

УДК 669.018

*А.В. МАРКИДОНОВ**, *М.Д. СТАРОСТЕНКОВ***, *А.И. ПОТЕКАЕВ****, *Н.Н. МЕДВЕДЕВ*****,
*Т.И. НЕВЕРОВА******, *А.А. БАРЧУК******, *В.В. КУЛАГИНА****

ПОВЕДЕНИЕ КРАУДИОНОВ И ИХ КОМПЛЕКСОВ В СЛАБОУСТОЙЧИВОМ СОСТОЯНИИ МАТЕРИАЛОВ

Методом молекулярной динамики в ГЦК-материале, находящемся в слабоустойчивом относительно внешнего термосилового воздействия состоянии, исследованы как изолированные краудионы, так и их комплексы. Показано, что состояние системы с изолированными краудионами является слабоустойчивым, поэтому их комплексы являются более выгодной конфигурацией межузельных атомов. Установлено, что даже при небольшом внешнем термосиловом воздействии (термоактивации или прохождении продольной волны) одиночные краудионы образуют гантель. В слабоустойчивом состоянии материала, которое реализуется в окрестности структурно-фазовых превращений, комплексы краудионов являются более устойчивыми конфигурациями. При этом объемный краудионный комплекс является наиболее выгодным, причем фононное трение оказывает на него меньшее влияние.

Ключевые слова: слабоустойчивые состояния, краудион, молекулярная динамика.

Введение

В металлических материалах вблизи структурно-фазовых превращений наблюдаются слабоустойчивые к внешним термосиловым воздействиям состояния [1–20]. В этих состояниях может наблюдаться целый набор сменяющих друг друга структур или их смеси, при этом термодинамическая разница структурных состояний очень мала, что означает малый энергетический барьер между различными структурными состояниями. Появляющиеся в этих состояниях структурные дефекты играют очень важную роль в структурно-фазовых превращениях системы, а в зависимости от предыстории и термосилового внешнего воздействия реализуется тот или иной путь превращения. Одним из таких дефектов является краудион.

Краудион, т.е. цепочка атомов, смещенных вдоль плотноупакованного направления, является одной из возможных конфигураций собственного межузельного атома в кристаллических структурах. Вызванная наличием избыточного атома деформация происходит, по преимуществу, именно вдоль таких направлений, поэтому даже расположенные вдали от дефекта атомы смещаются относительно своих положений в идеальной решетке. При этом краудионы легко перемещаются вдоль плотноупакованных рядов, так как разделяющий два структурных состояния с равновесными положениями краудиона потенциальный барьер достаточно мал, и их движение носит явно выраженный кооперативный характер. Данные дефекты могут играть значительную роль, например, при пластической деформации в случае ограниченной подвижности дислокаций [21, 22]. В современном представлении смещение атомов плотноупакованных рядов при движении краудиона представляет собой уединенную волну смещений и рассматривается как пример солитона [23–25].

Помимо одиночных краудионов моделировались и краудионные комплексы [26, 27]. При этом было получено, что из-за высокой диффузионной подвижности межузельных атомов и действующих полей напряжений объединение дефектов внедрения в комплексы происходит достаточно быстро. В [26] было показано, что после введения внедренных атомов в модельную систему Ni_3Al и последующего отжига при $T_{пл}/2$ краудионные комплексы в процессе релаксации напряжений ориентируются в сторону вакансионного кластера. В [27] наблюдали, что группы межузельных атомов трансформировались в краудионные комплексы после прохождения через кристалл продольной волны, распространяющейся со сверхзвуковой скоростью.

В данной статье рассматривается структура материала, находящегося в слабоустойчивом относительно внешнего термосилового воздействия состоянии, при наличии в нем как изолированных краудионов, так и краудионных комплексов. При этом достаточно большое внимание уделяется особенностям их поведения и движения при определенном типе внешнего термосилового воздействия.

Модель и методика моделирования

Рассматривалась модельная система, имитирующая объемный металл с ГЦК-решеткой. Расчетный блок модели включал 30000 атомов, который повторялся введением периодических граничных условий. Взаимодействие между атомами [29] описывалось парным потенциалом Морзе

$$\phi(r_{ij}) = D\beta e^{-\alpha r_{ij}} (\beta e^{-\alpha r_{ij}} - 2), \quad (1)$$

где D – энергетический параметр, соответствующий энергии диссоциации пары атомов (на графике $\phi = \phi(r_{ij})$ – это глубина потенциальной ямы); α – параметр, определяющий жесткость межатомных связей; $\beta = e^{\alpha r_0}$, r_0 – равновесное расстояние между атомами. Так как ранее исследования проводились на алюминии, то в данном случае изучался также алюминий, а значения параметров потенциала взаимодействия были взяты из [29]. При этом слабоустойчивое состояние задавалось таким образом, чтобы разделяющий два структурных состояния системы с равновесными положениями краудиона потенциальный барьер был достаточно мал. В этом случае внешнее термодинамическое воздействие будет переводить систему из одного структурного состояния с равновесным положением краудиона в другое. Поскольку интерес в данном случае заключается в движении краудиона, постольку такое структурное превращение и представляет нашу цель. При этом применение простого полуэмпирического потенциала является вполне оправданным, так как упругие нелинейные характеристики системы определяются объемным модулем упругости, по которому достаточно точно подгонялись параметры потенциала [29]. Взаимодействие между атомами ограничивалось пятью первыми координационными сферами. Температура расчетной ячейки задавалась через начальные скорости атомов в соответствии с распределением Максвелла. Направление скоростей задавалось случайно, но с условием, что суммарный импульс системы равнялся нулю (система находилась в состоянии покоя):

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\xi kT}{m}}, \quad \sum_{i=1}^N m_i v_i = 0. \quad (2)$$

Здесь использованы следующие обозначения: $v_{\text{кв}}$ – среднеквадратичная скорость атомов; ξ – размерность системы; k – постоянная Больцмана; T – температура; m – масса атома; N – число атомов в расчетной ячейке.

Компьютерный эксперимент выполнялся методом молекулярной динамики [30] с использованием программы [31]. Время одной итерации равнялось 10^{-14} с.

В начале эксперимента в соответствующие плотноупакованные ряды расчетного блока внедрялись избыточные атомы, а соседние атомы перемещались из своих первоначальных положений равновесия. После этого система охлаждалась в течение нескольких пикосекунд. Затем включалась процедура релаксации возникших в системе напряжений, посредством ее разогрева возле 0 К. Через определенные интервалы времени фиксировалось изменение структуры, происходящее в процессе релаксации без диссипации энергии за пределы расчетного блока. Основным визуализатором динамики структуры являлся визуализатор атомных смещений из начальных положений. В случае выбранного единичного масштаба смещения изображались в виде отрезков, соединяющих начальное и конечное положения атомов.

Дополнительно использовался визуализатор распределения потенциальной энергии, аналогичный описанному в [32]. С помощью данного визуализатора рассчитывалась потенциальная энергия для каждого из атомов, а он окрашивался в определенный цвет (более темный цвет атомов соответствовал меньшему значению энергии, а светлый – большему).

Рассматривались одиночные краудионы (ОК), состоящие из разного числа краудионов, плоские краудионные комплексы (ПКК), представленные на рис. 1, а, и объемные (ОКК), представленные на рис. 1, б. ПКК представляют собой совокупность краудионов, расположенных в соседних плотноупакованных рядах в одной плоскости $\{111\}$, а ОКК – несколько краудионов, расположенных в параллельных плоскостях.

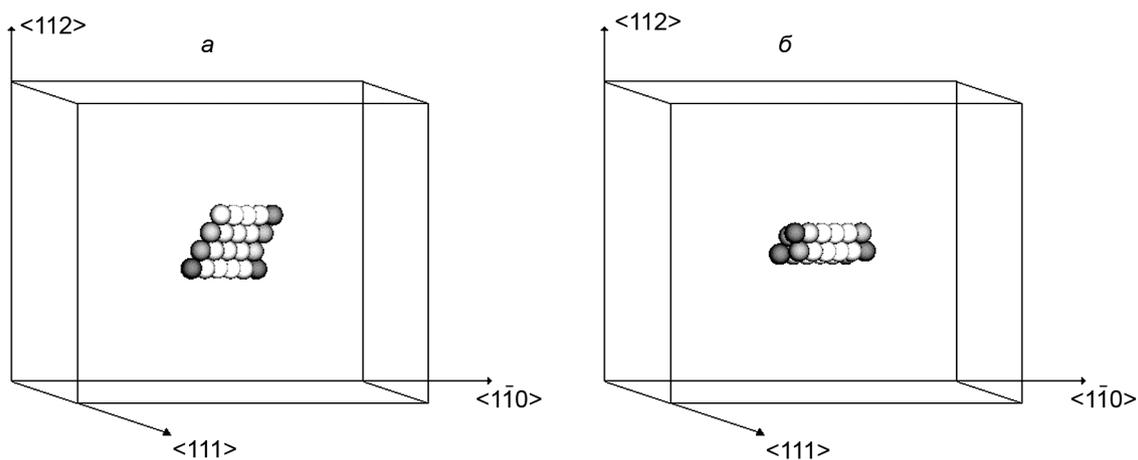


Рис. 1. Фрагмент расчетного блока с плоским (а) и объемным (б) краудионными комплексами, состоящими из четырех краудионов

Полученные результаты и их обсуждение

Начать исследование целесообразно с рассмотрения системы, содержащей одиночный краудион и вакансию. Если краудион представляет собой «размытое» сгущение атомов вдоль плотноупакованного ряда, то вакансия является «размытым» разряжением, которое можно понимать как антикраудион (следуя терминологии [23]). В процессе структурной релаксации центр краудиона, являющийся лишним атомом, начинает смещаться в направлении антикраудиона. Он выталкивает соседний атом и занимает место в узле кристаллической решетки. Посредством атомных столкновений вновь образованный центр краудиона продолжает свое движение. При его приближении на некоторое расстояние к вакансии происходит смещение целой группы атомов данного ряда, в результате чего дефекты аннигилируют. Скорость движения атомов при этом значительно возрастает. Время аннигиляции зависит от расстояния между центрами краудиона и вакансии. Очевидно, что чем оно больше, тем через большее время наблюдается аннигиляция.

При релаксации напряжений в кристаллической структуре, содержащей межузельные атомы и подверженной внешнему воздействию, плоские краудионные комплексы наблюдались не реже объемных, хотя ОКК имеют меньшую энергию образования, чем плоские [26]. Это согласуется с результатами [27]. Отмечено, что структура системы с одиночными краудионами не является устойчивой в конфигурационном отношении, несмотря на «закалку» системы на начальной стадии эксперимента. В процессе структурной релаксации даже при небольшой термоактивации одиночные краудионы трансформируются в гантель. При этом чем больше начальная температура расчетного блока, тем на большем расстоянии от начального положения центра краудиона могла образовываться гантель. Комплексы краудионов, в свою очередь, являются достаточно устойчивыми к изменениям температуры. Ее повышение приводило лишь к тому, что краудионные комплексы начинали смещаться. Например, движение плоского комплекса, состоящего из четырех краудионов, было отмечено начиная с 400 К. Объемный комплекс, состоящий из такого же числа краудионов, начинал двигаться с 200 К. Распад краудионных комплексов на отдельные составляющие начинался при температурах, близких к температуре плавления кристалла.

Рассмотрим комплексы, имеющие различное число краудионов и вакансий, расположенных на одном и том же расстоянии. Оказывается, чем большее число пар дефектов составляет комплекс, тем за меньшее время дефекты аннигилируют. На рис. 2 приведена зависимость времени аннигиляции от числа пар дефектов в комплексе. Эксперимент проводился с плоскими краудионными комплексами (см. рис. 1, а). Центры дефектов были расположены на шести межатомных расстояниях, начальная температура кристалла была равна 0 К, время отсчитывалось с начала эксперимента. Из рис. 2 несложно видеть, что с увеличением размеров комплекса время аннигиляции уменьшается нелинейно, из чего следует, что, начиная с некоторого размера комплекса, время аннигиляции будет изменяться очень незначительно. Действительно, при четырех краудионах в комплексе время аннигиляции равно 0,31 пс, а при семи – 0,27 пс.

Время аннигиляции объемного краудионного комплекса, расположенного на том же расстоянии от комплекса вакансий, как в предыдущем эксперименте, отличается от времени аннигиляции

плоского краудионного комплекса незначительно. Так, например, время аннигиляции объемного комплекса из четырех краудионов равно 0,3 пс.

В то же время одиночный краудион и вакансия, расположенные на дистанции в семь межатомных расстояний, не чувствуют друг друга и, по-видимому, не взаимодействуют. Это проявляется в том, что их аннигиляция не наблюдается даже в течение длительного времени эксперимента. Вносимые этими дефектами структуры возмущения не достаточны в этом случае для их взаимодействия. Однако уже комплексы из двух краудионов и двух вакансий, расположенные на том же расстоянии, аннигилируют через 0,91 пс.

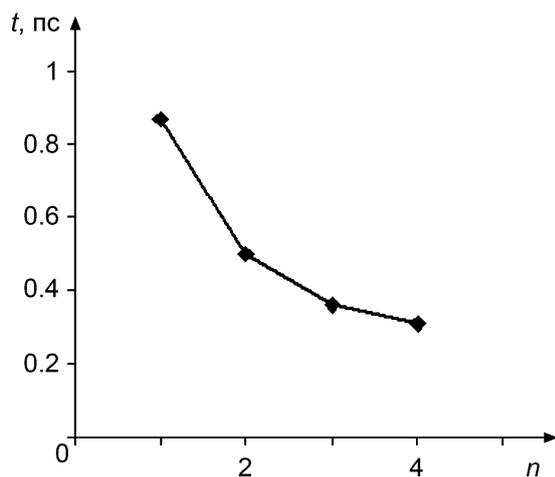


Рис. 2. Зависимость времени аннигиляции дефектов от размера комплекса, где n – число краудионов в комплексе

Рассмотрим расчетный блок, содержащий краудионные комплексы, через который проходит продольная волна в направлении $\langle 1\bar{1}0 \rangle$, т.е. в направлении оси краудионов. За счет волнового процесса комплексы приходят в движение. Продольная волна может возникать, например, в результате ударной деформации, при интенсивном радиационном облучении, за счет резкого расширения разогретой области, ионной имплантации, а также рекомбинации пар Френкеля [33–36]. В начале рассмотрим прохождение продольной волны, движущейся со скоростью звука, которая для алюминия равна 5105 м/с [37]. Продольная волна создается в модели присвоением атомам соответствующей скорости в направлении $\langle 1\bar{1}0 \rangle$. В большинстве выполненных экспериментов одиночный краудион, пройдя некоторое расстояние (в среднем 13 межатомных расстояний), образовывал гантель. Это происходило после того, как его скорость уменьшалась до определенного критического значения.

Плоские комплексы, состоящие из нескольких краудионов, являются более устойчивыми. Такие комплексы продолжали свое движение в течение всего эксперимента. Скорость их движения, по-видимому, не зависит от числа краудионов, так как время их аннигиляции с комплексами вакансий отличается весьма незначительно независимо от расстояния между комплексами.

Проведенные численные эксперименты показали, что объемные краудионные комплексы движутся с большей скоростью. Например, время аннигиляции состоящего из четырех краудионов плоского краудионного комплекса с комплексом вакансий (комплексы располагались на 32 межатомных расстояниях друг от друга) составило 5,78 пс. Аннигиляция объемного краудионного комплекса с объемным вакансионным комплексом, расположенном на таком же расстоянии от него, наблюдалась через 3,93 пс.

Рассмотрим случай, в котором продольная волна распространяется со сверхзвуковой скоростью 10^4 м/с. Одиночный краудион образовывал гантель так же, как и в предыдущем случае, однако расположенную на большем расстоянии от его первоначального положения по сравнению с предыдущим случаем. Скорость движения краудионных комплексов также не зависит от их количества. Однако воздействие подобной волны может приводить к тому, что от плоского комплекса «отрываются» крайние краудионы. Рассмотрим этот случай подробнее. На рис. 3, а представлен плоский краудионный комплекс, состоящий из четырех краудионов. Комплекс приведен в движение за счет прохождения продольной сверхзвуковой волны. В данном случае краудионы уже не представляют собой равномерное сгущение атомов. Через некоторое время «нижний» краудион отклоняется от прямолинейного движения за счет того, что один из атомов сместился из плотноупакованного ряда (рис. 3, б). В результате этого краудион прекратил свое движение, в то время как остальной комплекс все еще двигался, однако уже с меньшей скоростью. Через некоторое время межузельный атом вновь принимает краудионную конфигурацию, в результате чего данный краудион возобновляет движение (рис. 3, в). В дальнейшем комплекс вновь объединяется (рис. 3, г). Подчеркнем, это еще раз подтверждает, что краудионные комплексы являются более выгодными конфигурациями.

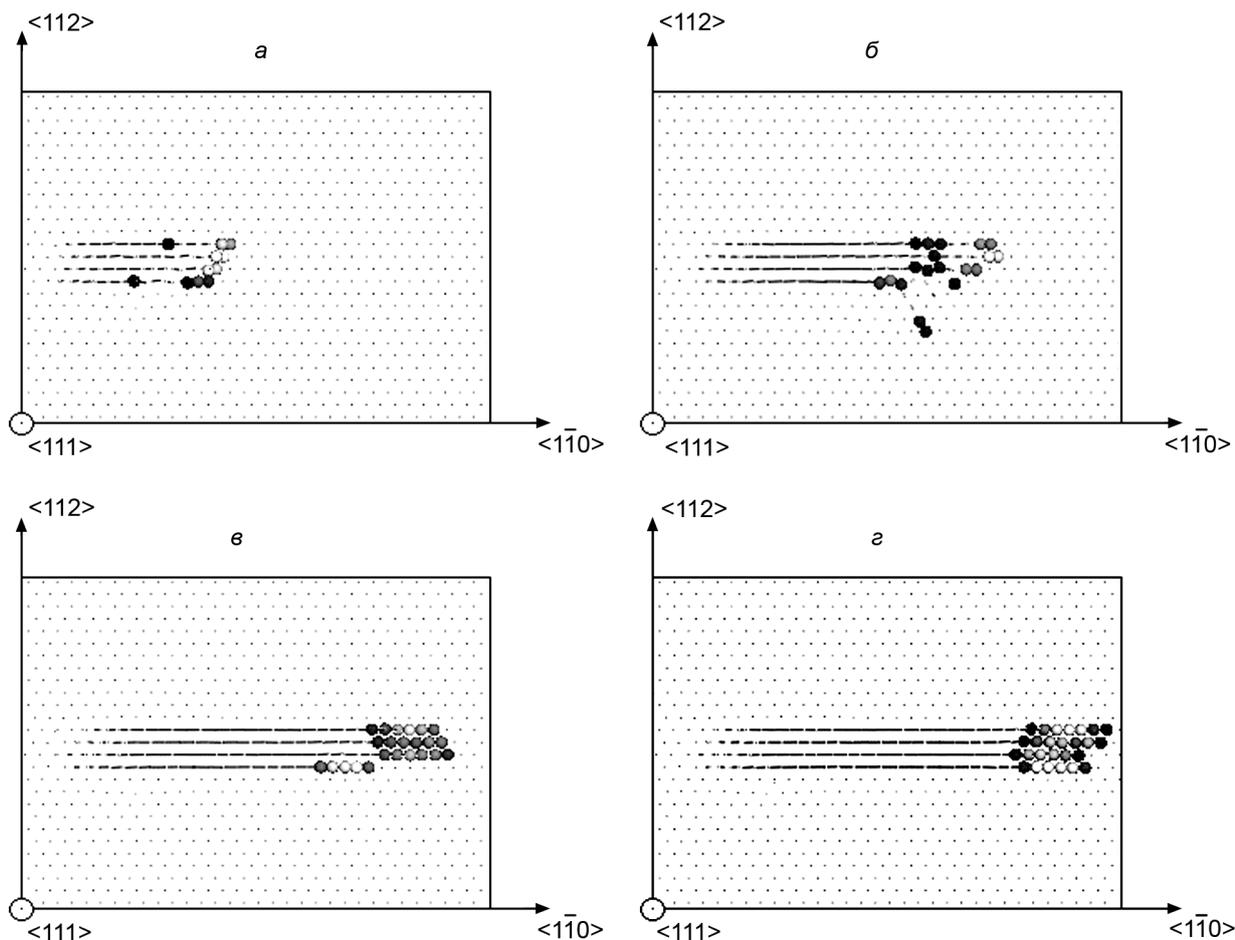


Рис. 3. Фрагмент расчетного блока, содержащего комплекс из четырех краудионов, через 0,25 пс (а), 0,40 пс (б), 0,85 пс (в) и 1,15 пс (г) от начала эксперимента. Линии соединяют начальные и конечные положения атомов

На следующем этапе были исследованы краудионные комплексы, движущиеся при заданной начальной температуре. Увеличение температуры кристалла приводило к уменьшению скорости движения краудионов за счет фононного трения. Взаимодействие с фонами осуществляется в направлениях, перпендикулярных к оси краудиона [38]. При этом на ПКК фононное трение влияет в большей мере, чем на ОКК. Так, на рис. 4 приведена зависимость времени аннигиляции комплексов, состоящих из четырех краудионов и вакансий, в зависимости от температуры. Центры дефектов были расположены на двенадцати межатомных расстояниях друг от друга, время отсчитывалось от начала эксперимента. В движение комплексы приходили за счет прохождения через них продольной волны, распространяющейся в кристалле со звуковой скоростью. Как видно из рис. 4, на время аннигиляции объемных краудионных комплексов температура практически не влияет. Процесс движения таких комплексов можно сравнить с бездиффузионными процессами, например мартенситным фазовым превращением, скорость которого также не зависит от температуры.

Следует отметить, что температура системы задается путем присвоения атомам кинетической энергии, при этом направление вектора скорости каждого атома задается случайным образом. По этой причине время аннигиляции комплексов даже при одной и той же температуре могло получаться различным. На гра-

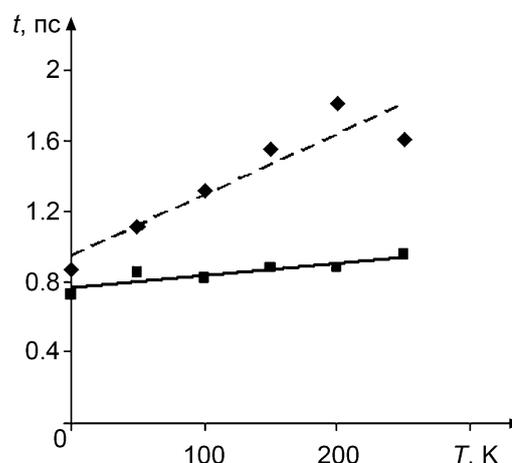


Рис. 4. Зависимость времени аннигиляции краудионов и вакансий от начальной температуры. Ромбами отмечена зависимость для плоского краудионного комплекса, квадратами – для объемного комплекса

фике приведены средние значения времени, полученные по результатам нескольких экспериментов. Несложно видеть, что у плоского краудионного комплекса при повышении температуры отклонение значений времени аннигиляции от линии тренда увеличивается.

Прохождение продольной волны, распространяющейся со сверхзвуковой скоростью, в ряде случаев приводит к тому, что краудионный комплекс меняет направление своего движения. Это

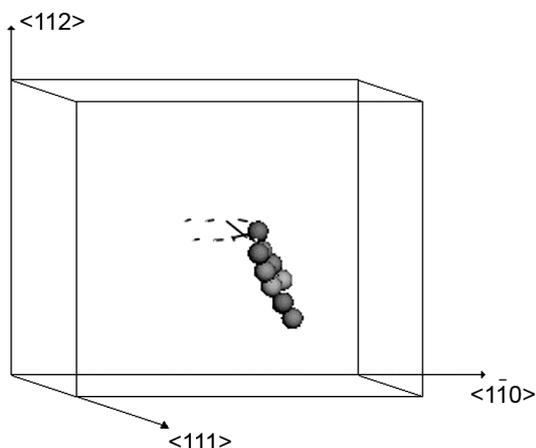


Рис. 5. Фрагмент расчетного блока, содержащий комплекс из двух краудионов, через 5,5 пс эксперимента. Начальная температура 300 К. Линии соединяют начальные и конечные положения атомов

обусловлено тем, что в таких случаях наблюдается «разфокусировка» атомных столкновений, т.е. образующие краудионы атомы вместо кооперативного движения вдоль плотноупакованного ряда начинают двигаться несогласованно. При этом центр краудиона может оказаться в соседнем ряду. Так, на рис. 5 представлен результат одного из экспериментов, в котором плоский комплекс из двух краудионов трансформировался в более выгодный объемный комплекс, при этом оси краудионов изменили ориентацию на направление $\langle 011 \rangle$.

Особо следует подчеркнуть следующее. Очевидно, что краудионам, так же как и точечным дефектам, более выгодно образовывать комплексы, которые отдельные краудионы очень неохотно покидают. Так, если одному из краудионов в комплексе придать некоторую скорость, то это вызовет движение всего комплекса, хотя и с меньшей скоростью по сравнению с соответствующей скоростью в результате прохождения волны через комплекс. Если краудион движется

со звуковой скоростью и достигает неподвижный краудион, расположенный в соседнем ряду, то первый краудион прекращает свое движение, образуя покоящийся комплекс. В случае движения краудиона со сверхзвуковой скоростью после его прохождения мимо покоящегося краудиона второй через некоторое время начинает движение, образуя в дальнейшем комплекс.

Заключение

Рассмотрены краудионные комплексы в слабоустойчивом состоянии относительно внешнего термосилового воздействия. Слабоустойчивое состояние задавалось малым энергетическим барьером между различными структурными состояниями системы. Показано, что состояние системы с изолированными краудионами является слабоустойчивым, поэтому их комплексы являются более выгодной конфигурацией межузельных атомов. Установлено, что даже при небольшом внешнем термосиловом воздействии (термоактивации или прохождении продольной волны) одиночные краудионы образуют гантель. В слабоустойчивом состоянии материала, которое реализуется в окрестности структурно-фазовых превращений, комплексы краудионов являются более устойчивыми конфигурациями. При этом объемный краудионный комплекс является наиболее выгодным, причем фоновое трение оказывает на него меньшее влияние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потекаев А.И., Дмитриев С.В., Кулагина В.В. и др. Слабоустойчивые длиннопериодические структуры в металлических системах / под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 320 с.
2. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Кулагина В.В. и др. Слабоустойчивые предпереходные структуры в никелиде титана / под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 296 с.
3. Потекаев А.И., Наумов И.И., Кулагина В.В. и др. Естественные длиннопериодические наноструктуры / под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 260 с.
4. Дмитриев С.В., Медведев Н.Н., Потекаев А.И. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – № 8. – С. 73–79.
5. Потекаев А.И., Кулагина В.В. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – № 11/3. – С. 148–150.
6. Дмитриев С.В., Потекаев А.И., Назаров А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – № 2. – С. 21–26.
7. Потекаев А.И., Дудник Е.А., Старостенков М.Д., Попова Л.А. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – № 10. – С. 53–62.
8. Дмитриев С.В., Потекаев А.И., Самсонов А.В. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – № 6. – С. 68–82.
9. Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 1995. – № 6. – С. 3–21.
10. Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 1996. – № 6. – С. 22–40.

11. Потекаев А.И., Старостенков М.Д., Сеница Н.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 8. – С. 47–54.
12. Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Тихонова Т.А., Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – № 9/2. – С. 139–144.
13. Потекаев А.И., Дудник Е.А., Старостенков М.Д. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 3. – С. 3–13.
14. Потекаев А.И., Дудник Е.А., Старостенков М.Д. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 5. – С. 33–46.
15. Дмитриев С.В., Потекаев А.И., Баимова Ю.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 3. – С. 20–25.
16. Потекаев А.И., Кулагина В.В. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – № 8/2. – С. 456–459.
17. Клопотов А.А., Потекаев А.И., Гюнтер В.Э. и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2010. – № 3. – С. 83–89.
18. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Кулагина В.В. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 10. – С. 61–67.
19. Клопотов А.А., Потекаев А.И., Гюнтер В.Э. и др. // Материаловедение. – 2010. – № 12(165). – С. 37–44.
20. Потекаев А.И., Старостенков М.Д., Кулагина В.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – № 2. – С. 41–48.
21. Инденбом В.Л. // Письма в ЖЭТФ. – 1970. – Т. 12. – С. 526–528.
22. Дранова Ж.И., Дьяченко А.М., Михайловский И.М. // Письма в ЖЭТФ. – 1971. – Т. 13. – С. 40–43.
23. Нацк В.Д., Назаренко Е.И. // Физика низких температур. – 2000. – Т. 26. – № 3. – С. 283–293.
24. Нацк В.Д., Смирнов С.Н., Назаренко Е.И. // Физика низких температур. – 2001. – Т. 27. – № 3. – С. 316–332.
25. Нацк В.Д., Смирнов С.Н., Назаренко Е.И. // Физика низких температур. – 2001. – Т. 27. – № 11. – С. 1295–1307.
26. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Полетаев Г.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2007. – № 9. Приложение. – С. 421–423.
27. Маркидонов А.В., Тихонова Т.А., Нуркенов Б.Д. и др. // Изв. Алтайского госуниверситета. Разд. Физика. – 2010. – № 1/2(65). – С. 175–178.
28. Еремеев С.В., Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2005. – № 6. – С. 82–90.
29. Царегородцев А.И., Горлов Н.В., Демьянов Б.Ф., Старостенков М.Д. // ФММ. – 1984. – Т. 58. – Вып. 2. – С. 336–343.
30. Кулагина В.В., Еремеев С.В., Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2005. – № 2. – С. 16–23.
31. Ракитин Р.Ю. Границы зерен в металлах (GB3D) // РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2009610714 от 30 января 2009.
32. Аксенов М.С., Полетаев Г.М., Ракитин Р.Ю. и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2005. – Т. 2. – № 4. – С. 24–31.
33. Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Медведев Н.Н., Тихонова Т.А. // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2010. – Вып. 1(20). – С. 249–253.
34. Мейерс М.А., Мур Л.Е. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1984. – 512 с.
35. Овчинников В.В. // УФН. – 2008. – Т. 178. – № 9. – С. 991–1001.
36. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Захаров П.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6. – № 2. – С. 8–13.
37. Эверт Г. Краткий справочник по физике. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 552 с.
38. Пушкарёв Д.И. // ЖЭТФ. – 1973. – Т. 64. – Вып. 2. – С. 634–642.

*Филиал «Кузбасский государственный технический университет»

Поступила в редакцию 14.05.11.

в г. Новокузнецке, г. Новокузнецк, Россия

**Алтайский государственный технический университет

им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

***Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова

Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия

****Бийский педагогический государственный университет им. В.М. Шукшина, г. Бийск, Россия

*****Кузбасская государственная педагогическая академия, г. Новокузнецк, Россия

E-mail: markidonov_artem@mail.ru; genphys@mail.ru

Маркидонов Артем Владимирович, к.ф.-м.н., ст. преподаватель;
Старостенков Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. общей физики;
Потекаев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, директор;
Медведев Николай Николаевич, к.ф.-м.н., доцент;
Неверова Татьяна Ивановна, к.ф.-м.н., ст. преподаватель;
Барчук Алексей Андреевич, аспирант;
Кулагина Валентина Васильевна, к.ф.-м.н., доцент, ст. науч. сотр.