

Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19. № 1. С. 17–24
Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2022; 1(19): 17–24

Научная статья
1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)
УДК 538.913; 539.8
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.002

УПРУГИЕ ВОЛНЫ И ИХ СТОЛКНОВЕНИЯ С N-КРАУДИНАМИ В 3D КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ГЦК КРИСТАЛЛА Ni

Николай Николаевич Медведев^{1†}, Михаил Дмитриевич Старостенков²,
Павел Васильевич Захаров³, Маргарита Олеговна Сысоева⁴

^{1,4} Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. Ползунова», ул. Трофимова, 27, 659305, Бийск, Россия

² Алтайский государственный технический университет им. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, 195251, Санкт-Петербург, Россия

³ Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, ул. Владимира Короленко, 53, 659333, Бийск, Россия

¹ nnm42@rambler.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-6040-6323>

² genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>

³ zakharovpv1@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6410-1594>

⁴ sysoeva.mo@bti.secna.ru

Аннотация. В данной работе посредством метода молекулярной динамики с использованием потенциала Морзе, рассматриваются условия возбуждения продольных упругих волн в различных направлениях и результаты их столкновений с N-краудионами в 3D компьютерной модели ГЦК решётки кристалла Ni. Известно, что любые возмущения в кристаллической решетке безграничного кристалла возбуждают лишь продольные волны. В тех случаях, когда модельная ячейка представляет собой вытянутый прямоугольный параллелепипед, продольная волна, распространяющаяся вдоль направления плотной упаковки атомов под углом к наиболее протяжённой стороне ячейки, испытывает многократные отражения от стенок, в результате чего у этой волны появляется поперечная составляющая относительно наиболее протяжённой грани модельной ячейки. Моделировалось встречное столкновение этой волны и обладающего сверхзвуковой скоростью N-краудиона, включающего в себя два или три междоузельных атома. Скорости N-краудионов варьировались в диапазоне от $1,3 \cdot 10^4$ до $1,8 \cdot 10^4$ м/с. Во всех случаях после столкновения N-краудиона с волной, имеющей поперечную составляющую, происходила перестройка N-краудиона в краудионный комплекс, ориентированный вдоль направления движения продольной волны, испытывающей многократные отражения от стенок модельной ячейки.

Ключевые слова: метод молекулярной динамики, упругие волны, краудион, краудионный комплекс, кристаллическая решётка.

Для цитирования: Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Захаров П.В., Сысоева М.О. Упругие волны и их столкновения с n-краудионами в 3D компьютерной модели ГЦК кристалла Ni // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 1. С. 17–24. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.002.

Original article

ELASTIC WAVES AND THEIR COLLISIONS WITH N-CROWDIONS IN 3D COMPUTER MODEL OF HCC Ni CRYSTAL

Nikolay N. Medvedev^{1†}, Mikhail D. Starostenkov², Pavel V. Zakharov³,
Margarita O. Sysoeva⁴^{1,4} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Trofimov Str., 27, Biysk, 659305, Russia² I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya Str., 29, St. Petersburg, 195251, Russia³ Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, Vladimira Korolenko Str., 53, Biysk, 659333, Russia¹ nnm42@rambler.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-6040-6323>² genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>³ zakharovpvl@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6410-1594>⁴ sysoeva.mo@bti.secna.ru

Abstract. In this paper the conditions of excitation of longitudinal elastic waves in different directions and the results of their collisions with N-crowdions in a three-dimensional computer model of the HCC lattice of Ni crystal are considered by molecular dynamics using the Morse potential. It is known that any perturbations in the crystal lattice of a boundless crystal excite only longitudinal waves. When the model cell is an elongated rectangular parallelepiped, the longitudinal wave propagating along the direction of the dense packing of atoms at an angle to the most elongated side of the cell experiences multiple reflections from the walls resulting in a transverse component of this wave relative to the longest face of the model cell. A counter collision of this wave with N-crowdion having supersonic velocity and consisting of two or three interstitial atoms was modeled. The velocities of N-crowdions ranged from $1.3 \cdot 10^4$ to $1.8 \cdot 10^4$ m/s. In all cases, after N-crowdion collision with a wave having a transverse component, N-crowdion was rearranged into a crowding complex oriented along the direction of the longitudinal wave, which experienced multiple reflections from the walls of the model cell.

Keywords: molecular dynamics method, elastic waves, crowdion, crowdion complex, crystal lattice.

For citation: Medvedev, N. N., Starostenkov, M. D., Zakharov, P.V. & Sysoeva, M. O. (2022). Elastic waves and their collisions with N-crowdions in 3D computer model of HCC Ni crystal. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(19), 17–24. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.002.

Введение

Настоящая работа посвящена исследованию условий возникновения упругих волн, распространяющихся в различных направлениях, и их взаимодействия с N-краудионами в 3D кристаллической ГЦК решётке никеля.

Междоузельный атом, находящийся в плотноупакованном ряду кристалла вызывает локальное сгущение атомов, которое называется краудионом. Этот дефект кристаллической решётки обладает высокой подвижностью, скорость его перемещения вдоль плотноупакованного ряда может значительно превышать скорость звука, в связи с чем он играет заметную роль в переносе массы и энергии в неравновесных процессах, к которым относятся, например, термообработка [1], пластическая деформация [2], радиационное воздействие [3-8], и др. В работах [9, 10] предложена концепция N-краудиона, в [11-15] это идея получила разви-

тие. От обычного краудиона [16-18] N-краудион отличается тем, что образуется не одним, а несколькими междоузельными атомами, находящимися в одном плотноупакованном ряду, и он также может обладать высокой скоростью. Очевидно, что такая «кооперация» междоузельных атомов добавляет им инертности, и как следствие, увеличивает дальность переноса энергии и массы внутри кристалла. Поэтому перемещение N-краудионов может выступать как один из механизмов, вызывающих эффект дальнего действия, и эффект «малых доз» [19], например, в ионно-имплантированных металлических материалах [20, 21].

В настоящее время существует большое количество работ, посвященных явлениям, тесно связанным с упругими волнами в твердых телах. Так авторы ряда работ считают, что направленный дрейф дефектов кристаллической решетки при внешних воздействиях вызывают

упругие волны, возникающие при рекомбинации неустойчивых пар Френкеля [22, 23].

Поле упругих деформаций, возникающее при прохождении по кристаллу акустических волн, очевидно, оказывает влияние на диффузию атомов. Это обусловлено возникновением дрейфовой составляющей потока атомов под действием градиента механических напряжений [24, 25].

Волны могут возбуждаться по разным причинам. При радиационном воздействии источником акустических волн могут являться термические пики [26, 27]. С механизмом термического пика связано также возбуждение волн при лазерном воздействии на кристалл [28]. Локально разогретая область пика оказывает давление на окружающие атомные плоскости. Упругие волны могут также возникать в процессе образования, перестройки и рекомбинации дефектов решетки [29-32].

Исследования, результаты которых изложены в указанных публикациях, проводились либо экспериментально, либо теоретически по-

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^z \eta_i U_{V=V_0} = E_S, \quad \frac{1}{2} \sum_{i=1}^z \eta_i \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{V=V_0} = 0, \quad K_0 = -V_0 \cdot \left(\frac{\partial P_S}{\partial V} \right),$$

где η_i – число атомов в i – координационной сфере, z – число учитываемых сфер, E_S – энергия сублимации атомов кристалла при нуле Кельвин, K_0 – объемный модуль упругости, P_S – давление изоэнтропического сжатия, V_0 и V – удельные объемы в начальном и деформированном состояниях.

Взаимодействие N-краудионов с упругими продольными и поперечными волнами изучался в ячейках, представляющих собой прямоугольный параллелепипед, размером $50 \times 12 \times 6$ атомов.

В начальный момент времени скорость атомов ячейки задавалась равной нулю. На торцевые границы исследуемых ячеек накладывались периодические, на границы вдоль оси X «жесткие» условия (см. рис.1а). В ячейках создавалась начальная конфигурация точечных дефектов.

Параметры потенциала Морзе были следующими, $D=0,4705$ эВ, $\alpha=1,366 \text{ \AA}^{-1}$, $\beta=41,0494$, $a=3,52 \text{ \AA}$. Визуализировалась одна из плоскостей (111) кристалла с ГЦК решёткой.

Существует несколько способов получения упругих волн в модельной ячейке, которые в той или иной мере соответствуют процессам,

средством математических моделей. В [33] с помощью компьютерного моделирования показано влияние упругих продольных и поперечных волн на дрейф точечных дефектов.

Упругие волны и N-краудионы, очевидно, играют важную роль в транспорте массы и энергии в кристалле. Изучение взаимодействия их друг с другом представляет несомненный интерес.

Методы

Компьютерные эксперименты проводились методом молекулярной динамики в трехмерных моделях ГЦК кристаллических решеток никеля. Параметры потенциалов Морзе, $U(r) = D\beta \exp(-\alpha r)[\beta \exp(-\alpha r) - 2]$, посредством которого атомы модельной решетки взаимодействовали между собой, рассчитывались с учетом 7 координационных сфер, с помощью системы уравнений:

протекающим в реальных кристаллах. Например, внешнее механическое воздействие моделируется путём придания некоторой начальной скорости граничным атомам расчетного блока или путём их смещения вдоль выбранного направления. Ионная имплантация моделируется размещением междоузельных атомов в кристаллическую решётку. При этом они вызывают некое подобие термических пиков. Если их расположить достаточно близко друг от друга вдоль относительно прямой линии или плоскости, они могут породить и ударную волну. В этом случае для получения упругих волн энергию атомов уменьшают путем обнуления скоростей в течение некоторого количества шагов интегрирования.

Результаты и обсуждения

Любое возмущение в какой-либо точке кристалла вызывает возбуждение продольной волны, чей фронт, как правило, имеет некое подобие сферы. Следует подчеркнуть, что в «бесконечном» во все стороны кристалле возможно распространение только продольной волны.

Если продольны волны распространяются в ограниченном пространстве, то возможно по-

явление поперечной составляющей смещения атомов, до которых дошло возмущение. Наиболее чётко это просматривается в случае, когда кристалл имеет форму вытянутого прямоугольного параллелепипеда и представляет собой некий аналог волновода, в котором волны распространяются вдоль наиболее протяжённой стороны.

На рис. 1а атомам, расположенным на левой грани расчётной ячейки, которая имеет форму прямоугольного параллелепипеда, сообщили смещение вдоль ряда плотной упаковки, ориентированного под углом 60° к горизонтальной поверхности модельной ячейки. На рисунке они обозначены цифрой 1. Отрезками показаны начальные смещения атомов и их смещения при распространении волн. Масштаб отрезков смещения по сравнению с реальными смещениями 10:1 на первых двух рисунках, на третьем рисунке масштаб 1:1.

На первом рисунке показаны волны, возникающие в результате возвращения на место смещённых атомов, задающих начальные условия. Они распространяются не только вдоль рядов плотной упаковки под углом 60° к горизонтальным граням, но и вдоль горизонтальных граней ячейки.

Таким образом, одна продольная волна распространяется вдоль горизонтальных плотноупакованных рядов атомов (рис. 1а), другая распространяется вдоль плотно упакованных рядов, ориентированных под углом 60° к ним, назовём её отражаемой, поскольку она многократно отражается от верхней и нижней грани модельной ячейки. В итоге обе волны распространяются вдоль горизонтального направления с разными скоростями. Для волны, испытывающей многократные отражения, смещения атомов, до которых дошло возмущение, имеют вертикальную составляющую, относительно оси X (рис. 1а).

На рис. 1а волны, продольная 5 и отражаемая 4 на рис. 1 возникают в начальный момент, когда смещённые атомы отталкиваются от своих ближайших соседей. Продольная 3 и отражаемая 2 возбуждаются, когда смещённые атомы, разогнавшись, наталкиваются на стоящих впереди соседние атомы. В обоих случаях продольная волна движется впереди поперечной.

На рис. 1б показано встречное движение отражаемой волны и обладающего сверхзвуковой скоростью N-краудиона, включающего в себя два междоузельных атома.

Модельные эксперименты проводились с N-краудионами, включающими в себя от двух до трёх междоузельных атомов. Скорости этих

атомов варьировались в диапазоне от $1,3 \cdot 10^4$ до $1,8 \cdot 10^4$ м/с. Во всех случаях после столкновения N-краудиона с отражаемой волной, происходила перестройка N-краудиона в краудионный комплекс (рис. 1в,г). Причем последний принял ориентацию вдоль направления плотной упаковки вдоль которой распространялась отражаемая волна. Столкновение N-краудиона с продольными волнами происходит без видимых последствий.

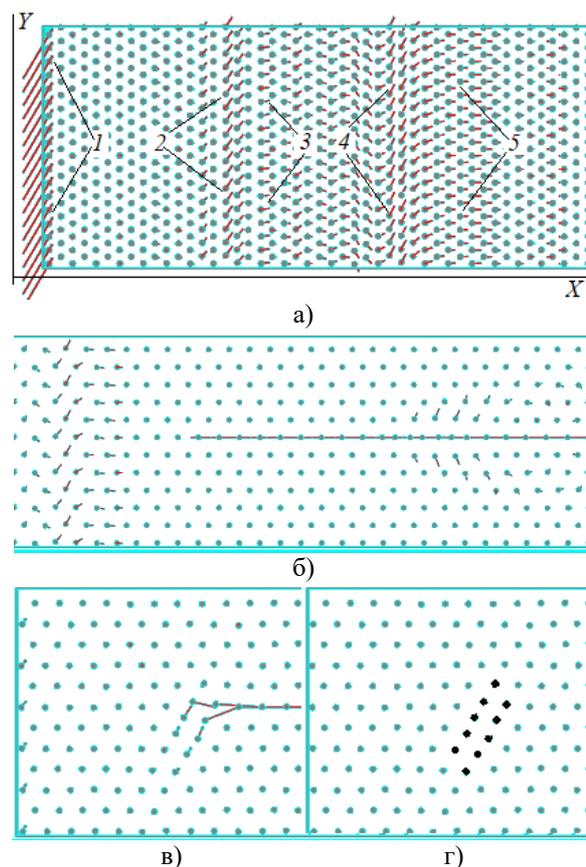


Рис.1. Сечение трехмерного модельного кристалла Ni плоскостью (111). а) Цифрой 1 отмечены начальные смещения атомов. 3 и 5 – продольные волны, 2 и 4 – поперечные волны, смещения атомов показаны в масштабе 10:1. б) Встречное движение поперечной волны и N-краудиона. Смещения атомов в масштабе 10:1. в) Процесс перестроения N-краудиона в краудионный комплекс, масштаб 1:1. г) Конечная конфигурация образовавшегося краудионного комплекса

Fig.1. Cross-section of a three-dimensional Ni model crystal by plane (111). (a) The number 1 marks the initial displacements of the atoms. 3 and 5 are longitudinal waves, 2 and 4 are transverse waves, displacements of the atoms are on a scale 10:1. (b) Counter-motion of the transverse wave and the N-crowdion. Displacements of atoms on scale 10:1. (c) Process of rearrangement of N-crowdion into crowdions complex, scale 1:1. (d) Final configuration of the formed crowdions complex

Заключение

В данной работе методом молекулярной динамики исследовались условия возбуждения упругих волн и их взаимодействие с N-краудионами в модельной ГЦК решетке Ni.

В процессе анализа результатов модельных экспериментов было установлено, что любые возмущения в бесконечной кристаллической решетке возбуждают лишь продольные волны. Возбуждение упругих волн, имеющих поперечную составляющую, возможно при определенных начальных и граничных условиях. В тех случаях, когда модельная ячейка представляет собой вытянутый прямоугольный параллелепипед, продольная волна, распространяющаяся вдоль направления плотной упаковки атомов под углом к наиболее протяженной грани ячейки, испытывает многократные отражения от горизонтальных граней ячейки. Столкновение N-краудиона, (распространяющегося вдоль горизонтального плотноупакованного ряда атомов) с такой волной приводит к перестройке N-краудиона в краудионный комплекс, ориентированный вдоль направления распространения продольной волны, испытывающей многократные отражения.

Список литературы

- Mehrer H., *Diffusion in Solids*. Springer-Verlag, Berlin. 2007. 645 p.
- Indenbom V.L. Interstitial (crowdion) mechanism of plastic deformation and failure // *JETP Lett.* 1970. V. 12. P. 369–371.
- Pokropivny V.V., Skorokhod V.V., Pokropivny A.V. Adhesive phenomena at the alpha-Fe inter-face during nanoindentation, stretch and shock // *Model. Simul. Mater. Sc.* 1997. 5. P. 579.
- Natsik V.D., Smirnov S.N. Dislocations and crowdions in two-dimensional crystals. Part III: Plastic deformation of the crystal as a result of defect movement and defect interaction with the field of elastic stresses // *Low Temperature Physics*. 2016. V. 42. P. 207.
- Kiritani M. Similarity and difference between fcc, bcc and hcp metals from the view point of point defect cluster formation // *J. Nucl. Mater.* 2000. V. 276. P. 41.
- Salehinia I., Bahr D.F. The impact of a variety of point defects on the inception of plastic deformation in dislocation free metals // *Scripta Mater.* 2012. V. 66. P. 339.
- Kononenko V.G., Bogdanov V.V., Turenko A.N., Volosyuk M.A., Volosyuk A.V. The role of crowdion mass transfer in relaxation processes near hard concentrators // *Probl. At. Sci. Tech.* 2016. V. 104. P. 15.
- Korbel A., Bochniak W. Stratified plastic flow in metals // *Int. J. Mech. Sci.* 2017. V. 128. P. 269.
- Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В., Многочастичные краудионные столкновения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2016. Т. 13, № 3. С. 321–325.
- Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Chetverikov A.P., Zhou K., Velarde M.G. Highly Enhanced Transport by Supersonic N-Crowdions // *Phys. Status Solidi*. 2017. V. 11. P. 1700298.
- Korzniikova E., Sunagatova I., Bayazitov A., Semenov A., Dmitirev S. Effect of interatomic potentials on mass transfer by supersonic 2-crowdions // *Letters on Materials*. 2019. V. 9. P. 386–390.
- Bayazitov A.M., Dmitriev S.V., Zakharov P.V., Shepelev I.A., Fomin S.Y., Korzniikova E.A. Features of mass transfer by N-crowdions in fcc Ni₃Al lattice // *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.* 2019. P. 012033.
- Korzniikova E.A., Shepelev I.A., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V., Fomin S.Y., Zhou K. Dynamics and Stability of Subsonic Crowdion Clusters in 2D Morse Crystal // *J. Exp. Theor. Phys.* 2018. V. 127. P. 1009–1015.
- Shepelev I.A., Korzniikova E.A., Bachurin D.V., Semenov A.S., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V. Supersonic crowdion clusters in 2D Morse lattice // *Phys. Lett. A*. 2020. V. 384. P. 126032.
- Сунгатова И.П., Семёнов А.С., Баязитов А.М., Корзникова Е.А. Динамика сверхзвуковых 2-краудионов в нелинейных двумерных решетках // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, № 4. С. 482–488.
- Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Potekatev A.I., Kalugina V.V., Medvedev N.N., Neverova T.I., Barchuk A.A. The Behavior of Crowdions and Their Complexes in Weakly States of Materials // *Russian Physics Journal*. 2012. V. 54(11). P. 1241–1248.
- Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Захаров П.В. Фокусирующиеся и краудионные столкновения атомов в трёхмерной модели упорядоченного сплава CuAu со сверхструктурой L₁₁ // *Перспективные Материалы*. 2011. № 12. С. 321–326.

18. Iskandarov A.M., Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Zakharov P.V. Crowdion Mobility and Self Focusing in 3D and 2D Nickel // *Computational Materials Science*. 2009. V. 47(2). P 429–431.

19. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. М.: Энергоатомиздат, 2001. 286 с.

20. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. НТЛ, Томск, 2004. 326 с.

21. Psakh'e S.G., Zol'nikov K.P., Kadyrov R.I., Rudenski G.E., Sharkeev Yu.P. The Possibility of forming Soliton-Like Pulses During Implantation // *Technical Physics Letters*, 1999. V. 25 (3). P. 209–211.

22. Мирзаде Ф, Шелепин Л.А. Уединенные концентрационные волны точечных дефектов при импульсном лазерном воздействии // *Письма в ЖТФ*. 1999. Т. 25,(16). С. 90–95.

23. Алалыкин А.С., Крылов П.Н, Федотова И.В., Федотов А.Б. Влияние обработки ионами Ag низких энергий на характеристики рабочей и тыльной сторон подложки монокристаллического GaAs // *ФТП*. 2003. Т. 37.(4). С. 465–468.

24. Еремеев В.С. Диффузия и напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 184 с.

25. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. М.: Наука, 1972. 280 с.

26. Павлов П.В., Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И. О роли механических напряжений и упругих волн в структурных превращениях в кристалле при ионной бомбардировке и последующем отжиге // *Физика и химия обработки материалов*. 1987. Т. 6. С. 19–24.

27. Лямшев Л.М. Радиационная акустика // *УФН*. 1992. Т. 162(4). С. 43–94.

28. Бекренев А.Н., Камашев А.В., Путилин В.А. Массоперенос в металлах при короткоимпульсном лазерном воздействии // *Письма в ЖТФ*. 1993. Т. 19(13). С. 14–15.

29. Инденбом В.Л. Новая гипотеза о механизме радиационно-стимулированных процессов // *Письма в ЖТФ*. 1979. Т. 5(8). С. 489–492.

30. Хабибулаев П.К., Оксепдлер Б.А., Пахаруков Ю.Ф. Механизм радиационной тряски в структурно-неупорядоченных веществах // *ФТТ*. 1986. Т. 28. С. 3132–3133.

31. Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И. Влияние упругих волн, возникающих при ионной бомбардировке, на струк-

турное совершенство полупроводниковых кристаллов // *ФТП*. 1986. Т. 20(3). С. 503–507.

32. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Захаров П.В. Волны, возникающие при рекомбинации пар Френкеля в двумерных модельных решетках металлов и их влияние на дрейф агрегатов точечных дефектов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2009. Т. 6, №2. С. 8–13.

Информация об авторах

Н. Н. Медведев – доктор физико-математических наук, профессор Бийского технологического института.

М. Д. Старостенков – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

П. В. Захаров – доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, профессор, Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

М. О. Сысоева – кандидат физико-математических наук, доцент Бийского технологического института.

References

1. Mehrer, H. (2007). *Diffusion in Solids*. Springer-Verlag, Berlin. P. 645.

2. Indenbom, V. L. (1970). Interstitial (crowdion) mechanism of plastic deformation and failure. *JETP Lett.*, (12), 369–371.

3. Pokropivny, V. V., Skorokhod, V. V. & Pokropivny, A. V. (1997). Adhesive phenomena at the alpha-Fe inter-face during nanoindentation, stretch and shock. *Model. Simul. Mater. Sc.*, 5, P. 579.

4. Natsik, V. D. & Smirnov, S. N. (2016). Dislocations and crowdions in two-dimensional crystals. Part III: Plastic deformation of the crystal as a result of defect movement and defect interaction with the field of elastic stresses. *Low Temperature Physics*, (42), 207.

5. Kiritani, M. (2000). Similarity and difference between fcc, bcc and hcp metals from the view point of point defect cluster formation. *J. Nucl. Mater.*, (276), P. 41.

6. Salehinia, I. & Bahr, D. F. (2012). The impact of a variety of point defects on the inception

of plastic deformation in dislocation free metals. *Scripta Mater.*, 66, 339.

7. Kononenko, V. G., Bogdanov, V. V., Turenko, A. N., Volosyuk, M. A. & Volosyuk A. V. (2016). The role of crowdion mass transfer in relaxation processes near hard concentrators. *Probl. At. Sci. Tech.*, (104), 15.

8. Korbelt, A. & Bochniak, W. (2017). Stratified plastic flow in metals. *Int. J. Mech. Sci.*, (128), 269.

9. Medvedev, N. N., Starostenkov, M. D., Korznikova, E. A. & Dmitriev, S. V. (2016). Multi-particle crowdion collisions. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(13), 321–325. (In Russ.).

10. Dmitriev, S. V., Medvedev, N. N., Chetverikov, A. P., Zhou, K. & Velarde, M. G. (2017). Highly Enhanced Transport by Supersonic N-Crowdions. *Phys. Status Solidi*, (11), 1700298.

11. Korznikova E., Sunagatova I., Bayazitov A., Semenov A. & Dmitirev S. (2019). Effect of interatomic potentials on mass transfer by supersonic 2-crowdions. *Letters on Materials*, (9), 386–390.

12. Bayazitov, A. M., Dmitriev, S. V., Zakharov, P. V., Shepelev, I. A., Fomin, S. Y. & Korznikova, E. A. (2019). Features of mass transfer by N-crowdions in fcc Ni₃Al lattice. *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.*, 012033.

13. Korznikova, E. A., Shepelev, I. A., Chetverikov, A. P., Dmitriev, S. V., Fomin, S. Y. & Zhou, K. (2018). Dynamics and Stability of Subsonic Crowdion Clusters in 2D Morse Crystal. *J. Exp. Theor. Phys.*, (127), 1009–1015.

14. Shepelev, I. A., Korznikova, E. A., Bachurin, D. V., Semenov, A. S., Chetverikov, A. P. & Dmitriev, S. V. (2020). Supersonic crowdion clusters in 2D Morse lattice. *Phys. Lett. A.*, (384), 126032.

15. Sungatova, I. R., Semenov, A. S., Bajazitov, A. V. & Korznikova, E. A. (2019). Dynamics of Supersonic 2-Crowdions in Nonlinear Two-Dimensional Lattices. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 16, 482–488. (In Russ.).

16. Markidonov, A. V., Starostenkov, M. D., Potekatev, A. I., Kalugina, V. V., Medvedev, N. N., Neverova, T. I. & Barchuk, A. A. (2012). The Behavior of Crowdions and Their Complexes in Weakly States of Materials. *Russian Physics Journal*, 54(11), 1241–1248.

17. Medvedev, N. N., Starostenkov, M. D., Markidonov, A. V. & Zakharov, P. V. (2011). Self-focusing and crowding collisions of atoms in a three-dimensional model of an ordered CuAu alloy with superstructure L₁₁. *Pespektivnye Materialy (Promising materials)*, 12, 321–326. (In Russ.).

18. Iskandarov, A. M., Dmitriev, S. V., Medvedev, N. N. & Zakharov, P. V. (2009). Crowdion Mobility and Self Focusing in 3D and 2D Nickel. *Computational Materials Science*, 47(2), 429–431.

19. Mamontov, A. P. & Chernov, I. P. (2001). Effect malykh doz ioniziruyshchego izlucheniya. *Energoatomizdat, Moscow*. P. 286. (In Russ.).

20. Didenko, A. N., Sharkeev, Y. P., Kozlov, E. V. & Ryabchikov, A. I. (2004). Long-range effects in ion-implanted metallic materials. *NTL, Tomsk*. P. 326. (In Russ.).

21. Psakh'e, S. G., Zol'nikov, K. P., Kadyrov, R. I., Rudenski, G. E. & Sharkeev, Yu. P. (1999). The Possibility of forming Soliton-Like Pulses During Implantation. *Technical Physics Letters*, 25(3), 209–211.

22. Mirzadeh, F. & Shelepin, L. A. (1999). Solitary concentration waves of point defects in pulsed laser exposure. *Pisma v GTF (Technical Physics letters)*, 25(16), 90–95. (In Russ.).

23. Alalalykin, A. C., Krylov, P. N., Fedotova, I. V. & Fedotov, A. B. (2003). Effect of low-energy Ar ion treatment on the working and backside characteristics of GaAs single-crystal substrates. *Physics and Technics of Semiconductors*, 37(4), 465–468. (In Russ.).

24. Eremeev, V. C. (1984). Diffusion and stresses. *Energoatomizdat, Moscow*. P. 184. (In Russ.).

25. Kosevich, A. M. (1972). Fundamentals of lattice mechanics. *Nauka, Moscow*. P. 280. (In Russ.).

26. Pavlov, P. V., Skupov, V. D. & Tetelbaum, D. I. (1987). On the role of mechanical stresses and elastic waves in structural transformations in a crystal during ion bombardment and subsequent annealing. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, (6), 19–24.

27. Lyamshev, L. M. (1992). Radiation acoustics. *Sov. Phys. Usp.*, 35(4), 276–302.

28. Bekrenev, A. N., Kamashev, A. V. & Putilin, A. V. (1993). Mass transfer in metals during short-pulse laser exposure. *Pisma v GTF (Technical Physics letters)*, 19(13), 14–15. (In Russ.).

29. Indenbom, V. L. (1979). A new hypothesis on the mechanism of radiation-stimulated proc-

esses. *Pisma v GTF (Technical Physics letters)*, 5(8), 489–492. (In Russ.).

30. Khabibulaev, P. K., Okcepdler, B. A. & Pakharukov, Y. F. (1986). Mechanism of radiation shaking in structurally disordered substances. *Phisika Tverdogo tela (Physics of the Solid State)*, 28, 3132–3133. (In Russ.).

31. Pavlov, P. V., Semin, J. A., Skupov, V. D. & Tetelbaum, D. I. (1986). Influence of Elastic Waves Generated by Ion Bombardment on the Structural Perfection of Semiconductor Crystals. *Physics and Technics of Semiconductors*, 20(3), 503–507. (In Russ.).

32. Medvedev, N. N., Starostenkov, M. D., Markidonov, A. V. & Zakharov, P. V. (2009). Waves arising from the recombination of Frenkel pairs in two-dimensional model metal lattices and their influence on the drift of point defect aggregates. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(6), 8–13.

Information about the authors

N. N. Medvedev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University.

M. D. Starostenkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

P. V. Zakharov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Professor of the Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy.

M. O. Sysoeva – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена после рецензирования 27.01.2022; принята к публикации 08.02.2022.

The article was received by the editorial board on 17 Jan. 22; approved after reviewing 27 Jan. 22; accepted for publication 08 Feb. 22.