

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.17223/19988621/79/8

## Моделирование напряженного состояния в преградах из анизотропных материалов

Марина Николаевна Кривошеина

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН,  
Томский государственный университет, Томск, Россия, marina@ispms.ru*

**Аннотация.** Приведены результаты численного моделирования в трехмерной постановке процесса деформирования преграды из ГПУ-монокристалла при ее ударном нагружении. Материал преграды характеризуется анизотропией упругих и пластических свойств. Приведены результаты моделирования напряжения с учетом анизотропии холодной и тепловой частей давления. Анизотропия девиатора напряжений в области упругих деформаций моделируется с помощью обобщенного закона Гука, в области пластических деформаций – с использованием функции пластичности Мизеса–Хилла (1948). В области пластических деформаций анизотропия холодной части давления определяется с помощью учета анизотропии упругих свойств, а тепловой части давления – за счет учета анизотропии коэффициента Грюнайзена. Сравниваются профили скоростей тыльных поверхностей преград из монокристаллического цинка при их откольном разрушении, полученные в натуральных экспериментах и численно, по предложенной модели. Показано, что в случае совпадения направления ударного нагружения с осью [0001] в монокристаллическом цинке на профиле скорости тыльной поверхности преграды отсутствует выход упругого предвестника в численном расчете, как и в натурном эксперименте.

**Ключевые слова:** коэффициент Грюнайзена, анизотропия свойств, уравнение состояния, монокристалл, динамическое нагружение

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0011.

**Для цитирования:** Кривошеина М.Н. Моделирование напряженного состояния в преградах из анизотропных материалов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 79. С. 89–99. doi: 10.17223/19988621/79/8

## Simulation of the stress state in barriers made of anisotropic materials

Marina N. Krivosheina

*Institute of Strength Physics and Materials Science  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, marina@ispms.ru*

**Abstract.** To study the properties of anisotropic materials, a mathematical model is proposed that accounts for the anisotropy of elastic and plastic properties, as well as the anisotropy of “thermal” and “cold” components of pressure. The model is applied in a three-dimensional simulation of the deformation of an HCP-single-crystal barrier under impact loading by an aluminum impactor. The numerical simulation results are obtained using the dynamic finite element method with a difference scheme modified to account for the anisotropy of “cold” and “thermal” pressure components. To simulate the anisotropy of the stress deviator in the region of elastic deformations, generalized Hooke's law is used, while in the region of plastic deformations, the Mises-Hill plasticity function (Hill48) is used with account for the anisotropy of elastic properties and anisotropy of the Grüneisen coefficient. The experimentally and numerically obtained velocity profiles of the back surfaces of single-crystal zinc barriers during the spall fracture are compared with each other. When the impact loading direction coincides with [0001] axis, the elastic precursor is not observed on the velocity profile calculated numerically, which is the same for the one derived experimentally. This effect may be explained only with the use of anisotropic pressure.

**Keywords:** Grüneisen coefficient, anisotropy of properties, equation of state, single crystal, dynamic loading

**Acknowledgments:** The work is carried out within the framework of the State Assignment of the ISPMS SB RAS (project No. FWRW-2021-0011).

**For citation:** Krivosheina, M.N. (2022) Simulation of the stress state in barriers made of anisotropic materials. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 89–99. doi: 10.17223/19988621/79/8

### Введение

Исследование упругопластических и прочностных свойств анизотропных материалов сопряжено с преодолением ряда сложностей. В случае исследования свойств в субмикросекундном диапазоне важную роль играют зависимости величин всех регистрируемых скоростей распространения волн (упругих, пластических) от направления [1–3]. Сложной задачей является определение связи зарегистрированных в натуральных экспериментах профилей скоростей распространения волн как интегральных характеристик напряженного состояния материала преграды и механических характеристик анизотропных материалов. При распространении волн в области упругих деформаций связь скоростей распространения волн с упругими постоянными анизотропных материалов однозначна. В области

пластических деформаций нелинейность зависимости давления от степени сжатия, а также от направления приводит к необходимости создания новых математических моделей, позволяющих устанавливать связи механических характеристик анизотропных материалов. Создание новых математических моделей, пригодных для численного моделирования процессов деформирования материалов, характеризующихся анизотропией различных механических свойств, является актуальной задачей. Такие математические модели логично адаптировать для апробации в новых численных методиках. Для апробации таких математических моделей удобно рассматривать процессы деформирования и разрушения в монокристаллах, характеризующихся существенной анизотропией упругих, пластических и прочностных свойств, например в цинке, обладающем трансверсальной анизотропией упругих свойств и заметной анизотропией пластических и прочностных свойств, в частности откольной прочности.

В натуральных экспериментах, проводимых для исследования упругих, пластических и прочностных свойств монокристалла цинка, авторами серии работ [1–3] наблюдались эффекты, делающие невозможным определение динамического предела текучести независимо от скорости ударного нагружения преграды из монокристаллического цинка в направлении [0001]. В рамках математических моделей, в которых равномерной объемной деформации соответствует шаровая часть тензора напряжений (давление), эти эффекты невозможно объяснить. Но возможно объяснить при использовании математической модели, в которой объемной деформации соответствует давление, зависящее от направления. В области упругих деформаций сжатия в качестве свойства материала, характеризующего величину анизотропии возникающего напряжения, можно использовать величину, обратную линейной сжимаемости – модуль линейного сжатия. В области пластических деформаций напряжение, соответствующее объемной деформации, зависит не только от степени сжатия материала, но и от процессов, описываемых тепловой частью давления. Из-за анизотропии механических свойств монокристаллического цинка появляется необходимость учета анизотропии линейной сжимаемости и коэффициентов Грюнайзена в уравнениях состояния при определении напряжений в каждом из направлений трех расчетных осей координат. Часть давления, называемая холодной, определяется с использованием различных значений линейных характеристик сжимаемостей в зависимости от направления. По мере роста уровня напряжений возрастает роль тепловой части напряжения, определяемой с помощью коэффициентов Грюнайзена. Коэффициенты Грюнайзена также имеют некоторую анизотропию для ряда материалов. В частности, у монокристаллического цинка минимальные значения холодной и тепловой частей напряжения совпадают в направлении оси шестого порядка [4, 5].

С помощью коэффициентов Грюнайзена определяют тепловую часть давления, которое обусловлено тепловыми колебательными движениями атомов около узлов кристаллической решетки и пропорционально плотности энергии этих колебаний [6]. Особый интерес представляют функции Грюнайзена для анизотропных материалов, ауссетиков, а также материалов, имеющих в некоторых температурных диапазонах отрицательные значения модулей линейного либо всестороннего температурного расширения. С ростом температуры вклад тепловой части давления растет и может сравняться с холодной частью давления и даже превзойти ее [5]. Применение математической модели, позволяющей учитывать

анизотропию холодной и тепловой частей давления для определения напряженного состояния преград, будет полезным в случаях, когда максимальные и минимальные значения коэффициентов Грюнайзена и модулей линейного сжатия совпадают по направлениям. В работе методом конечных элементов в трехмерной постановке проведены исследования напряженного состояния преграды из монокристалла цинка в условиях ударного нагружения с учетом анизотропии упругих, пластических свойств и анизотропии коэффициента Грюнайзена. Цель работы – исследование влияния учета анизотропии в холодной и тепловой частях давления на скорость тыльной поверхности преграды при численном моделировании процесса ударного нагружения преграды из анизотропного материала.

### Анизотропия коэффициентов Грюнайзена

Величины коэффициента Грюнайзена вдоль и перпендикулярно оси шестого порядка для материалов, характеризующихся трансверсальной изотропией упругих свойств, определяются по формулам [4, 5]

$$\gamma_{\parallel} = \frac{V}{C_p} [C_{33}\alpha_{\parallel} + 2C_{13}\alpha_{\perp}], \quad (1)$$

$$\gamma_{\perp} = \frac{V}{C_p} [(C_{11} + C_{12})\alpha_{\perp} + C_{13}\alpha_{\parallel}], \quad (2)$$

где  $\gamma_{\parallel}$ ,  $\gamma_{\perp}$  – коэффициенты Грюнайзена,  $\alpha_{\parallel}$ ,  $\alpha_{\perp}$  – коэффициенты теплового расширения вдоль и перпендикулярно оси шестого порядка,  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $V$  – объем,  $C_{ij}$  – коэффициенты матрицы упругих постоянных [4].

Существует зависимость величин коэффициентов Грюнайзена от температуры. Для монокристаллического цинка при температуре ниже 120 К  $\gamma_{\perp} < \gamma_{\parallel}$  и  $\alpha_{\perp} < \alpha_{\parallel}$ , при температуре 120 К  $\gamma_{\perp} = \gamma_{\parallel}$ , а при температуре выше 120 К  $\gamma_{\perp} > \gamma_{\parallel}$ . При температуре Дебая для цинка (300 К) сохраняется значительная анизотропия значений коэффициентов теплового расширения:  $\alpha_{\perp} = 13.2 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ,  $\alpha_{\parallel} = 63.5 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ . Значения коэффициентов Грюнайзена для монокристалла цинка в этих направлениях составляют:  $\gamma_{\perp} = 2.15$ ,  $\gamma_{\parallel} = 1.9$  [5].

### Анизотропия линейной сжимаемости

При моделировании процесса упругих деформаций используется обобщенный закон Гука, записанный в полных напряжениях и деформациях. При моделировании упругопластических деформаций для определения границы перехода необходимо обеспечить разложение тензора полных напряжений на части, соответствующие изменению объема и изменению формы. Тензор полных напряжений в случае упругих деформаций раскладывается на части, соответствующие девиаторной и сферической частям тензора полных деформаций, т.е. на девиаторную часть и анизотропное давление [7]:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - P_{ij}, \quad (3)$$

где  $S_{ij}$  – компоненты девиаторов напряжений;  $P_{ij}$  – анизотропное давление.

В области упругих деформаций

$$S_{ij} = C_{ijkl} e_{kl}, \text{ где } i, j, k, l = 1, 2, 3. \quad (4)$$

$$P_{ij} = P_e \lambda_{ij}, \quad (5)$$

$$\lambda_{ij} = C_{ijkl} \delta_{kl} / 3K_\alpha, \quad (6)$$

$$K_\alpha = C_{ijkl} \delta_{ij} \delta_{kl} / 9, \quad (7)$$

$$P_e = \varepsilon_V C_{ijkl} \delta_{ij} \delta_{kl} / 3. \quad (8)$$

Здесь  $K_\alpha$  – модуль объемного сжатия;  $\delta_{kl}$  – символ Кронекера;  $e_{kl}$  – компоненты девиатора деформаций;  $C_{ijkl}$  – компоненты тензора упругих постоянных 4-го ранга,  $\varepsilon_V$  – объемные деформации. В области упругих деформаций  $\varepsilon_V = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})$ . Сумма обобщенных символов Кронекера  $\lambda_{ij}$  всегда равна трем, поэтому  $P_{11} + P_{22} + P_{33} = 3P_e$ .

Применение обобщенных символов Кронекера позволяет вычислять анизотропное давление, этот прием эквивалентен использованию в направлении каждой расчетной оси координат величину, обратную линейной сжимаемости [8, 9]. Моделирование упругих деформаций с использованием разложения тензора полных напряжений (3) эквивалентно вычислениям в полных напряжениях.

В области пластических деформаций используется разложение тензора полных напряжений в виде (3). Для определения изотропной величины давления всестороннего сжатия  $P_e$  используется уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена, в котором суммируются холодная и тепловая части:

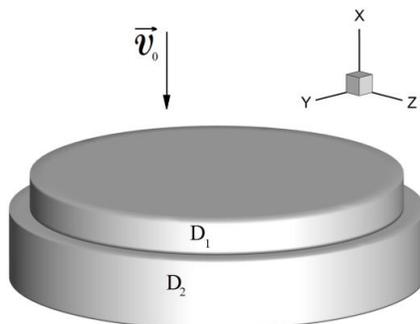
$$P_e = \sum_{n=1}^3 K_n \left( \frac{V}{V_0} - 1 \right)^n \left[ 1 - \frac{K_0 \left( \frac{V_0}{V} - 1 \right)}{2} \right] + K_0 \rho E. \quad (9)$$

Здесь  $K_1, K_2, K_3$  – характеристики материала,  $K_0$  – коэффициент Грюнайзена,  $E$  – энергия упругой деформации,  $\rho$  – плотность,  $\varepsilon_V = \left( \frac{V_0}{V} - 1 \right)$ , где  $V, V_0$  – текущий и начальный объемы.

Для обеспечения непрерывности функции давления при переходе от упругих деформаций к пластическим полагалось, что анизотропия холодной части давления в области пластических деформаций совпадает с анизотропией давления в области упругих деформаций; величина тепловой части давления при переходе от упругой деформации к пластической мала и ею можно пренебречь. Учет анизотропии тепловой части давления происходит за счет замены  $K_0$  на  $\gamma_{||}$  и  $\gamma_{\perp}$ .

### Постановка задачи ударного нагружения преграды из анизотропного материала

На рис. 1 представлена постановка задачи для численного моделирования ударного нагружения изотропным алюминиевым ударником  $D_1$  преграды из монокристалла цинка  $D_2$ , которая соответствует граничным условиям в натуральных экспериментах [3]. Дискретизация объемных конфигураций ударника ( $D_1$ ) и преграды ( $D_2$ ) выполнена с помощью тетраэдров, количество тетраэдров в ударнике 25 920, в преграде – 227 430.



**Рис. 1.** Начальная конфигурация ударника и преграды  
**Fig. 1.** Initial configuration of the impactor and barrier

При численном моделировании процесса ударного нагружения преграды используются компоненты матрицы упругих постоянных монокристалла цинка из [10]. Их значения:  $C_{11} = 61\,042$  МПа,  $C_{22} = C_{33} = 161\,018$  МПа,  $C_{12} = 49\,988$  МПа,  $C_{23} = 34\,129$  МПа,  $C_{66} = 38\,292$  МПа.

Для моделирования процессов деформации в анизотропных материалах используется система уравнений, описывающая нестационарные адиабатные движения сжимаемой анизотропной среды: уравнение неразрывности, уравнения движения сплошной среды и уравнение энергии [11].

Цинк характеризуется минимальными значениями коэффициента Грюнайзена и величины, обратной линейной сжимаемости в направлении оси шестого порядка, а в плоскости изотропии – максимальными. В области пластических деформаций значения тепловой части давления определяются отдельно с учетом анизотропии коэффициентов Грюнайзена. Величина анизотропного давления вдоль каждой расчетной оси состоит из суммы холодной и тепловой частей давления.

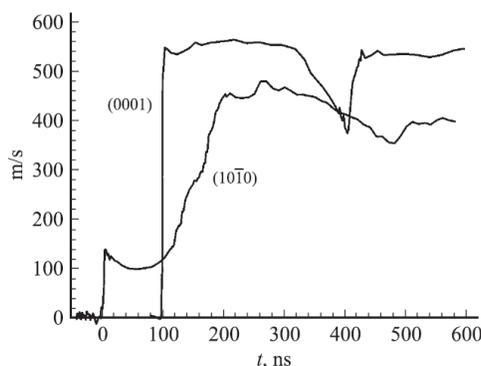
Анизотропия девиатора напряжений в области пластических деформаций моделируется с использованием функции пластичности Мизеса–Хилла 1948 г. После выполнения условия выхода на эллипсоид текучести компоненты девиатора полных напряжений вычисляются по теории пластического течения с изотропным упрочнением [11]. Моделируется процесс упругопластического деформирования и разрушения [12].

Упругопластическое деформирование изотропного материала ударника проводилось с использованием модели Прандтля–Рейсса [12]. Напряжения, определенные в конечных элементах ударника или преграды, жестко повернутых в пространстве, пересчитываются с помощью производной Яуманна [12, 13]. В расче-

тах, как и в натуральных экспериментах, начальная скорость алюминиевого ударника составляет 650 м/с, толщина ударника – 0.85 мм, толщина преграды из монокристалла цинка – 1.7 мм [1].

## Результаты

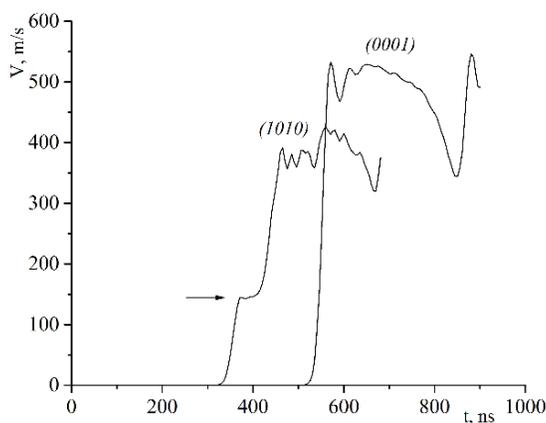
Использование изотропного давления, вычисленного с помощью величины модуля объемного сжатия, приводит к отсутствию анизотропии в величинах скоростей распространения пластических волн в анизотропных материалах в любых направлениях. Вычисление анизотропного давления на основе модулей линейного сжатия позволяет получить различные скорости распространения объемных волн в зависимости от направления благодаря замене в формуле для определения скорости распространения волны величины модуля объемного сжатия на величину, обратную линейной сжимаемости в направлении оси симметрии цинка. Использование анизотропного давления позволило вычислить близкие значения скоростей распространения продольной и объемной волн в направлении  $[0001]$  – 2 742 и 2 923 м/с. В натуральных экспериментах столь близкие значения не позволяют выявить отличия во времени выхода упругой и пластической волн сжатия на тыльную поверхность преграды [1–3]. На рис. 2 показаны полученные в натуральных экспериментах профили скоростей волн сжатия, вышедших на тыльные поверхности преграды, для случаев нагружения, совпадающих с направлениями  $[0001]$  или  $[10\bar{1}0]$  монокристалла цинка. Регистрация скоростей распространения волн начинается с момента их выхода на тыльную поверхность преграды. В направлении  $[0001]$  скорость распространения упругой продольной волны выше скорости распространения объемной волны сжатия на 181 м/с, и столь малое отличие не позволяет наблюдать выход упругого предвестника отдельно от пластической волны сжатия. В направлении  $[10\bar{1}0]$  скорость распространения упругой продольной волны превышает скорость распространения упругой объемной волны на 1 367 м/с. На кривой  $(10\bar{1}0)$  отчетливо виден выход упругого предвестника и более поздний выход пластической волны сжатия со скоростью объемной волны.



**Рис. 2.** Профили скоростей свободных поверхностей образцов монокристаллов цинка при нагружении в направлении  $[0001]$  и  $[10\bar{1}0]$  ударом алюминиевых пластин с начальной скоростью удара 650 м/с [2]

**Fig. 2.** Velocity profiles for free surfaces of single crystals of zinc samples under loading in the direction of  $[0001]$  and  $[10\bar{1}0]$  by an impact of aluminum plates with an initial impact velocity of 650 m/s [2]

На рис. 3 представлены аналогичные профили скоростей тыльных поверхностей преград, полученные численно в трехмерной постановке методом конечных элементов [14] с использованием предложенной математической модели. При ударном нагружении в направлении  $[0001]$  откольное разрушение преграды моделировалось как хрупкое по достижении предельных значений напряжений. Предельные значения напряжений вдоль оси шестого порядка (9 ГПа) и в плоскости изотропии (15 ГПа) подбирались численно из условия соответствия экспериментальному профилю скорости волны сжатия. При ударном нагружении в направлении  $[10\bar{1}0]$  откольное разрушение преграды моделировалось как вязкое на основе подхода [12, 15] по достижении пористости материала преграды предельного значения. Моделирование процесса вязкого разрушения отражает процесс накопления микропор в волнах растяжения, их слияния, объединения в единую магистральную трещину. Процесс накопления пористости в анизотропном материале преграды зависит от величин анизотропного давления, соответствующих различным направлениям осей координат [12]. Для монокристаллического цинка  $\lambda_{11} = 0.742$  (вдоль оси шестого порядка),  $\lambda_{22} = \lambda_{33} = 1.13$  (перпендикулярно оси шестого порядка), т.е. анизотропия холодной части давления в области упругих и начальных пластических деформаций, определяемая согласно уравнению (5), составляет 1.5. На рис. 3 отличия времен выходов волн сжатия на тыльную поверхность преград определяются различиями величин скоростей распространения упругих продольных волн в направлениях  $[0001]$  и  $[10\bar{1}0]$ . В случае ударного нагружения вдоль направления  $[10\bar{1}0]$  характерно наличие полочки упругого предвестника (показано стрелкой), которое наблюдается в натуральных экспериментах при исследовании свойств в абсолютном большинстве изотропных и анизотропных материалов из-за превышения скоростью распространения продольной волны скорости распространения пластической волны сжатия в рассматриваемом направлении.



**Рис. 3.** Вычисленные профили скоростей свободных поверхностей преград из монокристаллов цинка при ударном нагружении алюминиевой пластиной с начальной скоростью 650 м/с: в направлении  $[0001]$  и в направлении  $[10\bar{1}0]$

**Fig. 3.** Calculated velocity profiles for free surfaces of the barriers made of zinc single crystals under impact loading by an aluminum plate with an initial velocity of 650 m/s in the direction of  $[0001]$  and  $[10\bar{1}0]$

## Обсуждение

Получены результаты расчетов ударного нагружения преград из монокристаллического цинка с использованием математической модели, включающей в себя анизотропное давление, состоящее из двух частей с учетом анизотропии каждой части. Постановка задачи с ударным нагружением преграды из исследуемого материала с помощью сравнения результатов натуральных и численных экспериментов позволяет обрабатывать математические модели для моделирования высокоэнергетических воздействий на новые материалы, в том числе на ауксетики. Это особенно важно из-за повышения роли тепловой части давления по мере роста степени сжатия материала при высокоэнергетических нагрузках.

## Заключение

Учет анизотропии давления при моделировании упругопластических деформаций анизотропных материалов включает учет анизотропии холодной и тепловой частей давления отдельно. Анизотропия холодной части давления определяется заменой в уравнении состояния величины модуля объемного сжатия величиной, обратной линейной сжимаемости в направлении осей симметрии материала, тепловой части – использованием различных значений коэффициентов Грюнайзена в зависимости от направления.

## Список источников

1. Bogach A.A., Kanel' G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. Resistance of zinc crystals to shock deformation and fracture at elevated temperatures // *Phys. Solid State*. 1998. V. 40 (10). P. 1676–1680. doi: 10.1134/1.1130633
2. Безручко Г.С., Канель Г.И., Разоренов С.В. О пределе текучести монокристаллов цинка при одномерном сжатии в плоской ударной волне // *Журнал технической физики*. 2005. Т. 75, вып. 5. С. 92–95. doi: 10.1134/1.1927218
3. Безручко Г.С., Канель Г.И., Разоренов С.В. Сжимаемость монокристаллов цинка в области положительных и отрицательных давлений // *Теплофизика высоких температур*. 2004. Т. 42, № 2. С. 262–268. doi: 10.1023/B:НПТЕ.0000026158.05820.1B
4. Абдуллаев Н.А. Параметры Грюнайзена в слоистых кристаллах // *Физика твердого тела*. 2001. Т. 43, вып. 4. С. 697–700.
5. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М. : Наука, 1974. 292 с.
6. Беломестных В.Н., Теслева Е.П., Соболева Э.Г. Максимальный параметр Грюнайзена при полиморфных превращениях в кристаллах // *Журнал технической физики* 2009. Т. 79, вып. 2. С. 153–154. doi: 10.1134/S1063784209020273
7. Коларов Д., Балтов А., Бончева Н. Механика пластических сред. М. : Мир, 1974. 304 с.
8. Cairns A.B., Goodwin A.L. Negative linear compressibility // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2015. V. 17 (32). P. 20449–21020. doi: 10.1039/c5cp00442j
9. Vignjevic R., Djordjevic N., Panov V. Modelling of Dynamic Behaviour of Orthotropic Metals Including Damage and Failure // *Int. J. Plasticity*. 2012. V. 38. P. 47–85. doi: 10.1016/j.ijplas.2012.04.006
10. Mason W.P. *Physical Acoustics: Principles and methods*. New York–London : Academic Press, , 1965. V. III, pt. B: Lattice Dynamics. xix, 336 p.
11. Седов Л.И. Механика сплошных сред. М. : Наука, 1976. Т. 2. 574 с.

12. Krivosheina M.N., Tuch E.V., Kobenko S.V. Simulation of the Crack Distribution at the “Viscous” of the Destruction of the HCP-Single Crystals in the Plane (10 $\bar{1}0$ ) // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2051. Art. 020153. doi: 10.1063/1.5083396
13. Wilkins M.L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Springer Verlag, 1999. 247 p.
14. Anderson Ch.E., Cox P.A., Johnson G.R., Maudlin P.J. A Constitutive Formulation for Anisotropic Materials Suitable for Wave Propagation Computer program-II // Computational Mechanics. 1994. V. 15. P. 201–223. doi: 10.1007/BF00375030
15. Johnson J.N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids // J. Appl. Phys. 1981. V. 52 (4). P. 2812–2825.

### References

1. Bogach A.A., Kanel' G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. (1998) Resistance of zinc crystals to shock deformation and fracture at elevated temperatures. *Physics of the Solid State*. 40(10). pp. 1676–1680. doi: 10.1134/1.1130633
2. Bezruchko G.S., Kanel' G.I., Razorenov S.V. (2005) O predele tekuchesti monokristallov tsinka pri odnomernom szhatii v ploskoy udarnoy volne [On the yield strength of single-crystal zinc under uniaxial compression in a plane shock wave]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics*. 50(5). pp. 621–624. doi: 10.1134/1.1927218
3. Bezruchko G.S., Kanel' G.I., Razorenov S.V. (2004) Szhimaemost' monokristallov tsinka v oblasti polozhitel'nykh i otritsatel'nykh davleniy [The compressibility of single crystals of zinc in the region of positive and negative pressures]. *Teplofizika vysokikh temperatur – High Temperature*. 42(2). pp. 259–266. doi: 10.1023/B:HITE.0000026158.05820.1B
4. Abdullaev N.A. (2001) Parametry Gryunayzena v sloistyykh kristallakh [Grüneisen parameters for layered crystals]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*. 43(4). pp. 727–731. doi: 10.1134/1.1366002
5. Novikova S.I. (1974) *Teplovoe rasshirenie tverdykh tel* [Thermal expansion of solids]. Moscow: Nauka.
6. Belomestnykh V.N., Tesleva E.P., Soboleva E.G. (2009) Maksimal'nyy parametr Gryunayzena pri polimorfnykh prevrashcheniyakh v kristallakh [Maximal Grüneisen parameter at polymorphic transformations in crystals]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics*. 54(2). pp. 320–322. doi: 10.1134/S1063784209020273
7. Kolarov D., Baltov A., Boncheva N. (1979) *Mekhanika plasticheskikh sred* [Plastic medium mechanics]. Moscow: Mir.
8. Cairns A.B., Goodwin A.L. (2015) Negative linear compressibility. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 17(32). pp. 20449–21020. doi: 10.1039/c5cp00442j
9. Vignjevic R., Djordjevic N., Panov V. (2012) Modelling of dynamic behaviour of orthotropic metals including damage and failure. *International Journal of Plasticity*. 38. pp. 47–85. doi: 10.1016/j.ijplas.2012.04.006
10. Mason W.P. (1965) *Physical Acoustics: Principles and Methods. Lattice Dynamics*. New York–London: Academic Press.
11. Sedov L.I. (1976) *Mekhanika sploshnykh sred* [Continuum mechanics]. Singapore: World Scientific. doi: 10.1142/0712-vol1
12. Krivosheina M.N., Tuch E.V., Kobenko S.V. (2018) Simulation of the crack distribution at the “viscous” of the destruction of the HCP-single crystals in the plane (10 $\bar{1}0$ ). *AIP Conference Proceedings*. 2051. Article 020153. doi: 10.1063/1.5083396
13. Wilkins M.L. (1999) *Computer Simulation of Dynamic Phenomena*. Springer–Verlag.
14. Anderson Ch.E., Cox P.A., Johnson G.R., Maudlin P.J. (1994) A constitutive formulation for anisotropic materials suitable for wave propagation computer program-II. *Computational Mechanics*. 15. doi: 10.1007/BF00375030
15. Johnson J.N. (1981) Dynamic fracture and spallation in ductile solids. *Journal of Applied Physics*. 52(4). doi: 10.1063/1.329011

***Сведения об авторе:***

**Кривошеина Марина Николаевна** – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, профессор кафедры физической и вычислительной механики механико-математического факультета Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: marina@ispms.ru

***Information about the author:***

**Krivosheina Marina N.** (Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: marina\_nkr@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 31.05.2022; принята к публикации 03.10.2022*

*The article was submitted 31.05.2022; accepted for publication 03.10.2022*