

ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ ПОСЛЕКАСКАДНЫХ ВОЛН НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ОБЕДНЕННОЙ ЗОНЕ ГЦК-КРИСТАЛЛА**А.В. Маркидонов^{1†}, М.Д. Старостенков², П.В. Захаров³, Д.А. Лубяной⁴,
В.Н. Липунов², О.В. Обидина⁵**

†markidonov_artem@mail.ru

¹Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета, ул. Циолковского, 23, 654041, Новокузнецк, Россия²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия³Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, ул. Короленко, 53, 659333, Бийск, Россия⁴Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске, ул. Ноградская, 19а, 653039, Прокопьевск, Россия⁵Белорусско-Российский университет, пр. Мира, 43, 212000, Могилев, Республика Беларусь

В представленной статье методом молекулярной динамики проведено исследование влияния ударных послекаскадных волн, образующихся в твердом теле при облучении высокоэнергетическими частицами, на процесс структурных изменений, происходящих в обедненной зоне кристалла с ГЦК решеткой (на примере никеля). При выполнении моделирования взаимодействие между атомами описывалось с помощью потенциала, рассчитанного в рамках метода погруженного атома. Ударные послекаскадные волны создавались путем присвоения граничным атомам расчетной ячейки скорости, превышающей скорость звука в моделируемом материале. Показано, что в процессе релаксации моделируемой системы, содержащей малую концентрацию вакансий, дефекты перестраиваются в тетраэдры дефектов упаковки, а при высокой концентрации наблюдается формирование зеренной структуры и порообразование. Под воздействием ударных волн число атомов, принадлежащих ГПУ-фазе и представляющие собой в моделируемом кристалле дефекты упаковки, уменьшается. Кроме того, с помощью анализ дислокационной структуры моделируемой системы выполнена оценка числа, типа и общей протяженности сформированных в процессе релаксации дислокационных сегментов. Показано, что под воздействием ударных волн происходит уменьшение общего числа дислокационных сегментов, в результате чего начинают преобладать сегменты типа частичных дислокаций Шокли. Исследование образованной при высокой концентрации вакансий зеренной структуры показало, что избыточный свободный объем растворяется в межзеренных границах. После прохождения ударных волн доля растворенного свободного объема снижается, и он локализуется в области генерирования волн в виде нанопор. Выполнена количественная оценка уменьшения растворенного свободного объема при различных температурах.

Ключевые слова: метод молекулярной динамики, метод погруженного атома, ударная волна, вакансии, дефект упаковки.

INFLUENCE OF SHOCK POST-CASCADE WAVES ON THE STRUCTURAL CHANGES OCCURRING IN THE DEPLETED ZONE OF THE FCC CRYSTAL**A.V. Markidonov^{1†}, M.D. Starostenkov², P.V. Zakharov³, D.A. Lubyanyoy⁴,
V.N. Lipunov², V.V. Abidzina⁵**

†markidonov_artem@mail.ru

¹Novokusnetsk Branch-Institute of Kemerovo State University, Tsiolkovskii Str., 23, Novokuznetsk, 654041, Russia²I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia³The Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University, Korolenko Str., 53, Biysk, 659333, Russia⁴Branch of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in Prokopyevsk, Nogradskaya Str., 19a, Prokopyevsk, 653039, Russia⁵Belarusian-Russian University, Mira Pr., 43, Mogilev, 212000, Republic of Belarus

In the present article, the molecular dynamics method has been used to study the effect of shock post-cascade waves generated in a solid when irradiated with high-energy particles on the process of structural changes occurring in the depleted crystal zone with an FCC lattice (for example, nickel). When performing simulations, the interaction between atoms was described using the potential calculated in the framework of the embedded atom method. Shock post-cascade waves were created by assigning the boundary atoms of the computational cell to a velocity exceeding the speed of sound in the simulated material. It is shown that during the relaxation of a simulated system containing a small concentration of vacancies, the defects are rearranged into stacking fault tetrahedra, and at a high concentration, the formation of a grain structure and void formation are observed. Under the influence of shock waves, the number of atoms belonging to the hcp phase and representing stacking fault in the simulated crystal decreases. In addition, using the analysis of the dislocation structure of the simulated system, the number, type and total length of the dislocation segments formed during the relaxation process was estimated. It is shown that under the influence of shock waves, a decrease in the total number of dislocation segments occurs, as a result of which Shockley partial dislocation-type segments begin to dominate. The study of the grain structure formed at a high concentration of vacancies showed that excess free volume dissolves in the grain boundaries. After the passage of shock waves, the fraction of dissolved free volume decreases, and it is localized in the region of wave generation in the form of nanovoids. A quantitative estimate of the decrease in dissolved free volume at various temperatures was performed.

Keywords: molecular dynamics method, embedded atom method, shock wave, vacancies, stacking fault.



Введение

Одной из важнейших задач радиационного материаловедения является прогнозирование поведения конструкционных материалов в условиях интенсивного облучения высокоэнергетическими частицами с целью улучшения их радиационной стойкости.

Известно, что область повреждения, образуемая в результате прохождения каскада атомных соударений, имеет дифференциацию распределения атомов. Центр данной области представляет собой обедненную зону, окруженную облаком смещенных атомов. Из-за процессов каналирования и фокусировки атомных столкновений возможно проявление анизотропии в распределении межузельных атомов, предотвращающее их аннигиляцию с вакансиями. В результате этого вакансионные скопления, присутствующие в избытке, начинают перестраиваться в различные кластеры – дислокационные петли, тетраэдры дефектов упаковки и т.п.

Наряду с традиционными методами физического эксперимента радиационные дефекты успешно исследуются методами компьютерного моделирования. Данные методы позволяют получить результаты, которые невозможно на сегодняшний день достичь экспериментальным путем. Например, в работе [1] методом молекулярной динамики исследовались процессы образования дислокационных петель в облученном α -Fe. Показано, что при пересечении отдельных каскадов возможно образование даже энергетически невыгодных петель. В работах [2-4] изучалась стабильность и механизмы образования различных вакансионных кластеров в ГЦК металлах. Показано, что в процессе релаксации мелкие кластеры объединяются и образуют тетраэдры дефектов упаковки (ТДУ). Критические условия внешнего воздействия, при котором дислокационные петли Франка перестраиваются в ТДУ, определены для ГЦК кристалла в [5]. В работе [6] описывается дислокационный механизм образования ТДУ на границе раздела Cu-Al. Процесс частичного разрушения ТДУ с образованием дислокационных петель под воздействием приложенных напряжений исследован в работе [7]. Тем не менее, несмотря на большое число различных работ по данной тематике, при изучении процессов формирования ТДУ в обедненных зонах не учитывается возможность распространения по кристаллу ударных послекаскадных волн [8], образующихся из-за несоответствия времен термализации атомных колебаний в некоторой

конечной области и отвода от нее тепла. В результате резкого расширения сильно разогретой области формируется почти сферическая ударная волна. Как показали наши прошлые исследования, данные волны могут оказывать значительное влияние на процессы образования, кластеризации и миграции дефектов [9-15].

Целью настоящей работы является выявление особенностей структурных преобразований, происходящих в обедненной зоне, принадлежащей ГЦК-кристаллу (на примере никеля), под воздействием ударных послекаскадных волн.

1. Методика исследования

При проведении исследования использовался метод молекулярной динамики (МД), в основе которого лежит модельное представление о системе взаимодействующих материальных точек, движение которых описывается классическими дифференциальными уравнениями Ньютона. Интегрирование заданных уравнений осуществлялось при помощи скоростного алгоритма Верле с шагом 5 фс. Для поддержания постоянной температуры применялся пропорциональный термостат Берендсена. В качестве функции межчастичного взаимодействия использовался потенциал, построенный с использованием метода погруженного атома [16]. Все расчеты производились с помощью пакета МД-моделирования XMD.

МД-модель строилась следующим образом. В прямоугольной системе координат задавался размер расчетной ячейки, имеющей форму куба, в трех взаимно ортогональных кристаллографических направлениях, совпадающих с координатными осями. Затем формировалась элементарная ячейка, расположение частиц в которой соответствовало ГЦК-решетке, и путем трансляция данными ячейками заполнялся весь имеющийся объем. Общее число атомов составляло $\approx 30\,000$. Так как в качестве моделируемого материала рассматривался никель, то параметр решетки задавался равным 3.52 \AA . Ориентация расчетной ячейки в пространстве устанавливалась таким образом, чтобы ось X совпадала с кристаллографическим направлением $[1\bar{1}0]$, ось Y – с направлением $[11\bar{2}]$, а Z – с $[111]$. Бесконечная протяженность расчетной ячейки имитировалась путем использования периодических граничных условий вдоль всех трех осей. Далее в ячейке удалялись атомы, выбранные случайно в соответствии с дис-



кретным равномерным распределением, число которых соответствовало от 5% до 20%-й концентрации вакансий n . После этого система выдерживалась при задаваемой температуре определенное число вычислительных шагов и после снятия теплового фона путем многократного обнуления скоростей атомов анализировалась полученная структура с помощью различных визуализаторов [17].

Ударная волна создавалась следующим образом. Выделялся единичный слой граничных атомов расчетной ячейки. После этого данным атомам присваивалась скорость, равная по величине (в полтора раза превышающая скорость продольных упругих волн в никеле), и направленная вдоль оси X . Распространяющиеся по эстафетному принципу атомные смещения представляли собой бегущую волну, ширина фронта которой составляет несколько межатомных расстояний, а амплитуда колебаний значительно превышает по величине тепловые

колебания атомов, что характерно для волн, генерируемых каскадной областью [18].

2. Результаты проведенного исследования и их обсуждение

На начальном этапе исследовались структурные перестройки, происходящие в обедненной зоне моделируемого кристалла, при различных температурах. В результате моделирования было установлено, что вакансии начинают объединяться в кластеры различных размеров, с последующим образованием различных тетраэдров дефектов упаковки (см. рис.1). Как правило, тетраэдры являлись частично не построенными. Образующимся в ходе моделирования дефектам упаковки соответствуют атомы с локальным ГПУ-окружением. Для оценки доли таких атомов использовался структурный анализ, заключающийся в идентификации локального окружения частиц с использованием метода углов и связей Экланда-Джонса [19].

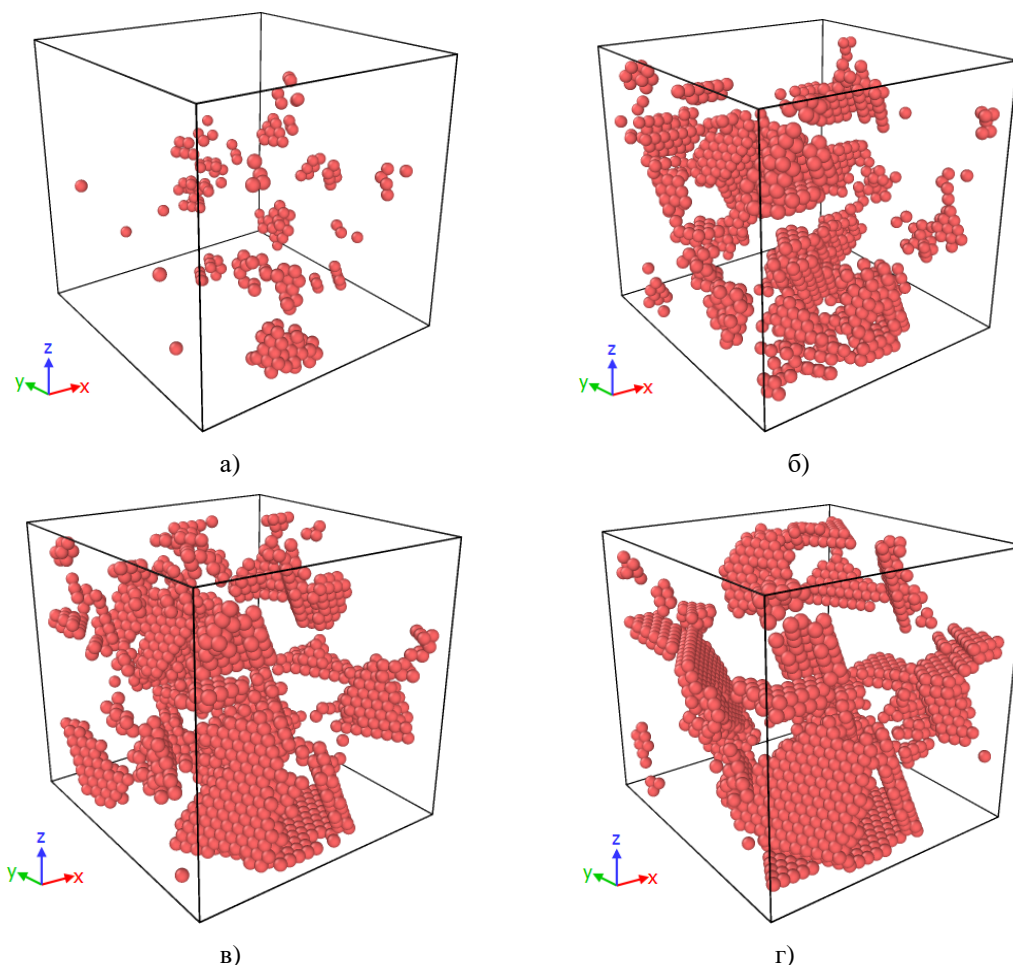


Рис.1. Преобразования дефектной структуры расчетной ячейки через 1 000 (а), 5 000 (б), 10 000 (в) и 15 000 (г) вычислительных шагов. Концентрация вакансий $n = 5\%$, поддерживаемая температура расчетной ячейки $T = 900$ К. Показаны атомы, локальное окружение которых соответствует ГПУ-решетке

По мере увеличения концентрации вакансий наблюдаются более значительные структурные изменения в моделируемом кристалле. Так при 15%-й концентрации вакансий наблюдалась локальная аморфизация. При значительном разогреве и с последующей закалкой нали-

чие избыточного свободного объема способствует образованию зеренной структуры (см. рис.2.а). Дальнейшее увеличение создаваемых вакансий приводит к порообразованию в кристалле (см. рис.2.б).

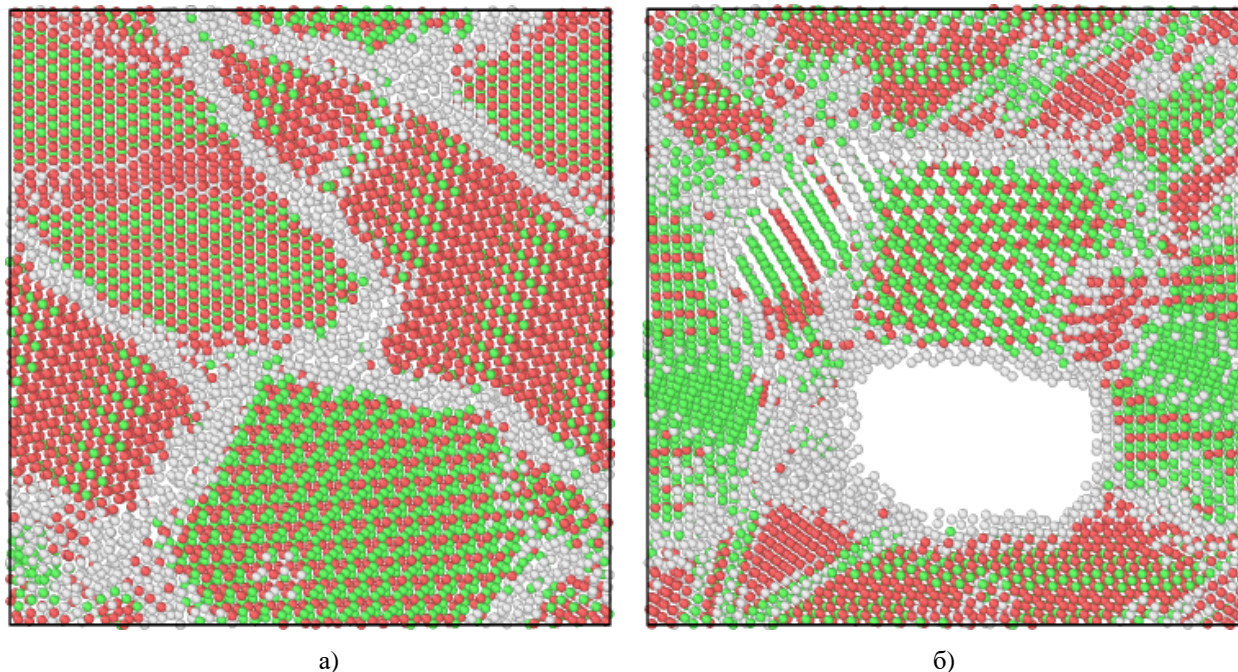


Рис.2. Структура моделируемого кристалла (плоскость XZY) через 10 000 вычислительных шагов: (а) $n = 15\%$, $T = 1200$ К; (б) $n = 20\%$, $T = 300$ К. Цветовая визуализация соответствует распределению локального окружения атомов: зеленый – ГЦК, красный – ГПУ, белый – не определено

Для построенной молекулярно-динамической модели описываемые изменения кристаллической структуры являются наиболее характерными. Поэтому интерес представляет изучения влияния ударной волны на структурные преобразования, происходящие при названных выше концентрациях вакансий.

В общем случае прохождение по кристаллу фронта сжатия и последующей за ним волны разгрузки вызывает миграцию вакансий по направлению к области кристалла, в которой генерировалась волна. Поэтому в случае генерации нескольких волн вакансии не успевают образовывать кластеры, и их локализация в одном месте вызывает либо аморфизацию данной области, либо образование в ней поры. В связи с этим был проведен сравнительный анализ структурных изменений, происходящих в кристалле при генерации волн через определенный временной интервал. Оказалось, что для кристалла, в котором были сгенерированы волны, характерно уменьшение доли атомов, принад-

лежащих ГПУ-фазе. Так на рис.3 представлено изменение соответствующего числа атомов в процессе моделирования при последовательном генерировании пяти волн с интервалом 1 000 вычислительных шагов.

Анализ дислокационной структуры расчетной ячейки показал, что после релаксации в моделируемой системе содержатся преимущественно вершинные дислокации с вектором Бюргерса $\mathbf{b} = 1/6\langle 110 \rangle$ и частичные дислокации Шокли ($\mathbf{b} = 1/6\langle 112 \rangle$). Наличие данных дислокаций обусловлено дефектами упаковки, в том числе образующих тетраэдр. После прохождения серии ударных волн общее число дислокационных сегментов значительно снижается, и в расчетной ячейке наибольшей протяженностью начинают обладать дислокации Шокли. Так, например, на рис.4 приведены дислокационные структуры расчетной ячейки, соответствующие результатам моделирования, представленным на рис.3 в момент времени $t = 75$ пс. В данный момент общая протяжен-



ность линий вершинных дислокаций для моделируемой системы составила 1039.78 \AA , а для дислокаций Шокли – 1498.72 \AA . Если же при проведении моделирования к этому моменту в

расчетной ячейке было сгенерировано пять ударных волн, то протяженность дислокационных линий сокращалась до 202.081 \AA и 556.222 \AA соответственно.

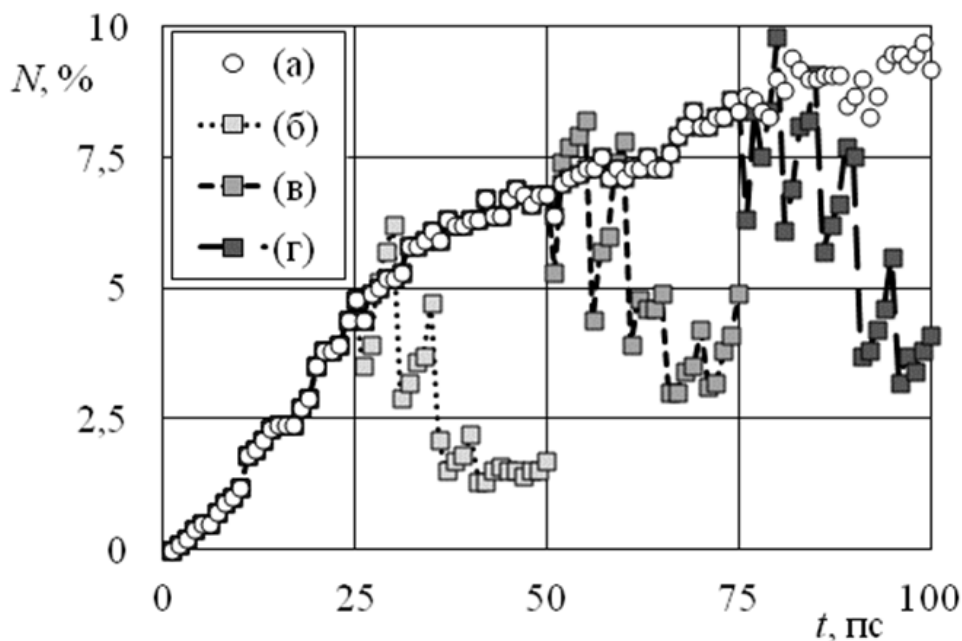


Рис.3. Изменение содержания атомов N расчетной ячейки, принадлежащих ГПУ-фазе, в процессе моделирования: (а) – без генерации волны; (б), (в) и (г) – при генерации волны через 5 000, 10 000 и 15 000 вычислительных шагов соответственно. Концентрация вакансий $n = 5\%$, поддерживаемая температура расчетной ячейки $T = 900 \text{ K}$

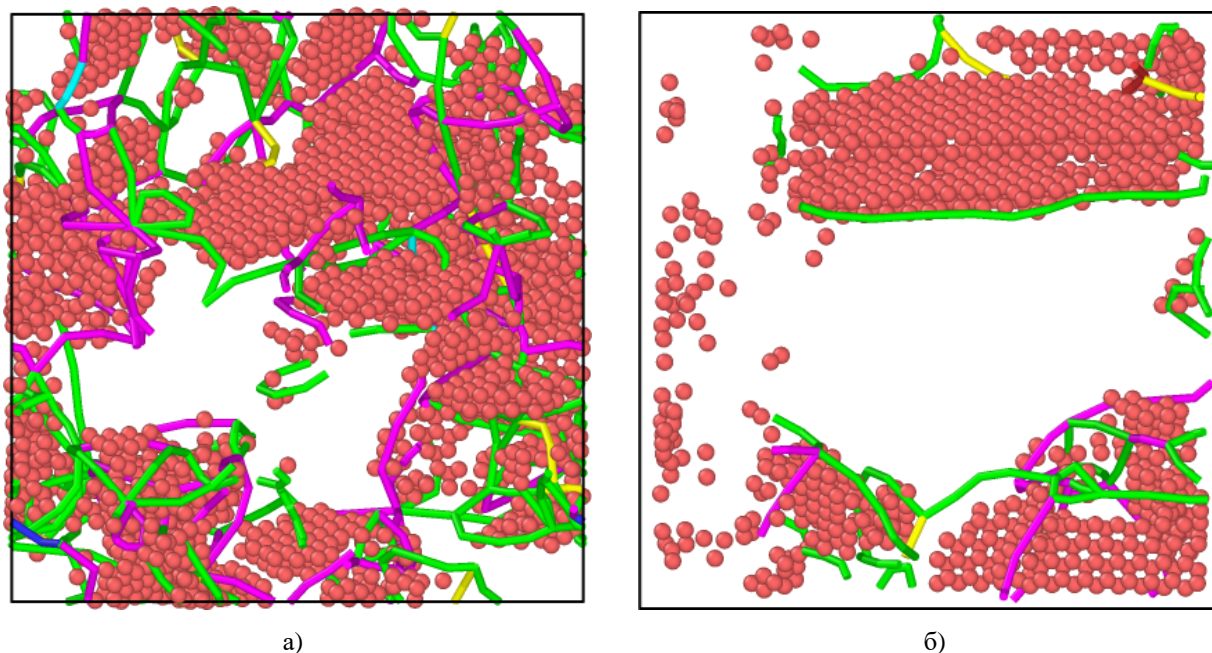


Рис.4. Распределение дислокационных сегментов в расчетной ячейке (плоскость XZY) после 75 пс моделирования: (а) – без генерации ударных волн; (б) – после прохождения пяти ударных волн. Концентрация вакансий $n = 5\%$, поддерживаемая температура расчетной ячейки $T = 900 \text{ K}$. Цветовая визуализация дислокационных линий соответствует вектору Бюргерса: зеленый – $1/6\langle 112 \rangle$, фиолетовый – $1/6\langle 110 \rangle$, и др.

При построении изображений на рис.4 использовался алгоритм Dislocation Extraction (DXA) [20, 21], основанный на тесселяции и триангуляции Делоне. Данный алгоритм идентифицирует выявленные дислокационные линии и раскрашивает их в определенный цвет.

На следующем этапе исследовались расчетные ячейки с 15%-й концентрацией вакансий. Как уже говорилось выше в данном случае характерно образование зеренной структуры. При этом избыточный свободный объем распределяется по границам зерен. Под воздействием волн наблюдается укрупнение зерен и при этом распределенный свободный объем начи-

нает локализоваться в области генерации волн (см. рис.5).

Для количественной оценки растворенного свободного объема в межзеренных границах можно воспользоваться методом поверхностной сетки [22-24], основанном на тетраэдризации Делоне. В данном методе геометрическому множеству точек сопоставляется множество тетраэдров, заполняющих пространство между точками, при условии, что они располагаются на определенном расстоянии (в нашем случае половина кратчайшего расстояния между атомами). После этого выполняется расчет объема полученной фигуры.

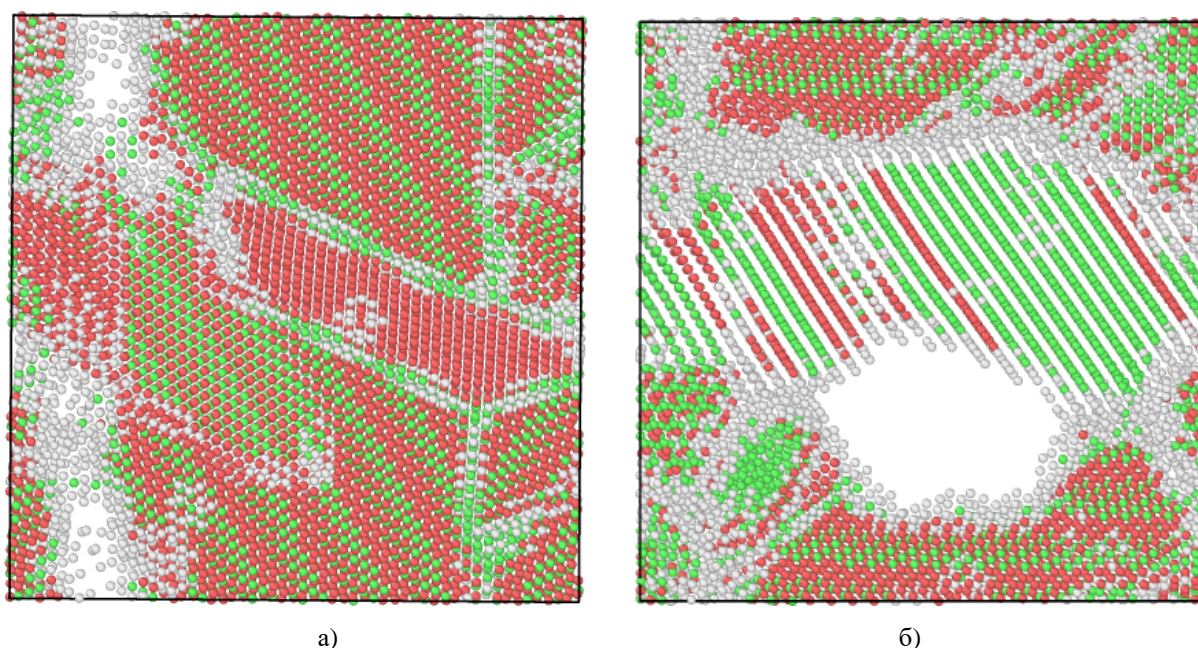


Рис.5. Структура моделируемого кристалла (плоскость XZY) после прохождения пяти ударных волн, генерируемых через 3 000 вычислительных шагов: (а) $n = 15\%$, $T = 1200$ К; (б) $n = 20\%$, $T = 300$ К. Цветовая визуализация выполнена аналогично рис.2

Вычисления с помощью описанного выше метода показали, что, например, после прохождения по расчетной ячейке, содержащей 15%-ю концентрацию вакансий, пяти ударных волн, генерируемых с интервалом 3000 вычислительных шагов, при температуре 600 К, 900 К и 1200 К содержание растворенного свободного объема уменьшается на 3.74%, 4.69% и 6.73% соответственно.

Заключение

Проведенное исследование показало, что ударные послекаскадные волны, генерируемые в твердом теле, содержащем обедненную зону,

могут оказывать значительное влияние на процессы структурной перестройки вакансионных скоплений. Под воздействием волн уменьшается число образуемых тетраэдров дефектов упаковки, а также снижается доля атомов, принадлежащих ГПУ-фазе. Кроме того, прохождение волн по формирующейся поликристаллической структуре способствует понижению доли растворенного на межзеренных границах избыточного свободного объема. Как правило, под воздействием волн свободный объем локализуется в виде нанопор.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы в радиационном ма-

териаловедении, нанотехнологии, при ультразвуковой обработке материалов [25-30].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Алтайского края в рамках научного проекта №18-42-220002 р_а.

Список используемой литературы

- Granberg F., Byggmatar J., Sand A.E., Nordlund K. Cascade debris overlap mechanism of <100> dislocation loop formation in Fe and FeCr // *Europhysics Letters*. – 2017. – V.119, No.5. – P. 56006–6.
- Osetsky Yu.N., Victoria M., Serra A., Golubov S.I., Priego V. Computer simulation of vacancy and interstitial clusters in bcc and fcc metals // *Journal of Nuclear Materials*. – 1997. – V.251. – P. 34–48.
- Аксенов М.С., Полетаев Г.М., Ракитин Р.Ю., Краснов В.Ю., Старостенков М.Д. Стабильность вакансионных кластеров в ГЦК металлах // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2005. – Т.2, №4. – С. 24–31.
- Бакаев А.В., Журкин Е.Е. Характеристики радиационных дефектов в аустенитных сплавах // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. – 2014. – №2(194). – С. 37–45.
- Kadoyoshi T., Kaburaki H., Shimizu F., Kimizuka H., Jitsukawa S., Li J. Molecular dynamics study on the formation of stacking fault tetrahedra and unfauling of Frank loops in fcc metals // *Acta Materialia*. – 2007. – V.55, No.9. – P. 3073–3080.
- Li R., Chew H.B. Closed and open-ended stacking fault tetrahedra formation along the interfaces of Cu–Al nanolayered metals // *Philosophical Magazine*. – 2015. – V.95, No.25. – P. 2747–2763.
- Zhang L., Lu C., Michal G., Deng G., Tieu K. The formation and destruction of stacking fault tetrahedron in fcc metals: A molecular dynamics study // *Scripta Materialia*. – 2017. – V.136. – P. 78–82.
- Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред // *Успехи физических наук*. – 2008. – Т.178, №9. – С. 991–1001.
- Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Обидина О.В. Агрегатизация вакансий, ини-
- цированная послекаскадными ударными волнами // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2012. – Т.9, №4. – С. 548–555.
- Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Павловская Е.П., Яшин А.В., Медведев Н.Н., Захаров П.В. Структурная трансформация вакансионных пор в деформированном кристалле под воздействием ударных волн // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2013. – Т.10, №4. – С. 563–571.
- Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Захаров П.В., Жилианг Жанг. Роль ударных послекаскадных волн в низкотемпературной активации самодиффузии // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2014. – Т.11, №3. – С. 346–352.
- Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Смирнова М.В. Процесс самодиффузии в ГЦК-кристалле, вызванный прохождением ударной волны // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2015. – Т.58, №6. – С. 80–84.
- Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Захаров П.В., Обидина О.В. Порообразование в ГЦК кристалле под воздействием ударных послекаскадных волн // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2015. – Т.12, №2. – С. 231–240.
- Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Полетаев Г.М. Трансформация нанопор в золоте в условиях термоактивации и воздействия звуковых и ударных волн // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2015. – Т.79, №9. – С. 1233–1237.
- Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Гришунин В.А., Башенко Л.П. Атомные механизмы миграции границы зерен кручения (110) под воздействием ударных послекаскадных волн на примере никеля // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2017. – Т.14, №4. – С. 528–534.
- Foiles S. M., Baskes M. I., Daw M. S. Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys // *Physical Review B*. – 1986. – V.33, No.12. – P. 7983–7991.
- Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the Open Visualization Tool // *Modelling and Simulation Materials Science and Engineering*. – 2010. – V.18. – P. 015012–7.
- Zhukov V.P., Boldin A.A. Elastic-wave generation in the evolution of displacement peaks // *Atomic Energy*. – 1987. – V.68. – P. 884–889.



19. Ackland G.J., Jones A.P. Applications of local crystal structure measures in experiment and simulation // *Physical Review B*. – 2006. – V.73, No.5. – P. 054104–7.
20. Stukowski A., Albe K. Extracting dislocations and non-dislocation crystal defects from atomistic simulation data // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2010. – V.18, No.8. – P. 085001–13.
21. Stukowski A., Bulatov V.V., Arsenlis A. Automated identification and indexing of dislocations in crystal interfaces // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2012. – V.20, No.8. – P. 085007–16.
22. Stukowski A. Computational analysis methods in atomistic modeling of crystals // *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. – 2014. – V.66, No.3. – P. 399–407.
23. Edelsbrunner H., Mücke E. Three-dimensional alpha shapes // *ACM Transactions on Graphics*. – 1994. – V.13, No.1. – P. 43–72.
24. Taubin G. A signal processing approach to fair surface design // *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques «SIGGRAPH '95»*. – ACM New York, NY, USA, 1995. – P. 351–358.
25. Старостенков М.Д., Дмитриев С.В. Распределение пространственных многогранников по координационным сферам в ОЦК-решетке // *Журнал структурной химии*. – 1993. – Т.34, №4. – С. 107.
26. Кулагина В.В., Чаплыгина А.А., Попова Л.А., Старостенков М.Д., Потекаев А.И., Клопов А.А. Структурно-фазовые превращения сплавов системы Cu-Pt при атомном упорядочении // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2012. – Т.55, №7. – С. 78–87.
27. Багаутдинов А.Я., Викарчук А.А., Вихорь Н.А., Будовских Е.А., Воробьев С.В., Глезер А.М., Головин Ю.И., Громов В.Е., Громова А.В., Гун Г.С., Данилов В.И., Иванов Ю.Ф., Кареев С.И., Карыев Л.Г., Зуев Л.Б., Кислицин С.Б., Клубович В.В., Клопов А.А., Ковалевская Т.А., Коваленко В.В. и др. Структура и свойства перспективных металлических материалов. – Томск, 2007. – 580 с.
28. Безносок С.А., Потекаев А.И., Старостенков М.Д. Теоретические основы компьютерного нанотехнологического биомиметического наносистем : монография / М. С. Жуковский [и др.] ; Алтайский гос. ун-т [и др.]. – Томск, 2011. – 236 с.
29. Потекаев А.И., Старостенков М.Д., Кулагина В.В. Влияние точечных и планарных дефектов на структурно-фазовые превращения в предпереходной слабоустойчивой области металлических систем. – Томск, 2014. – 486 с.
30. Poletaev G.M., Sannikov A.V., Berdychenko A.A., Starostenkov M.D. Molecular dynamics study of plastic deformation mechanisms near the interphase boundary in two-dimensional bimetallic systems // *Materials Physics and Mechanics*. – 2015. – V.22, No.1. – P. 15–19.

Поступила в редакцию 28.05.19.

Сведения об авторах

Маркидонов Артем Владимирович, д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой НФИ КемГУ, markidonov_artem@mail.ru
Старостенков Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой АлтГТУ, genphys@mail.ru
Захаров Павел Васильевич, д.ф.-м.н., доцент, АГПУ, zakharovpv1@rambler.ru
Лубяной Дмитрий Анатольевич, к.т.н., доцент филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, lubjanoy@yandex.ru
Липунов Вячеслав Николаевич, асп. АлтГТУ, sl222527@mail.ru
Обидина Ольга Васильевна, к.ф.-м.н., доцент БРУ, obidina@tut.by