

М.И.Слободской, Л.Е.Попов

Томский государственный архитектурно-строительный университет

НАЧАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ДИСЛОКАЦИОННОГО ИСТОЧНИКА ВО ВТОРОМ ЦИКЛЕ ДЕЙСТВИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

Abstract

The methods of simulation modeling determine dependence of the value of dynamic localization of slip, bound with activity of one source, from length of a source and mechanism of his action. Observed in substantial tracks of slip the dispersion of localization of crystallographic slip communicates with considerable dispersion of the geometrical characteristics of the retrieved sources.

Введение

В [1, 2] имитирован процесс действия дислокационного источника в поле препятствий дислокационной природы и отмечено, что в 73,6% проведенных экспериментов движение дислокации-источника после прохождения ею конфигурации потери устойчивости приводит к самопересечению конфигурации с отделением замкнутой расширяющейся планарной дислокационной петли, восстановлению источника и началу второго цикла его действия. Отделение первой петли от дислокации - источника и восстановление источника происходят одновременно в результате одного события – аннигиляции движущихся навстречу друг другу участков первой замкнутой дислокации, имеющих противоположное направление дислокационной оси.

В момент восстановления дислокация-источник обладает некоторой кинетической энергией, приобретенной в первом цикле действия источника. Кроме того, дислокация приобретает дополнительную кинетическую энергию в процессе ее перехода из начальной конфигурации (соответствующей моменту восстановления) в конфигурацию потери устойчивости. Это одна из главных причин локализации кристаллографического скольжения (вслед за испусканием первой замкнутой дислокации источник испускает «по инерции» еще несколько петель), чему и посвящена настоящая работа.

Модель

Модель и ее алгоритмизации для имитации зарождения и распространения элементарного кристаллографического сдвига в плоскости, содержащей случайно расположенные препятствия с дискретным набором прочностей, описана в [3]. Ряд эффектов, сопровождающих распространение элементарного кристаллографического скольжения, обнаруженных в этой модели, рассмотрен в [2, 4-6]. Здесь же анализируются конфигурации восстановленных источников.

Геометрические характеристики восстановленных источников

Величина динамической локализации скольжения в значительной мере определяется "геометрией" конфигураций потери устойчивости источника в первом цикле его действия и дислокации-источника второго цикла в его начальной конфигурации. Геометрические характеристики конфигураций потери устойчивости сегментом-источником и соответствующие критические конфигурации приведены в [2], поэтому остановимся на втором вопросе.

Имитация действия источника в поле препятствий дислокационной природы позволяет выделить момент замыкания дислокационной конфигурации и, тем самым, момент восстановления дислокационного источника. Всё наблюдаемое в ЭВМ-экспериментах многообразие восстановленных конфигураций дислокационных источников укладывается в три группы (рис. 1) конфигураций, оставшихся после замыкания сегмента-источника в дислокационную петлю: 1) по классическому механизму; 2) по спиральному механизму и расположенных в среднем ниже точек закрепления источника; 3) расположенных в среднем выше точек закрепления сегмента-источника.

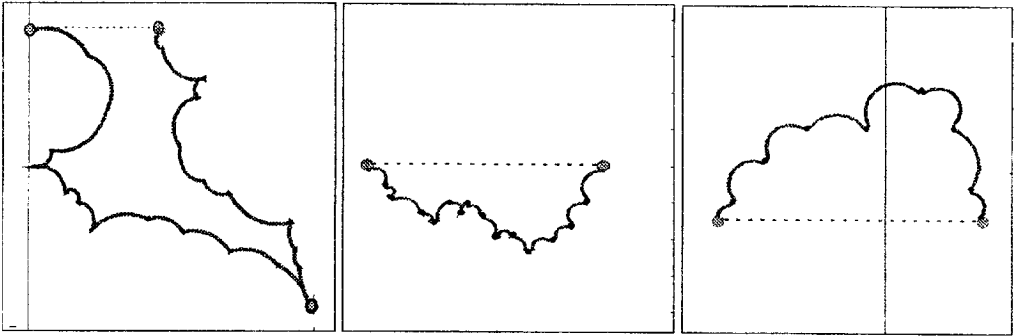


Рис. 1. К классификации начальных конфигураций дислокаций-источников при их повторном старте

Результаты моделирования показывают, что конфигурации дислокаций-источников во втором цикле действия и, следовательно, их периметры и площади варьируются в весьма широких пределах. Периметр дислокации-источника во втором цикле действия может превышать длину первоначального сегмента-источника более чем в 130 раз, периметр критической конфигурации - в 84 раза и периметр конфигурации потери устойчивости источника - в 71 раз. Периметры восстановленных источников тесно связаны с площадями, между положениями дислокаций-источников в первом и во втором циклах действия. Но есть одна особенность. При подсчете кинетической энергии дислокационной конфигурации важно, как относительно сегмента-источника расположена дислокационная конфигурация: выше или ниже. Поэтому подсчет указанных площадей проводится в системе координат с осью абсцисс, направленной по сегменту - источнику (не важно, в какую сторону), а ось ординат - перпендикулярно вниз. При таком выборе системы координат знак "минус" у площади указывает, что она расположена, в среднем, выше первоначального положения сегмента-источника.

Проведенный анализ показывает, что размеры восстановленных источников, в среднем, больше в случае, когда дислокационные конфигурации замыкаются в дислокационные петли по классическому механизму. Статистический анализ позволяет этот эмпирический факт выразить в количественной форме. Анализ корреляций рассматриваемых признаков показал, что геометрические параметры восстановленных дислокационных источников зависят от механизма образования дислокационных петель и не зависят ни от длины сегмента-источника L в первом цикле действия, ни от напряжения старта $\tau_{ст}$. Наблюдаемая значимая корреляция между площадью дислокационной петли в момент её отделения от источника и площадью между положениями источников в первом и во втором циклах действия, подсчитанная по всем проведенным экспериментам, ещё усиливается для экспериментов с классическим механизмом замыкания и становится незначимой для спирального.

Источники, сгенерировавшие дислокационные петли по спиральному механизму, после восстановления "чувствуют" длину исходного сегмента-источника (коэффициент корреляции между длинами восстановленного и исходного источников для этой группы 0,733 (значим при уровне значимости $\alpha=0,05$)). Например, для периметра с хорошей точностью эта зависимость может быть представлена в виде

$$P/L = 1,33 + 0,009L^*, \quad L^* \in [2 \div 19], \quad (1)$$

со средним значением $\langle P \rangle_{спир} \approx 1,415L$.

То есть, восстановленные дислокационные источники после отделения петель по спиральному механизму невелики: по периметру они примерно в полтора раза превышают соответствующие длины сегментов-источников в первом цикле действия, что почти совпадает с периметрами критических конфигураций ($P_{cr} = (\pi/2)L = 1,57L$) и составляет примерно 0,73 периметра конфигураций потери устойчивости

В случае классического механизма замыкания дислокационных конфигураций соответствующие показатели на порядок величины больше:

$$\langle P \rangle_{клас} \approx 13,4L, \quad \langle P/P_{mv} \rangle_{клас} \approx 7,23.$$

Зависимость превышения длины восстановленного источника по отношению к периметру конфигурации потери устойчивости сегмента-источника в первом цикле действия становится значимой и имеет вид

$$(P/P_{ny})_{клас} = 11,9 - 0,61 \cdot L^*, \quad L^* \in [2 \div 19] \quad (2)$$

вместо

$$(P/P_{ny})_{спир} = 0,99 - 0,03 \cdot L^*, \quad L^* \in [2 \div 19] \quad (3)$$

для спирального механизма. Соотношение (3) слабо зависит от длины источника и может быть переписано в виде $\langle P/P_{ny} \rangle_{спир} \approx 0,73$.

Динамическая локализация кристаллографического скольжения

Оценим величину динамической локализации скольжения в линии (зоне) скольжения, связанной с активностью единственного источника. Пусть площадь, заметаемая дислокацией-источником при переходе из его исходной конфигурации в конфигурацию потери устойчивости в первом цикле, равна ΔQ . Силы, обусловленные внешним напряжением и линейным натяжением дислокации, совершают работу против сил «сухого» (примесного, решеточного, дислокационного) трения и сил «вязкого» (фононно-электронного) трения, а также производят точечные и линейные деформационные дефекты (вакансии, межузельные атомы, дислокационные диполи вакансионной и межузельной природы). Кроме того, под действием этих сил изменяются конфигурационная (U) и кинетическая (E_k) составляющие полной энергии (E) дислокации-источника.

Полная работа, совершаемая силами Пича-Келера, обусловленными внешним напряжением (полная работа внешних сил), равна, таким образом,

$$A = A_R + A_f + A_j + \Delta U + \Delta E_k, \quad (4)$$

здесь A_j - работа, затрачиваемая на производство точечных дефектов при кристаллографическом скольжении,

A_R - работа, совершаемая против сил сухого трения,

$$A_R = \tau_R b \Delta Q, \quad (5)$$

A_f - работа против сил вязкого трения,

$$A_f = \sum_i B v_i \Delta Q_i, \quad \sum_i \Delta Q_i = \Delta Q, \quad (6)$$

ΔU и ΔE_k - изменения, соответственно, конфигурационной и кинетической энергии дислокационной конфигурации:

$$\Delta E_k = E_k^{(c)} - E_k^{(0)}, \quad (7)$$

$$\Delta U = U^{(c)} - U^{(0)}. \quad (8)$$

Верхние индексы (0) и (с) относятся, соответственно, к конфигурации дислокации-источника в момент восстановления и к конфигурации потери устойчивости источника в первом цикле действия.

Оставляя в уравнении для изменения кинетической энергии лишь силы дислокационного трения, поскольку именно эти силы учитываются в осуществляемой в настоящей работе имитации распространения элементарного кристаллографического скольжения, для изменения кинетической энергии находим

$$\Delta E_k = (\tau - \tau_R) b \Delta Q - U^{(c)} + U^{(0)}. \quad (9)$$

Поскольку сегмент-источник в начальной конфигурации второго цикла его действия обладает некоторой кинетической энергией $E_k^{(0)}$, из (9) и (7) следует

$$E_k^{(c)} = E_k^{(0)} + (\tau - \tau_R) b \Delta Q - U^{(c)} + U^{(0)}, \quad (10)$$

или

$$E_k^{(c)} = E_k^{(0)} + (\tau - \tau_R) b \Delta Q - E_0 (L^{(c)} - L^{(0)}). \quad (11)$$

Здесь E_0 - энергия покоя единицы длины дислокации, $L^{(c)}$ и $L^{(0)}$ - периметры конфигураций потери устойчивости источника в первом цикле и в момент восстановления, соответственно.

Полная кинетическая энергия дислокации-источника в процессе производства второй, третьей и последующих петель, в предположении неизменности конфигурации потери устойчивости источника в разных циклах действия, может быть представлена в виде

$$E_k^{(c,i)} = E_k^{(0)} + (\tau - \tau_R - \tau_i) b \Delta Q - E_0 (L^{(c)} - L^{(0)}), \quad (12)$$

где τ, b - сила сопротивления движению дислокаций, обусловленная обратными полями напряжений дислокаций, ранее испущенных источником.

С увеличением номера дислокации, испускаемой источником, напряжение τ_i обратного поля раннее произведённых дислокаций возрастает, при некотором n -м прохождении конфигурации потери устойчивости кинетическая энергия дислокации-источника будет равна нулю, и действие источника прекратится. Дальнейшая генерация дислокаций источником будет возможна только при повышении внешнего напряжения. Число n удовлетворяет условию

$$E_k^{(0)} + (\tau - \tau_R - \tau_i(n)) b \cdot \Delta Q + E_0 \Delta L = 0, \quad (13)$$

где $\Delta L = L^{(0)} - L^{(c)}$. Производство замкнутых дислокационных петель источником прекратится, когда напряжение обратного поля ранее испущенных дислокаций достигнет вблизи источника величины

$$\tau_i(n) = \tau - \tau_R + \frac{E_k^{(0)}}{b \Delta Q} + \frac{E_0}{b} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta Q}. \quad (14)$$

Чтобы оценить величину эффекта динамической локализации кристаллографического скольжения, связанного лишь работой сил внешнего напряжения, натяжения и динамического трения только на площадке ΔQ , предположим, что кинетическая энер-

гия сегмента-источника в момент замыкания равна нулю, $E_k^{(0)} = 0$. Тогда уравнение (14) принимает вид

$$\tau_i(n) = \tau - \tau_R + \frac{E_0}{b} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta Q} \quad (15)$$

Обратное напряжение, создаваемое скоплением дислокаций у границы скольжения, может быть представлено соотношением [7]:

$$\tau_i(n) = \frac{Gbn}{2\pi} \cdot \frac{2-\nu}{2(1-\nu)} \cdot \frac{2}{D}, \quad (16)$$

где D - диаметр области кристаллографического скольжения (зоны сдвига [8]), связанной с активностью источника, ν - коэффициент Пуассона. Из (15) и (16) следует

$$n = 2\pi \frac{1-\nu}{2-\nu} \cdot \frac{D}{Gb} \left(\tau - \tau_R + \frac{E_0}{b} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta Q} \right). \quad (17)$$

Однажды активированный дислокационный источник вслед за первой дислокацией производит в едином процессе серию замкнутых планарных расширяющихся дислокаций. Существует, следовательно, эффект локализации кристаллографического скольжения, обусловленный его дислокационно-динамическими свойствами. Такая динамическая локализация происходит при деформации скольжения во всех кристаллических материалах, то есть является неотъемлемым свойством кристаллографического скольжения. Неудивительно поэтому, что кристаллографические скольжения со значительными величинами смещения в линиях были обнаружены на многочисленных материалах самой различной природы [9-14].

Запишем выражение (17) для числа дислокаций n , производимых однажды активированным источником в виде

$$n = n_1 + n_2, \quad (18)$$

где

$$n_1 = 2\pi \left(\frac{1-\nu}{2-\nu} \right) D \cdot \frac{(\tau - \tau_R)}{Gb}, \quad (19)$$

$$n_2 = 2\pi \left(\frac{1-\nu}{2-\nu} \right) D \cdot \frac{E_0}{Gb^2} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta Q}. \quad (20)$$

Число дислокаций, произведённых источником за время его действия, считая от первой дислокации, задержанной барьерным комплексом, пропорционально диаметру D области кристаллографического скольжения. Кроме того, локализация скольжения, связанного с активностью одного источника, зависит от характеристик его конфигураций замыкания и потери устойчивости. Слагаемые в (18), представленные равенствами (19) и (20), соответствуют двум различным причинам динамической локализации скольжения. Первая из этих причин связана с конфигурацией потери устойчивости. Кристаллографическое скольжение и сопряженное с ним размножение дислокаций происходит под действием напряжения старта τ_{st} дислокационного источника, при котором была пройдена конфигурация потери устойчивости, следовательно, в (19) можно принять $\tau = \tau_{st}$ и

$$n_1 = 2\pi \left(\frac{1-\nu}{2-\nu} \right) D \cdot \frac{(\tau_c - \tau_{st})}{Gb}. \quad (21)$$

Вклад n_1 в общее число дислокаций, произведённых источником, определяется вкладом $\tau_{\mu}^{(c)}$ в напряжение прохождения конфигурации потери устойчивости, обусловленным силами линейного натяжения, которые действуют в конфигурации при кон-

кретных числе, составе и расположении находящихся с ней в контакте дискретных стопоров.

Соотношение (20) для типичных значений α и B , [16] через безразмерные площади и периметры исследуемых конфигураций принимает вид

$$n_2 \approx 100 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta L^*}{\Delta Q^*} \quad (22)$$

Оно описывает вклад в динамическую локализацию, обусловленный изменением длины дислокации-источника при ее переходе из начальной его конфигурации, возникающей при замыкании первой петли, в конфигурацию потери механической устойчивости в первом цикле действия источника. Величина этого вклада определяется "геометрией" конфигураций потери устойчивости и восстановленного источника и преимущественно зависит от исходной конфигурации источника во втором цикле. Как показали выше изложенные результаты имитационного моделирования, эта конфигурация варьирует в весьма широких пределах, что может быть одной из причин значительной дисперсии величины локализации кристаллографического сдвига в следах скольжения [14]. Вклад n_2 в динамическую локализацию кристаллографического скольжения зависит от отношения $\Delta L / \Delta Q$ и, следовательно, определяется конфигурацией дислокации-источника как в момент замыкания, так и в момент потери устойчивости. При этом доминирующим фактором является протяжённость конфигурации восстановленного источника, которая варьирует от источника к источнику в очень широких пределах и в гораздо большей степени, чем конфигурации потери устойчивости. Поэтому именно конфигурации дислокаций-источников в момент их восстановления являются основным фактором, от которого зависит вклад n_2 в динамическую локализацию скольжения. Для большинства источников, исследованных в имитационном компьютерном эксперименте, отношение $\Delta L / \Delta Q$ положительно. В этом случае силы линейного натяжения дислокации-источника при его движении на площадке ΔQ , заключенном между названными конфигурациями, вносят дополнительный вклад в динамическую локализацию кристаллографического скольжения. Однако, хотя и в редких случаях, оно может быть отрицательным, если периметр конфигурации дислокации-источника во втором цикле действия окажется меньше, чем длина конфигурации потери устойчивости первоначального сегмента-источника.

Зависимости (21) и (22) построены по результатам машинных экспериментов и приведены на рис. 2. На фрагменте *a* рисунка n_1 - вклад в динамическую локализацию за счет вклада в напряжение старта источника сил, обусловленных силами линейного натяжения в конфигурации потери устойчивости (кривая, помеченная стрелкой, - приближение континуальной модели [17], нижняя кривая - данные моделирования); *b* - n_2 - вклад в динамическую локализацию, обусловленный разницей "геометрий" конфигураций потери устойчивости и восстановленного источника; *в* - n -суммарная динамическая локализация (цифры - кратности экспериментальных точек, \circ - классический, \bullet - спиральный механизмы); *г* - зависимости n_2 / n_1 от длины сегментов-источников, действующих по классическому механизму. На рис.3 приведены распределения величины динамической локализации кристаллографического скольжения.

Обсуждение результатов

Приведенные данные показывают, что:

- 1) континуальная модель хорошо описывает вклад (n_1) в динамическую локализацию кристаллографического скольжения, обусловленную силами линейного натяжения в

конфигурации потери устойчивости сегментом-источником и совсем неудовлетворительно вклад n_2 . Причина состоит в том, что в континуальной модели конфигурация потери устойчивости и критическая конфигурация отождествляются. Такое приближение, как показывают результаты имитационного моделирования, вполне приемлемо. При подсчете же вклада за счет разницы конфигураций потери устойчивости и восстановленного источника оценки ΔL и ΔQ оказываются довольно грубыми, они не учитывают индивидуальных особенностей развития событий в отдельно взятых экспериментах;

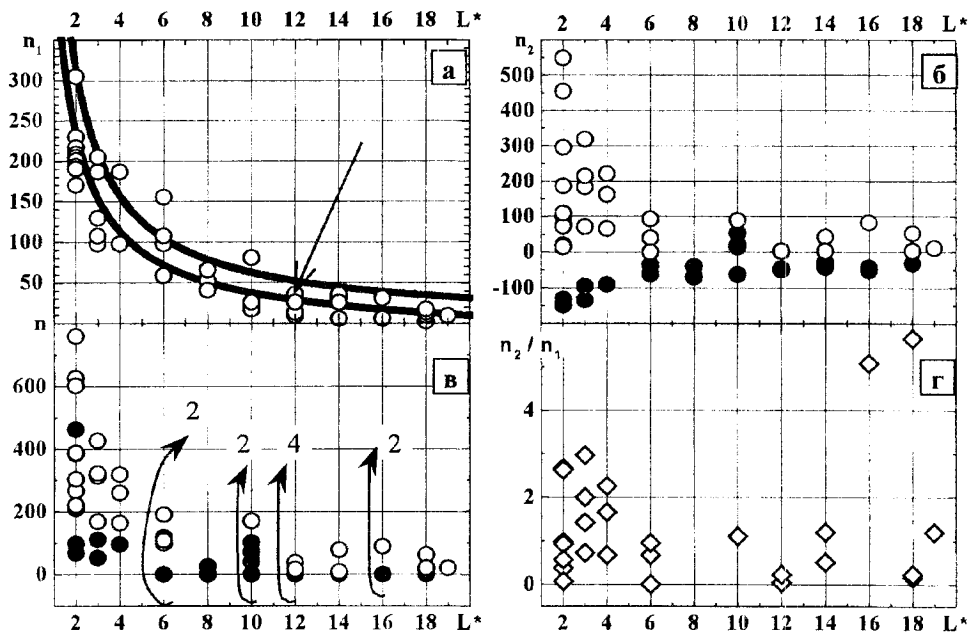


Рис. 2. К динамической локализации кристаллографического скольжения

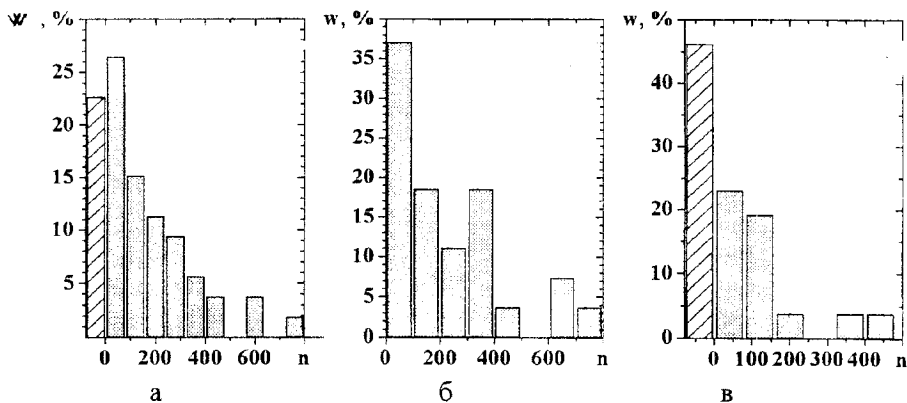


Рис. 3. Распределение величины динамической локализации кристаллографического скольжения; а - все данные, б - данные для экспериментов с классическим механизмом замыкания, в - спиральным. Столбцы с линейчатой штриховкой отвечают экспериментам, в которых не наблюдалось локализации

- 2) вклад n_1 в динамическую локализацию не "чувствует" механизма замыкания сегмента-источника в дислокационную петлю;
- 3) вклад n_2 различен для классического и спирального механизма замыканий: в последнем случае он значительно меньше, более того, ΔL (разница периметров конфигураций восстановленных источников и соответствующих конфигураций потери устойчивости) только в случае спирального механизма замыкания может быть отрицательной;
- 4) около половины источников (46,1%), действующих по спиральному механизму, не дают динамической локализации. Если учесть, что потенциально возможные сегменты-источники действуют как источники Франка-Рида в 73,6% экспериментов, а классический и спиральный механизмы примерно равновероятны [1], то динамическая локализация наблюдается немногим более чем в половине экспериментов (56,9%);
- 5) динамическая локализация довольно велика в отдельных экспериментах на коротких сегментах-источниках (преимущественно за счет n_1), значительно меньше или отсутствует для длинных источников;
- 6) учет реакции аннигиляции среди стопоров дислокационной природы в плоскости кристаллографического скольжения несколько снижает динамическую локализацию.

Разумеется, полученные величины n, n_1, n_2 , характеризующие динамическую локализацию, завышены, поскольку не полностью учтены силы торможения. Наиболее важной представляется отсутствие в модели сил торможения скользящих дислокаций, обусловленных производством при кристаллографическом скольжении деформационных точечных дефектов. Влияние этих сил на величину динамической локализации кристаллографического скольжения оценено в континуальной модели [16, 17].

Имеются многие другие факторы, способствующие локализации скольжения. Главным из этих факторов является то, что в реальном кристалле для активации источника (для производства первой замкнутой дислокации) требуется всегда приложение более высокого напряжения, чем в последующих циклах действия источника (при испускании второй и следующей замкнутых дислокаций).

Причины этого многообразны, почти все они могут быть сведены к одной общей. Потенциальный источник, как и любая дислокация, взаимодействует с атомами примесей, а в сплавах - с атомами матрицы и легирующего элемента, точечными дефектами, а также с дислокационной подсистемой. Результатами этих взаимодействий являются изменения в окрестности дислокации концентрации компонентов и расположения дислокаций, которые, в соответствии с принципом Ле Шателье, уменьшают энергию взаимодействий, вызвавших эти изменения. Конфигурационная энергия кристалла в результате изменений его структуры, индуцированных присутствием дислокации (включая и дислокацию - источник), уменьшается. Конфигурационная энергия покоящегося потенциального источника ниже, чем энергия действующего сегмента-источника, следовательно, при старте источника внешнее напряжение должно совершить некоторую работу, затрачиваемую на увеличение конфигурационной энергии источника, связанное со стартом. В отсутствие дислокации-источника, изменения атомной и дислокационной конфигурации кристалла становятся энергетически невыгодными. Протекают обратные процессы, поэтому для последующих прохождений дислокацией-источником конфигурации покоя достаточны напряжения, меньшие, чем напряжение старта.

Конфигурационные изменения в окрестности дислокации в реальных кристаллографических материалах имеют разную природу. Это могут быть сегрегации Коттрелла,

Судзуки, изменения в поле искажений дислокации ближнего и дальнего атомного порядка, смещения дислокаций, приводящие к образованию дипольных, квазидипольных конфигураций, к дислокационным реакциям, а также встраиванию потенциального источника в конфигурации типа "стенки". Все эти и подобные им механизмы влияют на величину локализации кристаллографического скольжения, в разной степени увеличивая её. Но во всех кристаллических материалах, независимо от их чистоты и степени совершенства, имеет место динамическая локализация, которая является фундаментальным свойством кристаллографического скольжения.

Библиографический список

1. Слободской М.И., Попов Л.Е. Классификация механизмов замыкания и незамыкания потенциального сегмента-источника в дислокационную петлю // Математ. моделир. систем и проц. - 1998. - №6. - С. 110-118.
2. Слободской М.И., Попов Л.Е. Особенности работы источника Франка-Рида в поле случайно расположенных препятствий // Известия АН. Сер. Физ. - 1998. - Т. 62. - №7. - С. 1339-1344.
3. Слободской М.И., Матюшенко А.В., Голосова Т.Н. Алгоритмизация имитации образования дислокационной петли источником и процесса ее эволюции в плоскости кристаллографического скольжения со случайно распределенными дискретными препятствиями // Математ. моделир. систем и проц. - 1995. - №3. - С. 88-96.
4. Голосова Т.Н., Слободской М.И., Попов Л.Е. Моделирование источника дислокаций в поле активируемых и неактивируемых дискретных препятствий // Изв. вузов. Физика. - 1992. - №10. - С. 20-24.
5. Слободской М.И., Матюшенко А.В. Эволюция дислокационной петли от источника в поле случайно расположенных препятствий с дискретным спектром прочностей // Изв. вузов. Физика. - 1997. - №7. - С. 113-118.
6. Слободской М.И., Попов Л.Е. Генерация и эволюция вогнутых дислокационных петель в процессе распространения элементарного кристаллографического скольжения // Математ. моделир. систем и проц. - 1999. - №7. - С. 75-85.
7. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций: Пер с англ. М.: Атомиздат, 1972. - 600 с.
8. Попов Л.Е., Конева Н.А., Терешко И.В. Деформационное упрочнение упорядоченных сплавов. М.: Металлургия, 1972. - 256 с.
9. Seeger A. The generation of lattice defect by moving dislocations and its application to the temperature dependence of the flow-stress of F.C.C. crystals // Phil. Mag. - 1955. - Vol. 46. - №382. - P. 1194-1217.
10. Seeger A., Diehl J., Mader S., Rebstock H. Workhardening and Work Softening of Face Centered Cubic Metal Crystals // Phil. Mag. - 1957. - Vol. 2. - №15. P. 323-350.
11. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1972. - 402 с.
12. Ebeling R., Ashby M. F. Dispersion hardening of copper single crystals // Phil. Mag. - 1966. Vol. - 13. - №. 124. - P. 805-834.
13. Mader S., Seeger A. Untersuchung des Gleitlinienbilds kubischflachen zentrierten Reinkristalle // Acta Met. - 1960. - Vol. 8. - № 4. - P. 513-522.
14. Steeds J.W. Dislocation arrangement in copper single crystals as function of strain // Proc. Roy. Soc. - A292. - 1966. - P. 343-373.
15. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. - М.: Металлургия. - 1984. - 182 с.
16. Колупаева С.Н., Старенченко В.А., Попов Л.Е. Неустойчивости пластической деформации кристаллов. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. - 301 с.

17. Вихорь Н.А. Математическое моделирование дислокационной подсистемы деформируемых ГЦК кристаллов: Автореф. диссертации канд. физ.-мат. наук. - Томск, 1997. - 23 с.

Получено 10.04.2000