

© 2011 Т. П. Диденко, П. А. Селищев

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ПОЛЗУЧЕСТИ, ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ И ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ С УЧЕТОМ ГЕНЕРАЦИИ ВАКАНСИЙ СКОЛЬЗЯЩИМИ ДИСЛОКАЦИЯМИ

В рамках модели скольжения дислокаций, лимитированного их переползанием, исследовано изменение концентрации точечных дефектов и плотности дислокаций в материалах под облучением. Учтено, что при скольжении дислокации генерируются вакансии. Показано, что возможно существование нескольких установившихся режимов (от одного до трех в зависимости от условий облучения), исследована их устойчивость, построена диаграмма состояний и соответствующие фазовые портреты.

Ключевые слова: дислокации, ползучесть, облучение, точечные дефекты, вакансии.

Введение

В ходе пластической деформации происходят существенные изменения механических свойств материала, обусловленных взаимодействием дислокаций между собой и с другими дефектами решетки. При деформации материала под облучением протекает несколько конкурирующих процессов: возрастает плотность дислокаций; увеличивается число стопоров дислокаций, а с другой стороны, растет количество точечных дефектов, которые способствуют преодолению стопоров. Все эти процессы взаимосвязаны и нелинейны.

Известно, что скользящая дислокация способна генерировать точечные дефекты. Наиболее подробно описан механизм образования точечных дефектов при движении винтовых дислокаций со ступеньками [1]. Согласно [2, 3] ступенька при своем движении образует непрерывную цепочку дефектов (либо междоузельных атомов, либо вакансий), которая может прерываться только в тех случаях, когда ступенька сдвигается вдоль винтовой дислокации консервативно, например при огибании закрепленного квазиодномерного дефекта. Наиболее вероятным источником точечных дефектов являются единичные ступеньки 30- и 60-градусной дислокаций, и если для определенности ограничиться случаем вакансий, то при этом на каждый элементарный акт переползания будет образовываться по две пары вакансий.

В связи с этим представляет интерес влияние процесса образования вакансий на ползучесть облученных материалов, а также на динамику изменения плотности точечных дефектов и дислокаций.

Физическая модель и постановка задачи

Рассмотренная модель применима для образцов с невысокой плотностью дислокаций, кото-

рые находятся под действием нейтронного облучения и приложенных напряжений порядка 20 - 300 МПа, что соответствует экспериментам В. С. Карасева и других авторов [4 - 6]. В этих условиях ползучесть обеспечивается, главным образом, за счет механизма «скольжения - переползания» дислокаций и их генерацией, процессы размножения дислокаций на дислокациях вторичных систем скольжения и аннигиляция винтовых дислокаций отсутствуют, а разрушение краевых диполей подвижными дислокациями незначительно [7]. В модели учтено поглощение точечных дефектов движущимися дислокациями, которое наблюдается на эксперименте [8] для образцов с невысокой плотностью дислокаций, способных при скольжении проходить значительные расстояния.

При низких скоростях генерации дефектов (порядка 10^{-12} - 10^{-8} сна/с, что соответствует потокам нейтронов 10^{15} - 10^{17} нейтрон \cdot м⁻² \cdot с⁻¹ [4]) генерируются в основном пары Френкеля, а генерация каскадов и дислокационных петель в каскадах не происходит. Также предполагается, что облучение происходит при достаточно высоких температурах, при которых аннигиляцией точечных дефектов можно пренебречь.

Предполагалось, что под действием приложенного напряжения происходит генерация дислокаций, а уменьшение плотности дислокаций происходит за счет их выхода на поверхность зерна. Генерация дислокаций может быть обеспечена, например, источниками Франка - Рида или другими механизмами, которые в настоящей работе детально не рассматриваются. Учтено, что в процессе скольжения дислокаций может происходить генерация вакансий [1].

Зависимость скорости генерации дислокаций от приложенного напряжения может быть установлена следующим образом. Поскольку пластическая деформация непосредственно связана с

движением дислокаций, то для описания этого явления необходимо детальное рассмотрение развития дислокационной структуры облучаемых материалов в зависимости от условий облучения. Например, известно [9], что на кривой зависимости скорости радиационной ползучести от дозы облучения можно условно выделить три стадии: переходную, стационарную и ускоренной ползучести. При невысоких напряжениях стадия разрушения, как правило, не наступает, поэтому ограничимся рассмотрением первых двух.

Сразу после начала облучения в материале зарождаются и растут дислокационные петли. Рост этих петель и отжиг части линейных дислокаций приводит в итоге к установлению примерно постоянной плотности дислокаций на уровне $3 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ при дозе $< 20 \text{ сна}$ [10].

Таким образом, сопоставление микроструктурных данных с экспериментальными дозовыми зависимостями радиационной ползучести позволяет считать, что для описания переходной стадии радиационной ползучести необходимо рассматривать движение линейных дислокаций и рост дислокационных петель, а для установившейся стадии – эволюцию системы линейных дислокаций.

Рассмотрим зависимость скорости ползучести и скорости генерации дислокаций от приложенной нагрузки.

Задача решается в рамках модели «скольжения – переползания». Согласно этой модели, ползучесть материала обеспечивается скольжением дислокаций, которое ограничивается существующими в кристалле препятствиями. Препятствия имеют конечные размеры: трехмерные кластеры, атомы примеси и т.п. Дислокация переползает за счет поглощения вакансий и междоузельных атомов, благодаря чему переходит в другую плоскость скольжения, проходящую над или под препятствием, где продолжает скольжение. Поэтому скорость ползучести, пропорциональная средней скорости движения дислокаций, будет пропорциональна разности потоков на дислокацию вакансий и междоузельных атомов. А поскольку не имеет значения, каким образом преодолевается стопор - наращиванием или растворением экстраплоскости, то скорость ползучести оказывается пропорциональной модулю разности потоков на дислокацию вакансий и междоузельных атомов [11].

На стадии установившейся ползучести, когда плотность дислокаций ρ_d и средняя скорость их движения u остается постоянной, скорость генерации дислокаций k равна скорости их выхода

на поверхность кристалла $k = \frac{u\rho_d}{R}$. Стационарное значение скорости ползучести принимает значение

$$\dot{\epsilon}^{st} = kbR, \quad (1)$$

где R – размер зерна материала; b - вектор Бюргера.

С другой стороны, согласно теории Виртмана [9], скорость установившейся ползучести при малых напряжениях описывается выражением

$$\dot{\epsilon}^{st} = A \frac{D_L}{b^{3,5} M_u^{0,5}} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^{4,5} \frac{Gb^3}{k_0 T}, \quad (2)$$

где A – безразмерная величина ($A \approx 0,25$ [12]); M_u – число источников в единице объема ($M_u = \rho_d$ – каждый источник испускает одну дислокационную петлю); D_L – коэффициент объемной диффузии; G – модуль сдвига; σ – приложенное напряжение; k_0 – постоянная Больцмана; T – температура.

Однако в данном случае не принимается во внимание зависимость плотности дислокационных источников от напряжения.

Если [9]

$$M_u \approx \left(\frac{\sigma}{Gb} \right)^3, \quad (3)$$

то, подставляя выражение (3) в (2), получим

$$\dot{\epsilon}^{st} = A \frac{D_L}{b^2} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^3 \frac{Gb^3}{k_0 T}. \quad (4)$$

Приравнявая выражения (1) и (4), находим зависимость стационарной скорости генерации дислокаций от напряжения

$$k = \frac{AD_L \sigma^3}{G^2 k_0 TR}. \quad (5)$$

Оценивая связь приложенного напряжения со скоростью генерации дислокаций для образца с параметрами меди ($D_L = 2,9 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $G = 44,7 \text{ ГПа}$, $T = 600 \text{ К}$), видим, что приложенному напряжению $\sigma = 210 \text{ МПа}$ соответствует скорость генерации дислокаций, равная $k = 20 \cdot 10^5 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а, например, величине $\sigma = 240 \text{ МПа}$ - $k = 30 \cdot 10^5 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и т.д.

Основные уравнения

Скорость ползучести материала под облучением описывается выражением [13]

$$\dot{\varepsilon} = \eta \rho_d |z_d D_i n_i - D_v n_v|, \quad (6)$$

где n_i , n_v – концентрации междоузельных атомов и вакансий; $D_i = D_i^0 \exp(-E_i^m / k_0 T)$; $D_v = D_v^0 \exp(-E_v^m / k_0 T)$ – коэффициенты диффузии междоузельных атомов и вакансий; E_m^i и E_m^v – соответствующие энергии миграции; z_d – фактор предпочтительного поглощения междоузельных атомов дислокациями. Параметр η можно представить в виде $\eta = L(\sigma) / l$ [11], где l – средний размер препятствующего скольжению стопора; L – средняя длина скольжения дислокаций, являющаяся функцией приложенного напряжения.

Скорость ползучести зависит от концентрации радиационных дефектов и плотности дислокаций. Концентрация междоузельных атомов возрастает за счет их генерации облучением и убывает в результате поглощения дислокациями и другими стоками. Концентрация вакансий возрастает вследствие как радиационного воздействия, так и скольжения дислокаций.

Плотность дислокаций растет благодаря их рождению под действием приложенного напряжения и уменьшается в результате выхода дислокаций на границы зерен.

Тогда изменение концентрации точечных дефектов и плотности дислокаций описывается уравнениями

$$\frac{dn_i}{dt} = K - D_i n_i (z_d \rho_d + z_k \rho_k), \quad (7)$$

$$\frac{dn_v}{dt} = K - (\rho_d + \rho_k) D_v (n_v - n_v^e) + \beta \rho_d u, \quad (8)$$

$$\frac{d\rho_d}{dt} = k - \frac{u \rho_d}{R}. \quad (9)$$

Здесь K – скорость создания дефектов внешним облучением; n_v^e – равновесная концентрация термических вакансий; ρ_k – плотность остальных недислокационных стоков точечных дефектов; z_k – фактор предпочтительного поглощения междоузельных атомов недислокационными стоками; $\beta = N_{cm} N_{вак}$, N_{cm} – линейная плотность ступенек на дислокациях; $N_{вак}$ – вклад в среднюю объемную плотность вакансий каждой ступенькой на дислокации.

Скорость генерации дефектов скользящей дислокацией и скорость ухода дислокаций на границы зерен пропорциональны средней скорости движения дислокаций, которая имеет вид

$$u = \frac{a_0^2 L}{l} |(z_d D_i n_i - D_v n_v)|, \quad (10)$$

где a_0 – период кристаллической решетки.

Подставляя выражение (10) в (8) - (9), учитывая, что изменение концентрации междоузельных атомов происходит намного быстрее изменения плотности дислокаций и вакансий и выполняются условия теоремы Тихонова [14], т.е. что можно положить $dn_i / dt \equiv 0$, вместо трех дифференциальных уравнений получаем систему двух дифференциальных и одного алгебраического уравнений. Выражая из полученного алгебраического уравнения n_i и подставляя в формулы (8) - (9), получаем замкнутую систему двух дифференциальных уравнений. С учетом замены переменных $x = \rho_k D_v n_v$ и $y = \rho_d / \rho_k$ она принимает вид

$$\frac{dx}{dt} = K - (y+1)(x - x^e) + \mu y \left| \frac{\xi K}{\xi y + 1} - x \right|, \quad (11)$$

$$\varepsilon \frac{dy}{dt} = k - \nu y \left| \frac{\xi K}{\xi y + 1} - x \right|, \quad (12)$$

где

$$\xi = z_d / z_k; \quad x^e = \rho_k D_v n_v^e;$$

$$\nu = \frac{a_0^2 L}{l R}; \quad \mu = \frac{\beta a_0^2 L}{l};$$

$$\varepsilon = \rho_k^2 D_v$$

Фазовые портреты

Динамика изменения плотности дислокаций и концентрации вакансий описывается фазовым портретом. Фазовый портрет описывает всю совокупность возможных изменений переменных x и y системы, отвечающих различным начальным условиям. В зависимости от значений параметров системы (11) - (12) (условий облучения и свойств образца) фазовые портреты меняются. Качественное отличие фазовых портретов определяется количеством стационарных состояний и устойчивостью.

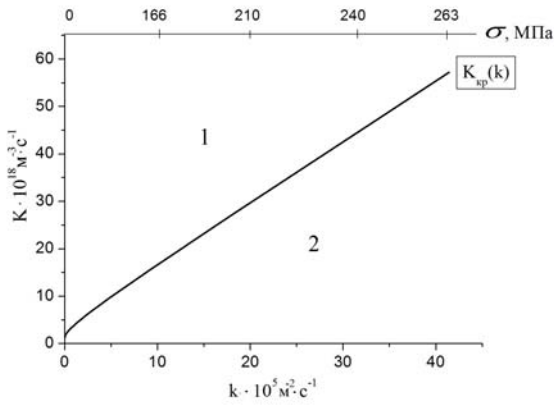


Рис. 1. Диаграмма состояний: разбиение пространства управляющих параметров K и k на область существования трех стационарных решений (область 1) и область параметров, для которых существует один стационарный режим (область 2). Теоретические расчеты произведены для материала со следующими параметрами: $z_d = 1,08$, $z_k = 1$, $\rho_k = 2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$, $a_0 = 0,414 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $L(\sigma)/l = 50$, $D_0 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $E_m^v = 1,4 \text{ эВ}$, $T = 700 \text{ К}$, $R = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $N_{cm} = 2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$, $N_{vac} = 0,5 \cdot 10^9$.

$$K_{sp}(k) = \frac{-3v\xi x^e y^2 - 2[vx^e(1+\xi) + k\xi(\mu+1)]y - vx^e - k(\mu+1+\xi)}{-v(\xi-1)}. \quad (13)$$

На этой кривой существует два стационарных решения.

Важное значение на фазовом портрете имеют точки, для которых скорость ползучести равна нулю. Множество этих точек в координатах x, y описывается функцией

$$x = x_0^e(y) = \frac{\xi K}{\xi y + 1}. \quad (14)$$

Гипербола (14) пересекает ось x в точке $x = \xi K$, на рис. 3 - 5 она изображена пунктиром. В момент пересечения фазовой траекторией этой кривой скорость ползучести равна нулю, в остальных точках фазового пространства она больше нуля.

При построении фазового портрета особую роль играют главные изоклины, на пересечении которых находятся стационарные точки [6].

Главная изоклина 1, на которой $\frac{dy}{dx} = \infty$, задается кривой $x_1(y)$ и определяется из условия

$$K - (y+1)(x - x^e) + \mu y \left| \frac{\xi K}{\xi y + 1} - x \right| = 0. \quad (15)$$

Система (11) - (12) в зависимости от значения параметров может иметь одно, два или три стационарных решения. Разбиение пространства управляющих параметров (K и k) на области, соответствующие одному, двум и трем стационарным решениям, образуют диаграмму состояния (рис. 1).

Для значений параметров из области 1, которая находится выше бифуркационной кривой, существует три стационарных решения: $y_1 > y_2 > y_3$. Одно из них y_2 является неустойчивым, его топологический тип – «седло», два других – устойчивые «узлы». Ниже кривой $K_{sp}(k)$ (область 2) существует единственное стационарное решение, его топологический тип – устойчивый «узел». Области существования одного и трех стационарных решений разделяет бифуркационная кривая $K_{sp}(k)$, которая имеет вид

В зависимости от значений параметров, она может быть представлена комбинациями различных частей двух ветвей:

а) при $x < x_0^e$

$$x_1^a(y) = \frac{K + (y+1)x^e}{(\mu+1)y+1} + \frac{\mu y K \xi}{((\mu+1)y+1)(\xi y+1)}; \quad (16)$$

б) при $x > x_0^e$

$$x_1^b(y) = \frac{K + (y+1)x^e}{(1-\mu)y+1} - \frac{\mu y K \xi}{((1-\mu)y+1)(\xi y+1)}. \quad (17)$$

Рассмотрим все возможные виды главной изоклины x_1 :

1) при $\xi \leq 1$ и $\mu \leq 1$ главная изоклина x_1 для всех положительных значений аргумента представлена ветвью б) ($x_1 = x_1^b(y)$);

2) при $\xi \leq 1$ и $\mu > 1$: $x_1 = x_1^b(y)$ для $0 < y < \frac{1}{\mu-1}$;

3) если $\xi > 1$, $\mu \leq 1$, $K < \frac{x^e}{\xi-1}$, то $x_1 = x_1^b(y)$;

4) в случае, когда $\xi > 1$, $\mu \leq 1$ и $K > \frac{x^e}{\xi - 1}$, существуют обе ветви x_I : ветвь $x_I = x_I^a(y)$ в области, где $0 < y < y_+$, а ветвь $x_I = x_I^b(y)$ в области, где $y > y_+$;

5) при $\xi > 1$, $\mu > 1$, $K < \frac{x^e}{\xi - 1}$ главная изоклина имеет вид $x_I = x_I^b(y)$ и $0 < y < \frac{1}{\mu - 1}$;

6) для $\xi > 1$, $\mu > 1$ и $K > \frac{x^e}{\xi - 1}$ главная изоклина x_I имеет две ветви: $x_I = x_I^a(y)$ для $0 < y < y_+$ и $x_I = x_I^b(y)$ для

$$\min\left(y_+, \frac{1}{\mu - 1}\right) < y < \max\left(y_+, \frac{1}{\mu - 1}\right).$$

Здесь y_+ – точка пересечения главной изоклины x_I с кривой $x_0^e(y)$ (скорость ползучести в этой точке равна нулю)

$$y_+ = \frac{-(\xi + 1)x^e + \sqrt{(\xi + 1)^2 x^{e2} - 4\xi x^e (x^e - K(\xi - 1))}}{2x^e \xi}. \quad (18)$$

На рис. 2 показан вид главной изоклины x_I для случая 6) для разного положения y_+ по отношению к $\frac{1}{\mu - 1}$.

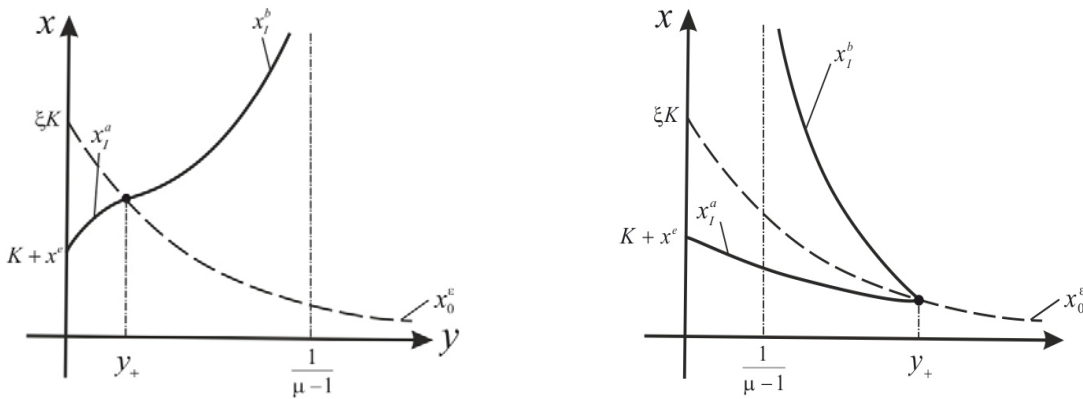


Рис. 2. Вид главной изоклины x_I для случая 6): $\xi > 1$, $\mu > 1$, $K > \frac{x^e}{\xi - 1}$.

Пунктирную линию образуют состояния, для которых скорость ползучести равна нулю.

Главная изоклина 2, на которой $\frac{dy}{dx} = 0$, задается кривой $x_{II}(y)$ и определяется из условия

$$k - \nu y \left| \frac{\xi K}{\xi y + 1} - x \right| = 0, \quad (19)$$

она также имеет две ветви:

а) при $x < x_0^e$

$$x_{II}^a(y) = \frac{\xi K}{\xi y + 1} - \frac{k}{\nu y}, \quad (20)$$

$x_{II}^a > 0$, если $y > \frac{k}{\xi(\nu K - k)}$, $\nu K > k$;

б) при $x > x_0^e$

$$x_{II}^b(y) = \frac{\xi K}{\xi y + 1} + \frac{k}{\nu y}. \quad (21)$$

В зависимости от параметров x_I и x_{II} могут или пересекаться, или не пересекаться. Касание главных изоклин соответствует бифуркационному условию, при этом $K = K_{кр}(k)$.

Поскольку физически допустимые значения переменных лежат в области, где $x > 0$, $y > 0$, ограничимся рассмотрением только этой части фазового пространства.

Для параметров из области 2 диаграммы состояний фазовый портрет приведен на рис. 3; все фазовые траектории стремятся к единственному стационарному режиму, скорость ползучести в котором не равна нулю. Однако при стремлении к стационарному состоянию для некоторых начальных состояний скорость ползучести может принимать нулевое значение.

При реализации трех стационарных состояний (область 1 диаграммы состояния, соответствующий фазовый портрет приведен на рис. 4), два из которых устойчивы, часть фазовых траекторий эволюционируют к одному устойчивому

стационарному состоянию, а часть к другому, образуя, таким образом, их области притяжения. В этом случае скорость ползучести также в определенный момент может стать равной нулю.

Переходя через бифуркационную кривую из области 1 в область 2, меньшее устойчивое значение («узел») y_3 сливается с неустойчивым «седлом» y_2 , образуя сложную стационарную точку «седло - узел» (рис. 5). Большее стационарное значение y_1 (устойчивый «узел») остается без изменений.

Обсуждение результатов

Движение точки по фазовой траектории отображает эволюцию системы (параметров состояния x, y) от какого-то конкретного ее начального состояния, т. е. изменение концентрации вакансий, плотности дислокаций и скорости ползучести со временем.

Рассмотрим фазовый портрет, который отображает динамику системы с одним стационарным состоянием (рис. 3), и проанализируем, как будет меняться концентрация вакансий, плотность дислокаций (и, соответственно, скорость ползучести) в зависимости от их начальных значений. Увеличить начальную концентрацию вакансий можно, например предварительным облучением.

Если начальная концентрация вакансий мала, то концентрация вакансий возрастает, достигает

максимального значения и убывает к своему стационарному значению. Скорость ползучести сначала уменьшается, достигает минимального значения равного нулю (причем минимум скорости ползучести достигается раньше, чем максимум концентрации вакансий), после чего возрастает до стационарного значения. Плотность дислокаций монотонно возрастает до своего стационарного значения при малых ее начальных значениях, при больших начальных значениях временная зависимость плотности дислокаций меняется: сначала она уменьшается, достигает минимума, затем растет до стационарного значения. Минимум достигается до момента, когда скорость ползучести станет равной нулю, а максимум – после этого момента.

С возрастанием начальной концентрации вакансий до значений меньших, чем их значение на изоклине $x_1^b(y)$, временные зависимости изменения концентрации вакансий, плотности дислокаций и скорости ползучести останутся те же, но будут начинаться в более поздний момент времени, т. е. будут описываться теми же фазовыми траекториями со сдвинутыми по ним начальными значениями. Например, скорость ползучести может не достигать нулевого значения, а монотонно возрастать до своего стационарного значения. Временная зависимость плотности дислокаций может не иметь минимума или минимума и максимума и т.д.

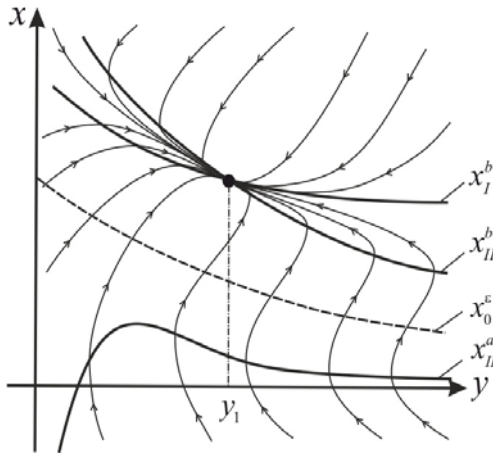


Рис. 3. Фазовый портрет для значений параметров внутри области 2 диаграммы состояния. Сплошными жирными линиями обозначены главные изоклины. Пунктирную кривую образуют состояния, для которых скорость ползучести равна нулю. $\mu \leq 1$.

Для начальных концентраций вакансий, больших, чем на главной изоклине $x_1^b(y)$, концентрация вакансий монотонно уменьшается до

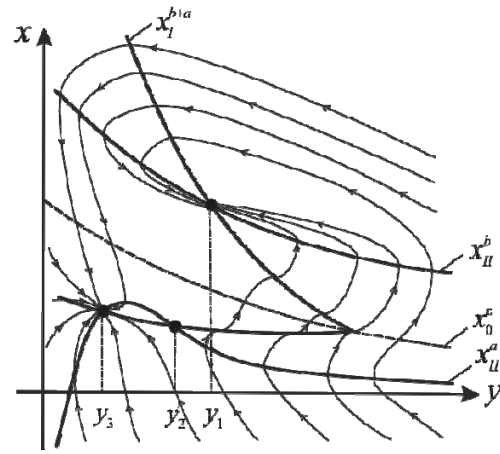


Рис. 4. Фазовый портрет для значений параметров внутри области 1 диаграммы состояния. Сплошными жирными линиями обозначены главные изоклины. Пунктирную кривую образуют состояния, для которых скорость ползучести равна нулю. $\mu > 1$.

своего стационарного значения, а плотность дислокаций стремится к своему стационарному значению либо монотонно, либо проходя через ми-

нимум. Скорость ползучести уменьшается до своего стационарного значения, но остается положительной и нулевое значение не принимает.

Рассмотрим фазовый портрет, который отображает динамику изменения концентрации вакансий, плотности дислокаций и скорости ползучести с тремя стационарными состояниями (рис. 4).

Если в начальный момент времени концентрация вакансий мала, то при малых значениях плотностей дислокаций она стремится к своему меньшему стационарному значению, плотность дислокаций стремится к своему меньшему стационарному значению либо проходя через максимум (для малых начальных значений плотности дислокаций), либо монотонно убывая. Скорость ползучести монотонно убывает до своего стационарного значения. При больших начальных плотностях дислокаций концентрация вакансий и плотность дислокаций стремятся к своим большим стационарным значениям, динамика изменения концентраций вакансий, плотности дислокаций и скорости ползучести для случаев с тремя и с одним стационарными состояниями качественно подобны. Скорость ползучести стремится к соответствующему этому стационарному состоянию значению, проходя через равный нулю минимум.

Для больших начальных концентраций вакансий и плотностей дислокаций возможны два пути эволюции. Для меньших начальных концентраций вакансий концентрация вакансий (проходя через максимум) и плотность дислокаций (проходя через минимум или минимум и максимум) стремятся к своим меньшим стационарным значениям, скорость ползучести стремится к значению, соответствующему этому стационарному состоянию, проходя через равное нулю минимальное значение.

При стремлении параметров к своим бифуркационным значениям стационарные значения y_2 («седло») и y_3 (устойчивый «узел») сближаются и совпадают в неустойчивый «седло - узел» (рис. 5).

Все фазовые траектории, приходящие в «седло - узел», совпадают в ней в выходящую сепаратрису, т. е. эволюция системы для различных начальных условий после прохождения особой точки «седло - узел» тождественны.

Система «забывает» о своей предыстории после прохождения «седла - узла». При малом изменении бифуркационного параметра сепаратриса особой точки «седло - узел» распадается на бесконечное число близко лежащих фазовых траекторий.

Поэтому физически наблюдаемая динамика изменения системы при бифуркационных значе-

ниях параметров практически идентична случаю отсутствия стационарных решений.

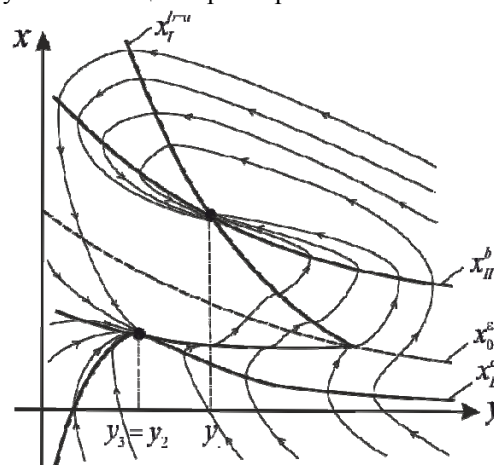


Рис. 5. Фазовый портрет для значений параметров на бифуркационной кривой диаграммы состояний. Сплошными жирными линиями обозначены главные изоклины. Пунктирную кривую образуют состояния, для которых скорость ползучести равна нулю. $\mu > 1$.

Рассмотрим, как влияет на изменение концентрации вакансий, плотности дислокаций и скорости ползучести интенсивность генерации вакансий скользящими дислокациями (изменение параметра μ). С увеличением параметра μ стационарные концентрации точечных дефектов для обоих устойчивых решений возрастают, стационарные значения плотности дислокаций — уменьшаются. Скорость ползучести в зависимости от значений остальных параметров может как увеличиться, так и уменьшиться.

Поведение фазовых траекторий в области малых концентраций вакансий с изменением μ качественно не меняется. Поведение фазовых траекторий в области высоких концентраций вакансий (выше пунктирной кривой x_0^e) существенно зависит от значений μ (см. рис. 3, 4 и 5). При малых значениях μ (см. рис. 3) концентрация вакансий монотонно убывает к своему большему стационарному значению, плотность дислокаций убывает до своего стационарного значения либо монотонно, либо проходя через максимальное значение. Скорость ползучести уменьшается до своего соответствующего стационарного значения. В области больших концентраций вакансий все фазовые траектории практически параллельны друг другу.

При больших значениях μ концентрация вакансий нарастает до своего максимума, а потом убывает до своего большего стационарного значения. Плотность дислокаций уменьшается, достигает минимума и возрастает до своего больше-

го стационарного значения. Скорость ползучести сначала возрастает, достигает максимального значения, а затем убывает до соответствующего стационарного значения.

Полученные результаты позволяют объяснить характерные особенности зависимости скорости ползучести от условий облучения и свойств материала. Из наших результатов следует, что вследствие конкурирующего влияния на ползучесть (скорость переползания) вакансионных и междоузельных потоков для некоторых начальных условий (плотности дислокаций, концентрации дефектов) фазовая траектория пересекает кривую, на которой скорость ползучести равна нулю. Это означает, что скорость ползучести, оставаясь положительной, сначала будет убывать со временем или с дозой до нуля (точнее, до некоторого минимального значения), а затем вновь возрастать. Соответственно временная зависимость скорости деформации будет иметь излом или перегиб. По той же причине аналогичные особенности могут наблюдаться в зависимости скорости ползучести и деформации от других параметров, например температуры. Такие особенности дозовой зависимости наблюдались в целом ряде экспериментальных работ. Например, в [15] наблюдались изломы дозовой зависимости ползучести при облучении образцов из аустенитной стали нейтронами ($E > 1$ МэВ, $10^{15} - 10^{17}$ нейтрон \cdot м² \cdot с⁻¹). Температура облучаемого образца составляла 700 °С. При исследовании переходной ползучести на образцах никеля (99,96 %) [4] при облучении в активной зоне реактора также было зафиксировано немонокотное поведение дозовой зависимости деформации, а именно при температуре облучения 770 К и $\sigma = 120$ МПа в двух последовательных циклах изменения интенсивности облучения наблюдались «ступеньки» на временной зависимости деформации образца. Это отвечало провалу на временной зависимости скорости ползучести. Характерные перегибы наблюдались и при исследовании образцов с аустенитной стали [5], молибдена [16] при облучении ионами водорода и гелия малых энергий в температурном интервале 1500 - 1650 °С. Кроме того, в [4] при облучении сплава 03X20H45M4 потоком нейтронов $5 \cdot 10^{17}$ нейтрон \cdot м² \cdot с⁻¹ ($E > 1$ МэВ) зафиксирован провал температурной зависимости деформации. Данный эффект наблюдался при температурах, близких к $0,5 T_{пл}$ (где $T_{пл}$ – температура плавления). Впервые провал на температурной зависимости деформации был обнаружен В. С. Карасевым при исследовании аустенитной стали под облучением [5].

Таким образом, изменением условий облучения (скорости генерации радиационных дефек-

тов, температуры облучаемого образца) и созданием необходимой концентрации вакансий и плотности дислокаций непосредственно перед облучением можно изменять эволюцию накопления радиационных дефектов, временную зависимость переходной ползучести, выбрать требуемое, как правило, минимальное стационарное значение скорости ползучести, реализовать требуемое значение установившейся (стационарной) ползучести.

Выводы

В рамках рассмотренного механизма радиационной ползучести «скольжение – переползание» при учете генерации вакансий скользящими дислокациями определены качественно различные режимы переходной ползучести. Напряжение, при котором возникает несколько стационарных значений скорости ползучести, зависит от скорости генерации дефектов. Например, при скорости генерации дефектов 10^{18} м⁻³ \cdot с⁻¹, что соответствует реакторному облучению с потоком нейтронов порядка 10^{15} нейтрон \cdot м⁻² \cdot с⁻¹ ($E > 1$ МэВ), величина напряжения, при котором возможна реализация нескольких стационарных значений скорости ползучести, превышает критическое значение 210 МПа. При снижении напряжения величины стационарных значений скорости ползучести сближаются и исчезают для напряжения, равного критическому. При напряжениях, меньших критического значения, установившийся режим ползучести не реализуется.

Показано, что конкурирующее влияние потоков вакансий и междоузельных атомов на дислокации, обуславливающее ползучесть, может приводить к реализации трех стационарных состояний, два из них устойчивые и имеют топологический тип устойчивый «узел», третье – неустойчивое «седло».

Вследствие конкурирующего влияния вакансионных и междоузельных потоков для ряда начальных условий (плотности дислокаций, концентрации дефектов) скорость ползучести в процессе своего изменения, оставаясь положительной, принимает равное нулю значение. Соответственно временная зависимость скорости деформации будет иметь излом или перегиб. При прочих равных условиях скорость ползучести достигает нулевого значения раньше при более низких температурах.

Установлено, что генерация вакансий скользящими дислокациями наиболее сильно влияет на изменение концентрации точечных дефектов, плотности дислокаций и скорости ползучести в области высоких концентраций вакансий и больших плотностей дислокаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. - М.: Атомиздат, 1972. - 600 с.
2. Тарбаев Н.И., Шепельский Г.А. Одномерные структуры, образованные низкотемпературным скольжением дислокаций - источники дислокационного поглощения и излучения в полупроводниковых кристаллах $A^{IV}B^{VI}$ // Физика и техника полупроводников. - 1998. - Т. 32, № 6. - С. 646 - 653.
3. Тарбаев Н.И., Шепельский Г.А., Сальков Е.А. Низкотемпературное движение дислокаций как возможный механизм образования одномерных электронных структур в полупроводниковых кристаллах // Письма в ЖЭТФ. - 1997. - Т. 66, № 10. - С. 639 - 644.
4. Карасев В.С., Тоцкий А.Ю. Смена механизма переходной ползучести металлах под облучением // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. - 1990. - Вып. 1(52). - С. 37 - 40.
5. Карасев В.С. Деформация аустенитной стали ОХ18Н10Т при циклическом действии нейтронного облучения // Там же. - 1981. - Вып. 5(19). - С. 84 - 87.
6. Toloczko M.B., Garner F.A., Eiholzer C.R. Irradiation creep and swelling of the US fusion heats of HT9 and 9Cr-1Mo to 208 dpa at ~ 400 °C // J. Nucl. Mater. - 1994. - Vol. 212 - 215. - P. 604 - 607.
7. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов // УФН. - Т. 169, № 9. - 1999. - С. 979 - 1010.
8. Dimitrov C, Dimitrov O. Elimination of défauts ponctuels par deformation a 78 K dans l'aluminium irradié aux neutrons // Rad. Effects. - 1970. - Vol. 2. - P. 81 - 91.
9. Чадек Й. Ползучесть металлических материалов. - М.: Мир, 1987. - 302 с.
10. Brager H.R., Garner F.A., Gilbert E.R., et al. Radiation Effects in Breeder Reactor // Structural Materials. - 1977. - P. 727 - 731.
11. Селищев П.А. Самоорганизация в радиационной физике. - К.: Аспект-Полиграф, 2004. - 240 с.
12. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. - М.: Мир, 1972. - 408 с.
13. Селищев П.А., Москаленко В.В. Изменение дислокационной структуры облучаемых металлов в процессе их деформации // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. - 2009. - № 2 (93). - С. 3 - 8.
14. Сугаков В.И. Введение в синергетику. - К.: ИПЦ "Киевский университет", 1992. - 180 с.
15. Garner F.A., Gelles D.S. Irradiation creep mechanisms: an experimental perspective // J. Nucl. Mater. - 1988. - Vol. 159. - P. 286 - 309.
16. Бабад-Захранян А.А., Савватимова И.Б., Зубарев П.В., Тачкова Н.Г. Ползучесть монокристалла молибдена при облучении ионами малых энергий // Физика и химия обработки материалов. - 1981. - № 6. - С. 155 - 160.

Т. П. Діденко, П. О. Селищев

**ДИНАМІКА ЗМІНИ ШВИДКОСТІ ПОВЗУЧОСТІ, ГУСТИНИ ДИСЛОКАЦІЙ
І ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ У МАТЕРІАЛАХ ПІД ОПРОМІНЕННЯМ
З УРАХУВАННЯМ ГЕНЕРАЦІЇ ВАКАНСІЙ КОВЗАЮЧИМИ ДИСЛОКАЦІЯМИ**

У межах моделі ковзання дислокацій, лімітованого їхнім переповзанням, досліджено зміну концентрації точкових дефектів і густини дислокацій у матеріалах під опроміненням. Враховано, що при ковзанні дислокацій генеруються вакансії. Показано, що можливе існування декількох установлених режимів (від одного до трьох залежно від умов опромінення), досліджено їхню стійкість, побудовано діаграму станів та відповідні фазові портрети.

Ключові слова: дислокації, повзучість, опромінення, точкові дефекти, вакансії.

Т. P. Didenko, P. O. Selyshchev

**DYNAMICS OF CREEP RATE CHANGE OF DISLOCATIONS DENSITY AND POINT DEFECTS
IN THE MATERIALS UNDER IRRADIATION WITH ACCOUNT OF GENERATION
OF VACANCIES BY GLIDING DISLOCATIONS**

In the frame of glide dislocation model limited by their climb the changes in the concentration of point defects and dislocations in materials under irradiation is studied. We have noted, when the dislocation slip vacancies are generated. It is shown that there might be several stable modes (from one to three depending on exposure conditions), their stability is investigated, and we have constructed state diagram and corresponding phase portraits.

Keywords: dislocations, creep, irradiation, point defects, vacancies.

Поступила в редакцію 03.03.11,
после доработки - 08.06.11.