pulse loading of a three-layer aluminum damper with an auxetic metamaterial layer at the initial temperatures of (a) 153, (b) 295, and (c) 473 K with amplitudes of 100 m/s (curves 1,2) and 50 m/s (curve 3) on the base surface (curve 1) and upper surface (curves 2,3)

На рис. 3 показаны изменения поглощенной, диссипируемой и кинетической энергий трехслойной механической структуры с прослойкой из ауксетического метаматериала при импульсном воздействии с амплитудой 100 м/с на верхнюю поверхность трехслойной структуры при начальных температурах 153, 295 и 473 К. На рис. 3 в качестве деформации указана главная компонента тензора условной деформации, определяемая относительным изменением толщины слоистой структуры при сжатии $\epsilon_1 = \Delta H/H$.

Результаты моделирования показали, что в диапазоне температур от 153 до 473 К рассматриваемая конструкция алюминиевой структуры с внутренним слоем из ауксетического метаматериала обеспечивает поглощение и рассеивание подводимой механической энергии при импульсном нагружении с амплитудой 100 м/с.

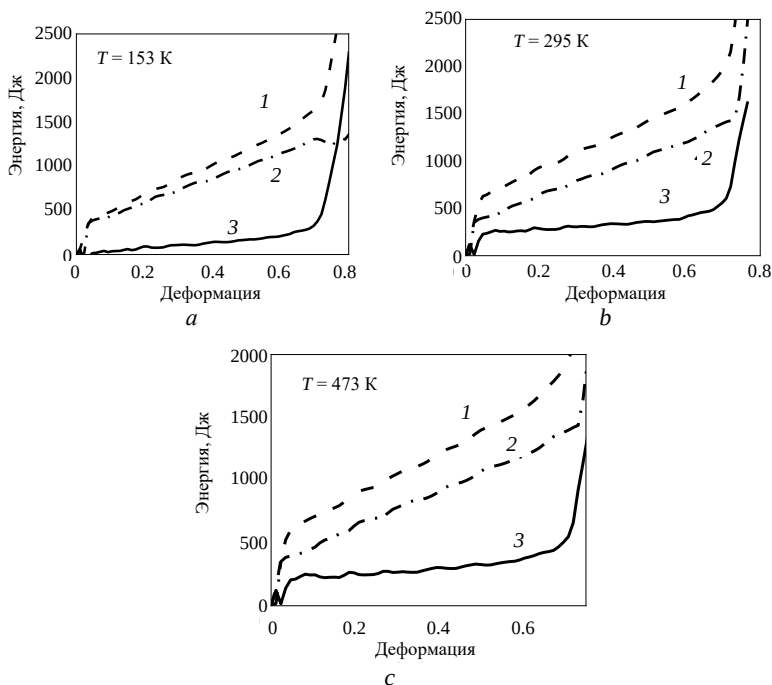


Рис. 3. Зависимости поглощенной энергии (1), внутренней энергии слоистой структуры (2), диссипированной энергии (3) от компоненты главного тензора деформации трехслойного механического демпфера с внутренним слоем ауксетического метаматериала при ударном импульсном нагружении амплитудой 100 м/с при начальной температуре 153 К (а), 295 К (b), 473 К (с)

Fig. 3. (1) Absorbed energy, (2) internal energy of the layered structure, and (3) dissipated energy as the functions of the principal strain of the three-layer mechanical damper with an auxetic metamaterial interlayer under shock pulse loading with an amplitude of 100 m/s at the initial temperatures of (a) 153, (b) 295, and (c) 473 K

На рис. 4, а показано изменение параметра λ нагружения образца трехслойной структуры с прослойкой ауксетического метаматериала. Снижение значений λ при превышении времени до 0,6003 мс указывает на исчерпание диссипативных возможностей у деформированных структур метаматериала. На вкладке к рис. 4, а показано, что в указанный момент времени было достигнуто полное снятие структур ячеек метаматериала. При постоянной скорости сжатия слоистой структуры, равной 100 м/с, к моменту времени 0,6003 мс толщина трехслойной структуры H уменьшится на величину $\Delta H = 60,03$ мм. Степень условной деформации сжатия, при которой рассмотренная трехслойная структура исчерпывает возможность демпфировать импульсную нагрузку, составляет $\Delta H/H = 0.69$. Поскольку деформация сжатия верхней и нижней панелей трехслойной структуры мала, можно считать, что диссипативные свойства прослойки ауксетического метаматериала сохраняются при сжатии до степени $\sim 69\%$.

Потеря устойчивости каркасных элементов метаматериала и их пластическая деформация при уплотнении слоя при сжатии свыше 69% сопровождаются резким снижением коэффициента диссипации энергии λ .

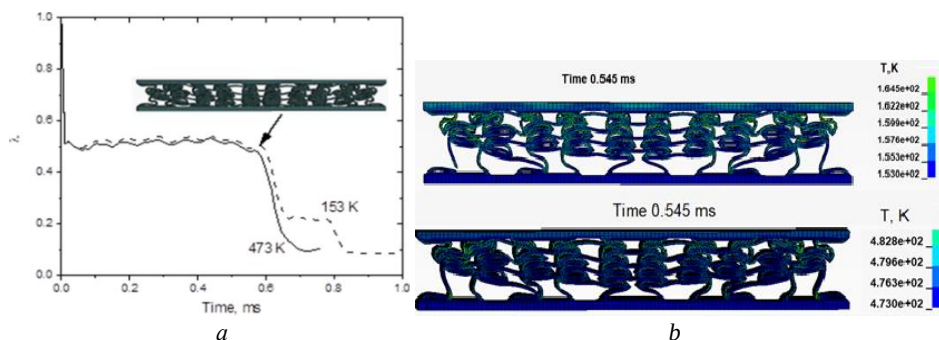


Рис. 4. Зависимость коэффициента рассеяния энергии λ от времени при импульсном нагружении трехслойной структуры с амплитудой 100 м/с при начальных температурах 153 и 473 К (а); расчетная температура в элементах каркаса трехслойной структуры через 0,545 мс после начала импульсного нагружения с амплитудой 100 м/с (b): верхняя вставка соответствует начальной температуре 153 К, нижняя – температуре 473 К

Fig. 4. (a) Time dependence of the energy dissipation coefficient λ for the three-layer damper under shock pulse loading with an amplitude of 100 m/s at the initial temperatures of 153 and 473 K and (b) calculated temperature in the frame elements of the three-layer damper in 0.545 ms after pulse loading initiation with an amplitude of 100 m/s; the upper and the lower images correspond to the initial temperatures of 153 K and 473 K, respectively

Таким образом, способность демпфирования нагрузки трехслойными алюминиевыми структурами с внутренним слоем из ауксетического метаматериала и величина диссипированной механической энергии зависят от длительности процесса уплотнения слоя метаматериала, которая уменьшается с ростом амплитуды скорости нагружения и ростом рабочей температуры.

Температура в пластически деформированных локальных объемах элементов каркаса метаматериала при импульсном нагружении с амплитудой 100 м/с увеличивается на десятки кельвинов, как показано на рис. 4, b. Отметим незначительное влияние указанного повышения температуры на физико-механические и теплофизические характеристики алюминиевого сплава. Более существенными являются изменения физико-механических характеристик (пределов текучести, напряжения пластического течения, деформаций зарождения повреждений, модулей упругости) при изменении начальной температуры в диапазоне от 153 до 473 К.

Результаты моделирования свидетельствуют, что усталостная долговечность слоистых структур из алюминиевого сплава 1520 при начальных температурах 153 и 473 К, гармонических нагрузках с частотами до 2,5 кГц, коэффициентом асимметрии цикла нагружения -1 и амплитуде скорости нагружения 100 м/с существенно отличается от долговечности эквивалентных структур при комнатной температуре.

Уменьшение амплитуды колебаний с ростом расстояния от поверхности нагружения, вызванное диссипацией энергии и частичным разрушением элементов каркаса метаматериала при комнатной температуре, показано на рис. 5.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности исследуемой трехслойной структуры из алюминиевого сплава 1520 быть изолятором рассматриваемых гармонических воздействий до разрушения метаматериала.

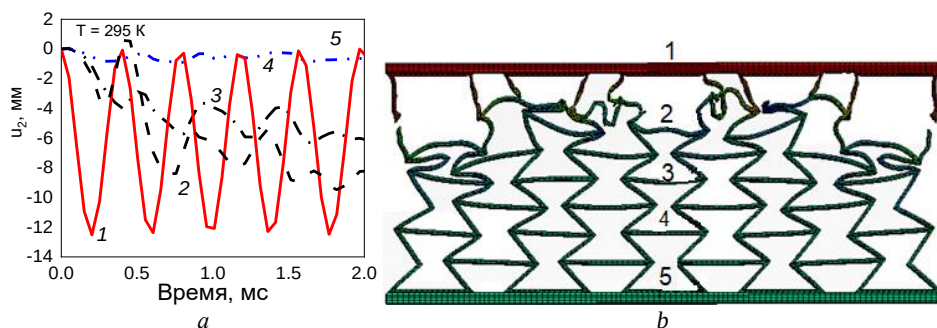


Рис. 5. Временное изменение перемещений в лагранжевых точках 1–5 (а), положения которых указаны на вкладке (b); деформации и частичное разрушение элементов трехслойной структуры при циклическом нагружении с частотой 2,5 кГц и амплитудой скорости нагружения 100 м/с при комнатной температуре (b)

Fig. 5. (a) Time dependence of displacements in the Lagrange points 1-5 arranged as presented in figure (b); (b) deformations and partial fracture of the elements of the three-layer system under cyclic loading with a frequency of 2.5 kHz and a velocity amplitude of 100 m/s at room temperature

Рассматривалось гармоническое нагружение трехслойных структур с частотами, удовлетворяющими условию

$$f_{cycl} > 0,25 v^{amp}/[H_m - m/(\rho_c S)], \quad (2)$$

где f_{cycl} – частота гармонического воздействия, v^{amp} – амплитуда скорости в цикле нагружения вдоль оси x_2 , показанной на рис. 1, $H_m = H - 2\delta$ – толщина прослойки метаматериала, m – масса прослойки метаматериала, ρ_c – массовая плотность материала элемента каркаса метаматериала, S – площадь проекции объема метаматериала на нижнюю опорную поверхность.

Условие (2) обеспечивает сохранение возможности сжатия прослойки метаматериала в цикле нагружения. Результаты численного моделирования механического отклика алюминиевой трехслойной структуры с прослойкой из ауксетического метаматериала на нагружение с коэффициентом асимметрии цикла нагружения $R = -1$ (см. рис. 5) показали способность трехслойной структуры демпфировать вибрационные нагрузки даже при частичном разрушении элементов ауксетического метаматериала. На рис. 5 амплитуда скорости колебаний на уровне точек 4 и 5 мала и близка к нулю, тогда как амплитуда скорости на верхней поверхности вблизи точки 1 составляет 100 м/с. Разрушение рассматриваемых слоистых структур при растяжении в цикле нагружения происходит в слое метаматериала не одновременно. Разрушение изгибаемых элементов каркаса начинается в зонах их соединения в структуре ауксетического метаматериала при нагрузках, нормальных к верхней поверхности. На рис. 6, а результаты численного моделирования показывают, что исследуемая трехслойная структура из алюминиевого сплава 1520 со слоем из ауксетического метаматериала способна демпфировать высокочастотные гармонические нагрузки в диапазоне начальных температур от 153 до 473 К даже при развитии разрушения элементов метаматериала.

Результаты моделирования на рис. 6, b свидетельствуют, что исследуемая трехслойная структура способна демпфировать циклические воздействия в ограниченном диапазоне количества циклов нагружения и времени нагружения.

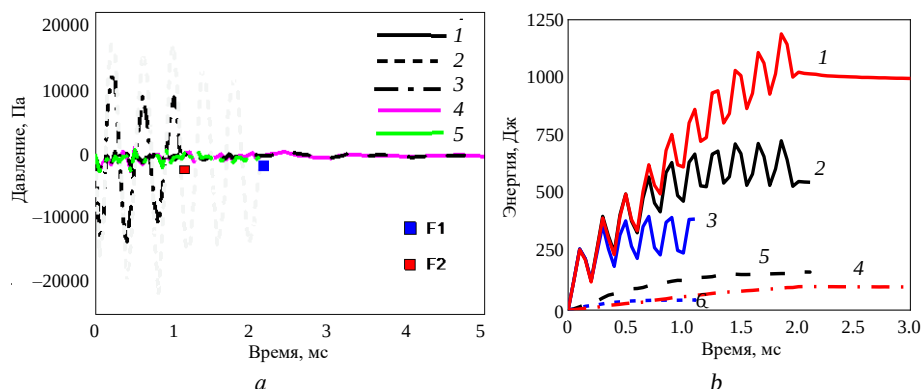


Рис. 6. Изменения давления во времени при циклическом нагружении верхней поверхности трехслойной структуры с прослойкой из ауксетического метаматериала из алюминиевого сплава 1520 с частотой 2,5 кГц и амплитудой скорости 100 м/с и при начальных температурах 473 К (линия 1), 295 К (линия 2), 153 К (линия 3), а также на нижней опорной поверхности при 295 К (линия 4) и 473 К (линия 5) (а); разрушение каркасных элементов метаматериала в зоне контакта с нагружаемой пластиной при начальной температуре 295 К и 153 К показано символами F1 и F2 соответственно; зависимость поглощенной энергии от времени при циклическом воздействии на трехслойную структуру с частотой 2,5 кГц и амплитудой скорости нагружения 100 м/с при начальных температурах 153, 295, 473 К (кривые 1, 2, 3 соответственно) и зависимость диссипированной энергии от времени (кривые 4, 5, 6 соответственно) (b)

Fig. 6. (a) Pressure variation with time during cyclic loading of the top surface of the three-layer structure with an auxetic metamaterial interlayer made of aluminum alloy 1520 at a frequency of 2.5 kHz and a velocity amplitude of 100 m/s with the initial temperatures of 473 K (curve 1), 295 K (curve 2), 153 K (curve 3), and at the bottom base surface of the structure at the temperatures of 295 K (curve 4) and 473 K (curve 5); F1 and F2 indicate the fracture of the metamaterial frame elements in the contact zone with the top surface at the temperatures of 295 K and 153 K, respectively; (b) time dependence of the absorbed energy during cyclic loading of the top surface of the three-layer structure with a frequency of 2.5 kHz and a velocity amplitude of 100 m/s at the initial temperatures of 473 K, 295 K, and 153 K (curves 1, 2, 3, respectively), and time dependence of the dissipated energy (curves 4, 5, 6, respectively)

Усталостная долговечность рассмотренной трехслойной структуры увеличивается с ростом температуры, но диссипируемая энергия при этом уменьшается. При начальной температуре 473 К рассмотренная конструкция из алюминиевой трехслойной структуры с прослойками ауксетического метаматериала способна демпфировать циклические воздействия с частотой 2.5 кГц и амплитудами скорости нагружения 100 м/с более 100 циклов нагружения. Релаксация амплитуды колебаний, вызванная диссипацией энергии и частичным разрушением элементов каркаса метаматериала, ускорится при понижении начальной температуры.

Заключение

Проведено численное исследование слоистых структур с прослойкой из ауксетического метаматериала из алюминиевого сплава 1520 при импульсных воздействиях и гармоническом нагружении в широком диапазоне начальных температур от 152 до 473 К.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Способность рассмотренных трехслойных структур демпфировать импульсные нагрузки с амплитудами скорости до 100 м/с и циклические механические воздействия с частотами до 2.5 кГц сохраняется в диапазоне начальных температур от 152 до 473 К.

Изменение диссипативных свойств трехслойных структур со слоем из ауксетического метаматериала при динамическом нагружении в диапазоне начальных температур от 152 до 473 К обусловлено не только деформацией уплотнения слоя метаматериала, но и повреждением и разрушением элементов каркаса метаматериала.

Разрушение элементов каркаса ауксетического метаматериала в динамически нагружаемых трехслойных структурах в диапазоне начальных температур от 152 до 473 К начинается при изгибе в зонах их соединения в конструкции ауксетического метаматериала при динамических нагрузках, нормальных к верхней поверхности. Наиболее опасными для сохранения прочности метаматериала являются знакопеременные циклические нагрузки, приводящие к развитию повреждений и разрушению части каркасных элементов ауксетического метаматериала.

Список источников

1. Gao D., Zhang J., Zhang C., You Y. Dynamic compressive and flexural behaviour of re-entrant auxetics: A numerical study // *Materials*. 2023. V. 16. Art. 5219. doi: 10.3390/ma16155219
2. Zhang J., Shi B.-Q., Wang B., Yu G.-Q. Crushing Response and Optimization of a Modified 3D Re-Entrant Honeycomb // *Materials*. 2024. V. 17. Art. 2083. doi: 10.3390/ma17092083
3. Zhang H., Chen P., Zhang Z., Lin G., Sun W. Structural response and energy absorption assessment of corrugated wall mechanical metamaterials under static and dynamic compressive loading // *International Journal of Impact Engineering*. 2023. V. 172. Art. 104427. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104427
4. Jiang W., Zhou J., Jiayi Liu, Zhang M., Huang W. Free vibration behaviours of composite sandwich plates with reentrant honeycomb cores // *Applied Mathematical Modelling*. 2023. V. 116. P. 547–568. doi: 10.1016/j.apm.2022.12.004
5. Gao X., Wei J., Huo J., Wan Z., Li Y. The vibration isolation design of a re-entrant negative poisson's ratio metamaterial // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. Art. 944. doi: 10.3390/app13169442
6. Скрипняк В.А., Чирков М., Скрипняк В.В. Механическое поведение алюминиевого сплава 1520 при растяжении в диапазоне скоростей деформации от 10^{-1} до 10^3 с $^{-1}$ // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2023. № 86. С. 120–135. doi: 10.1016/j.mechmat.2023.104605
7. Dæhli L.E.B., Johnsen J., Berstad T., Borvik T., Hopperstad O.S. An experimental-numerical study on the evolution of the Taylor–Quinney coefficient with plastic deformation in metals // *Mechanics of Materials*. 2023. V. 179. Art.104605. doi: 10.17223/19988621/86/9
8. Gurson A.L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part 1 – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1977. V. 99. P. 2–15. doi: 10.1115/1.3443401
9. Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions // *International Journal of Fracture*. 1981. V. 17. P. 389–407. doi: 10.1007/BF00036191
10. Tvergaard V. On localization in ductile materials containing spherical voids // *International Journal of Fracture*. 1982. V. 18. P. 237–252. doi: 10.1007/BF00015686
11. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // *Engineering Fracture Mechanics*. 1985. V. 2. P. 31–48. doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

12. Skripnyak V.A., Chirkov M.O., Skripnyak V.V. Specific damping capacity of layered structures with a layer of dissipative metamaterial under quasistatic and dynamic impacts // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2024. V. 17. P. 91–96. EDN: QPKVXR

References

1. Gao D., Zhang J., Zhang C., You Y. (2023) Dynamic compressive and flexural behaviour of re-entrant auxetics: A numerical study. *Materials*. 16. Article 5219. doi: 10.3390/ma16155219
2. Zhang J., Shi B.-Q., Wang B., Yu G.-Q. (2024) Crushing response and optimization of a modified 3D re-entrant honeycomb. *Materials*. 17. Article 2083. doi: 10.3390/ma17092083
3. Zhang H., Chen P., Zhang Z., Lin G., Sun W. (2023) Structural response and energy absorption assessment of corrugated wall mechanical metamaterials under static and dynamic compressive loading. *International Journal of Impact Engineering*. 172. Article 104427. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104427
4. Jiang W., Zhou J., Liu J., Zhang M., Huang W. (2023) Free vibration behaviours of composite sandwich plates with reentrant honeycomb cores. *Applied Mathematical Modelling*. 116. pp. 547–568. doi: 10.1016/j.apm.2022.12.004
5. Gao X., Wei J., Huo J., Wan Z., Li Y. (2023) The vibration isolation design of a re-entrant negative poisson's ratio metamaterial. *Applied Sciences*. 13. Article 9442. doi: 10.3390/app13169442
6. Skripnyak V.A., Chirkov M.O., Skripnyak V.V. (2023) Mekhanicheskoe povedenie alyuminiyevogo splava 1520 pri rastyazhenii v diapazone skorostey deformatsii ot 10^{-1} do 10^3 s^{-1} [Mechanical behavior of aluminum alloy 1520 under tension in the range of strain rates from 10^{-1} to 10^3 s^{-1}]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 86. pp. 120–135. doi: 10.17223/19988621/86/9
7. Dæhli L.E.B., Johnsen J., Berstad T., Borvik T., Hopperstad O.S. (2023) An experimental-numerical study on the evolution of the Taylor–Quinney coefficient with plastic deformation in metals. *Mechanics of Materials*. 179. Article 104605. doi: 10.1016/j.mechmat.2023.104605
8. Gurson A.L. (1977) Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part 1 – yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 99. pp. 2–15. doi: 10.1115/1.3443401
9. Tvergaard V. (1981) Influence of voids on shear band instabilities under plane strain condition. *International Journal of Fracture*. 17. pp. 389–407. doi: 10.1007/BF00036191
10. Tvergaard V. (1982) On localization in ductile materials containing spherical voids. *International Journal of Fracture*. 18. pp. 237–252. doi: 10.1007/BF00015686
11. Johnson G.R., Cook W.H. (1985) Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 2. pp. 31–48. doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9
12. Skripnyak V.A., Chirkov M.O., Skripnyak V.V. (2024) Specific damping capacity of layered structures with a layer of dissipative metamaterial under quasistatic and dynamic impacts. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 17. pp. 91–96. EDN: QPKVXR

Сведения об авторах:

Скрипняк Владимир Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики деформируемого твердого тела Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: skrp2012@yandex.ru

Скрипняк Евгения Георгиевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики деформируемого твердого тела Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: eva.skrp@mail.ru

Скрипняк Владимир Альбертович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой механики деформируемого твердого тела Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: skrp2006@yandex.ru

Information about the authors:

Skrpnyak Vladimir V. (Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: skrp2012@yandex.ru

Skrpnyak Evgeniya G. (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: eva.skrp@mail.ru

Skrpnyak Vladimir A. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: skrp2006@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22.10.2024; принята к публикации 07.02.2025

The article was submitted 22.10.2024; accepted for publication 07.02.2025