

ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ОБЛУЧАЕМЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕСЬЮ

П.А. Селищев, В.В. Москаленко

*Национальный университет им. Тараса Шевченко, Физический факультет,
г. Киев, Украина*

Теоретически рассмотрено влияние примеси на динамику ползучести облучаемых металлов в рамках модели скольжения дислокаций, лимитированного их переползанием. Учтено, что скользящая дислокация способна захватывать точечные дефекты и их малые скопления, а атомы примеси могут создавать комплексы атом примеси-вакансия. Результаты исследования нелинейной системы уравнений, которая описывает динамику развития ползучести облучаемого образца, представлены в виде диаграммы состояний и фазовых портретов. Исследовано, как изменяются диаграмма состояний и фазовые портреты модели в присутствии примеси. Показано, что в зависимости от условий облучения и свойств облучаемых материалов могут реализоваться либо один, либо два устойчивых режима ползучести. Все качественные эффекты, свойственные ползучести в облучаемых материалах без примеси (излом, перегиб, гистерезис, провал скорости ползучести) имеются и в металлах с примесями.

Использование металлов в качестве конструкционного материала ядерных установок требует точного прогноза величины их упругих и неупругих деформаций при достаточно больших временах облучения, когда кроме напряжений и температуры важную роль играет радиационный фактор.

Экспериментально установлено, что в целом монотонно возрастающая дозовая зависимость скорости ползучести напряженных облучаемых внутри реактора металлов имеет характерные излом, перегибы (скачок производной) [1-4].

Динамика переходной ползучести чистых металлов изучена в [5], где установлено, что в зависимости от условий облучения и состояния нагруженного образца под облучением могут устанавливаться различные режимы ползучести. Число качественно различных режимов, т. е. динамика ползучести, определяется количеством, значением и устойчивостью тех из них, которые являются стационарными.

Особенный интерес представляет анализ влияния на ползучесть облучаемых металлов наличие атомов примеси, которые всегда присутствуют в реальном материале.

В данной работе теоретически исследовано влияние примеси на динамику ползучести облучаемого нагруженного образца.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Радиационная ползучесть нагруженных металлов с примесями рассматривается в рамках модели «скольжение-переползание», в которой ползучесть обеспечивается скольжением дислокаций. На пути скользящей дислокации попадают препятствия – стопоры, которые мешают последующему скольжению дислокаций в металле. Стопорами могут быть различные несовершенства кристаллической структуры: примеси, дислокации леса и т.д. Стопор дислокации переползает путем поглощения точечных

дефектов, благодаря чему переходит в новые плоскости скольжения и скользит до остановки на новом стопоре.

Важно то, что не имеет значения, как дислокация переползает стопор, – наращиванием или растворением экстраплоскости, поэтому скорость ползучести пропорциональна модулю разницы потоков междуузельных атомов и вакансий.

Предполагалось, что основная роль примеси заключается в связывании свободных вакансий в малоподвижные комплексы.

Учтено, что, скользя, дислокация способна захватывать вакансии. Задача рассматривалась в условиях, при которых захват междуузельных атомов дислокацией маловероятен, а термическими вакансиями и процессом рекомбинации можно пренебречь.

Изменения скорости ползучести образца, концентрации точечных дефектов и комплексов описываются уравнениями:

$$\dot{\epsilon} = v |(J_i - J_v)|, \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = K - \beta_i C_i - \gamma_{iv} C_i C_{iv}^+, \quad (2)$$

$$\frac{dC_v}{dt} = K - \beta_v C_v - \nu \mu C_v |\alpha_i C_i - \alpha_v C_v| - \gamma_{viv} (C_{iv} - C_{iv}^+) C_v + \frac{C_{iv}^+}{\tau_{iv}} \quad (3)$$

$$\frac{dC_{iv}^+}{dt} = \gamma_{viv} (C_{iv} - C_{iv}^+) C_v - \gamma_{ivv} C_{iv}^+ C_i - \frac{C_{iv}^+}{\tau_{iv}}. \quad (4)$$

Здесь C_{iv} – полная концентрация ловушек; C_{iv}^+ – ловушки, которые захватили вакансии; γ_{ivv} пропорционально D_i , а $\gamma_{viv} - D_v$; τ_{iv} – характерное время жизни комплекса по отношению к термическому распаду; K – скорость создания дефектов внешним облучением; $J_i = \alpha_i C_i$ и $J_v = \alpha_v C_v$ – плотности потоков междуузельных атомов и вакансий (их концентрации C_i

и C_v) на дислокации, обеспечивающие ползучесть (их плотность – $\rho_d/3$; считается, что в среднем одна треть дислокаций имеет вектор Бюргера, параллельный прилагаемой нагрузке; ρ_d – общая плотность дислокаций в кристалле; фактор предпочтительного поглощения ими междоузельных атомов – z_d). $\alpha_v = \rho_d D_v / 3$. $D_i = D^0 \exp(-E_m^i / kT)$ и $D_v = D^0 \exp(-E_m^v / kT)$ – коэффициенты диффузии междоузельных атомов и вакансий; E_m^i и E_m^v – соответствующие энергии миграции; T – температура образца; k – постоянная Больцмана. $\beta_i = (z_d \rho_d + \sum z_k \rho_k) D_v$, $\beta_v = (\rho_d + \sum \rho_k) D_v$. Параметры ρ_k и z_k – плотность и факторы предпочтения других, недислокационных стоков. Коэффициенты ν и μ являются функциями приложенной нагрузки и свойств материала.

Введем безразмерные переменные и параметры:

$$x = \frac{C_v}{C_v^0}, \quad y = \frac{C_i}{C_i^0} - 1, \quad z = \frac{C_{iv}^+}{C_{iv}}, \quad \tau = \beta_v t$$

, где $C_i^0 = K / \beta_i$ – стационарное значение концентрации междоузельных атомов, $C_v^0 = K / \beta_v$.

$$\alpha = \frac{\alpha_v \beta_i}{\alpha_i \beta_v} = \frac{(z_d \rho_d + \sum z_k \rho_k)}{3z_d (\rho_d + \sum \rho_k)},$$

$$A = \frac{\nu \mu \alpha_i K}{\beta_i \beta_v} = \frac{\nu \mu K z_d \rho_d}{3D_v (z_d \rho_d + \sum z_k \rho_k) (\rho_d + \sum \rho_k)}$$

$$\beta = \frac{\gamma_{viv} C_{iv}}{\beta_v} = \frac{C_{iv} R_{viv}}{\rho_v},$$

$$\chi = \frac{C_{iv}}{K \tau_{iv}}, \quad \varphi = \frac{\gamma_{iv} C_{iv}}{\beta_i} = \frac{R_{iv} C_{iv}}{\rho_i},$$

$$\eta = \frac{\gamma_{iv} \beta_v}{\gamma_{viv} \beta_i} = \frac{R_{iv} \rho_v}{R_{viv} \rho_i}, \quad \sigma = \frac{\beta_v}{K \tau_{iv} \gamma_{viv}}.$$

Тогда система (1)–(4) переписывается в виде

$$\frac{dx}{d\tau} = 1 - x - Ax|1 + y - \alpha x| - \beta x(1 - z) + \chi z; \quad (5)$$

$$\frac{\beta_v}{\beta_i} \frac{dy}{d\tau} = -y - \varphi z(y + 1); \quad (6)$$

$$\frac{\beta_v^2}{\gamma_{viv} K} \frac{dz}{d\tau} = x(1 - z) - \eta z(y + 1) - \sigma z. \quad (7)$$

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЙ И ФАЗОВЫЕ ПОРТРЕТЫ СИСТЕМЫ

Представим динамику изменения концентраций вакансий и междоузельных атомов, а соответствен-

но и динамику развития ползучести облучаемого образца с помощью полного набора качественно различных фазовых портретов системы уравнений (5) – (7). В зависимости от значения параметров фазовые портреты могут иметь различную топологическую структуру.

Разбиение пространства управляющих параметров (α и A) на области, в которых фазовые портреты качественно подобны – диаграмма состояний, а также сами фазовые портреты, построенные согласно [5].

Диаграмма состояний и соответствующие фазовые портреты при внесении примеси качественно не изменяются (для чистых металлов изоклина $dy=0$ совпадает с осью абсцисс).

Области I диаграммы состояний (точка a на рис. 1) соответствует фазовый портрет, изображенный на рис. 2,а. Все фазовые траектории сходятся к единственной устойчивой стационарной точке, которая имеет топологический тип – устойчивый «узел».

В начале облучения неустановившаяся ползучесть происходит по вакансионному механизму, затем механизм меняется на междоузельный (в этот момент скорость ползучести равна нулю), который остается и на установившейся стадии. При переходе в область II на линии 1 (точка b на рис. 1) появляется вторая стационарная точка (соответствующий фазовый портрет представлен на рис. 2,б), которая является неустойчивой и в области II распадается на две: устойчивый «узел», и неустойчивое «седло».

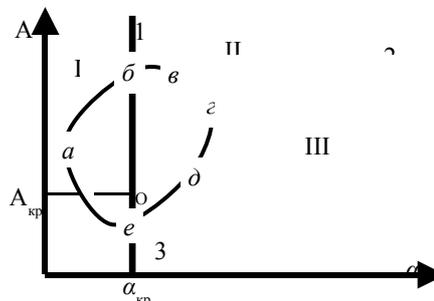


Рис. 1. Диаграмма состояния облученного металла с примесями под напряжением: разбиение пространства управляющих α и A на области

Для параметров из области II (точка b на рис. 1) фазовые траектории сходятся к двум устойчивым стационарным точкам, огибая неустойчивое «седло». В начале облучения неустановившаяся ползучесть происходит по вакансионному механизму, который в зависимости от начальной концентрации вакансий затем либо поменяется на междоузельный (в этот момент скорость ползучести равна нулю), либо нет (см. рис. 2,в).

Таким образом, в области II могут реализоваться два режима ползучести, один из которых происходит по междоузельному механизму (точка a), второй

– по вакансионному (точка b). Но при переходе из области I останется режим, которому соответствует точка a .

С продвижением в глубь области II первое стационарное решение растёт, а неустойчивое «седло» уменьшается. На границе, разделяющей области II и III (точка z на рис. 1) они сольются и исчезнут. Соответствующий режим установившейся ползучести (по междоузельному механизму) реализоваться уже не может, он сменяется неустановившимся, и в результате система переходит в устойчивое состояние, которому соответствует вакансионный режим установившейся ползучести (точка a на рис. 2,г).

Следует заметить, что если изменениям параметров будет соответствовать переход из области III в область I через область II, то в области II установившаяся ползучесть будет соответствовать стационарному решению, которому соответствует ползучесть

по вакансионному механизму (точка b на рис. 2,в), а к стационарному режиму ползучести по междоузельному механизму система перейдет через неустановившейся режим на границе областей I и II (см. линию 1, рис. 1). Образуется петля гистерезиса.

В области III (см. точку d на рис.1) остается единственное устойчивое стационарное решение, к которому сходятся все фазовые траектории. Ему соответствует режим установившейся ползучести по вакансионному механизму (см. рис. 2,д). С начала облучения и до установившейся стадии ползучесть происходит по вакансионному механизму. Излом дозовой зависимости в данной области наблюдаться не будет. При переходе из области III в область I на линии 3 (см. точку e на рис. 1) скорость установившейся ползучести равна нулю: потоки на дислокации вакансий и междоузельных атомов скомпенсированы (см. рис. 2,е).

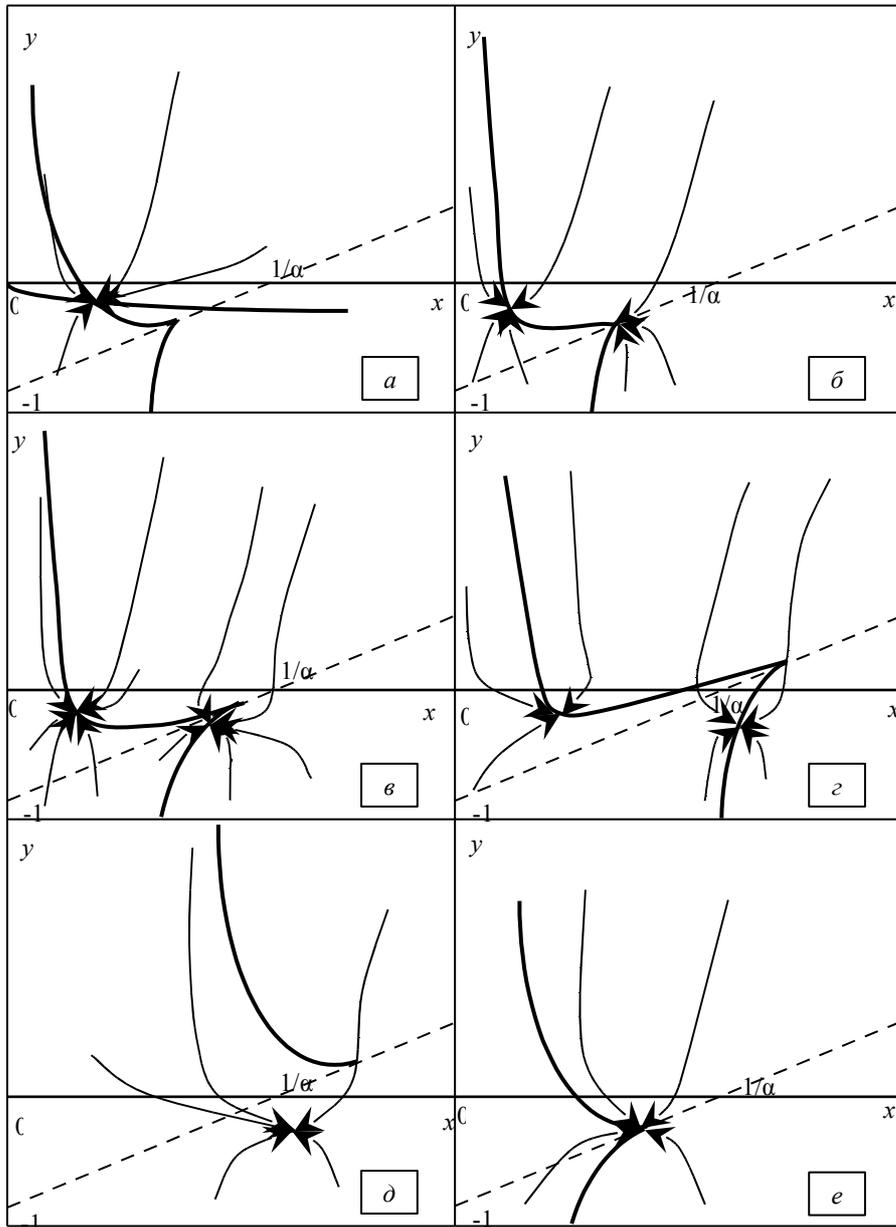


Рис. 2. Фазовый портрет для параметров внутри и на границе каждой из областей диаграммы состояний. Пунктирную линию создают состояния, для которых Γ . Сплошной толстой линией указаны главные изоклины

Подводя итоги, можно сказать, что в зависимости от значений условий облучения и свойств облучаемого образца могут реализоваться либо один, либо два стационарных режима ползучести. Конкретный режим ползучести определяется начальным состоянием образца. Скорость ползучести может стремиться к стационарному значению либо монотонно, либо проходя через экстремум. В момент времени, когда потоки на дислокации вакансий и междоузельных атомов становятся равными, скорость ползучести будет равна нулю. Это приводит к появлению изломов дозовой зависимости ползучести.

В присутствии примеси, которая способна связывать вакансии и образовывать вакансионные комплексы, стационарные значения скорости ползучести и концентрации дефектов меняются. К качественному изменению динамики нестационарной ползучести наличие примеси не приводит. Фазовые портреты деформируются, но остаются топологически подобными. Все качественные эффекты (излом, перегиб, гистерезис, провал скорости ползучести), свойственные ползучести в облучаемых материалах,

имеются как в чистых, так и в металлах с примесями.

Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение материалов и определять оптимальные режимы их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Schule, H. Hausen. Neutron irradiation creep in stainless steel alloys // *J.Nucl.Mater.* 1994, v. 212–215, p. 388
2. M.B. Toloczko, F.A. Garner, C.R. Eiholzer. Irradiation creep and swelling of the US fusion heats of HT9 and 9Cr-1Mo to 208 dpa at ~400°C // *J.Nucl.Mater.* 1994, v. 212–215, p. 604.
3. В.С. Карасев, А.Ю. Тоцкий. Смена механизма переходной ползучести металлах под облучением // *ВАНТ. Сер.: ФРП и РМ.* 1990, в. 1(52), с. 37.
4. В.С. Карасев, А.Ю. Тоцкий, Л.С. Ожигов. Влияние примеси на переходную радиационную ползучесть никеля // *ВАНТ. Сер. ФРП и РМ.* 1994, в. 1(61), с. 3.
5. П.А. Селищев. *Самоорганизация в радиационной физике.* Киев: «Аспект полиграф», 2004, с. 240.

ОСОБЛИВОСТІ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ МЕТАЛІВ З ДОМІШКАМИ ПІД ОПРОМІНЕННЯМ

П.О. Селищев, В.В. Москаленко

Теоретично розглянуто вплив домішки на динаміку повзучості опромінених металів в рамках моделі ковзання дислокацій, що лімітоване їх переповзанням. Ураховано, що ковзаюча дислокація здатна захоплювати точкові дефекти і їх малі скупчення, а атоми домішки можуть утворювати комплекси атом домішки-вакансія. Результати досліджень нелінійної системи рівнянь, що описують динаміку розвитку повзучості зразка під опроміненням, представлено у вигляді діаграми станів і фазових портретів. Досліджено як змінюється діаграма стану і фазові портрети моделі в присутності домішки. Показано, що в залежності від умов опромінення і властивостей опромінених матеріалів існує або один, або два стійкі режими стаціонарної повзучості. Всі якісні ефекти (злами, перегини, гистерезис, провал швидкості повзучості), що властиві повзучості в опромінених матеріалах, мають місце як в чистих, так і в металах з домішками.

NON-STATIONARY CREEP OF IMPURITY METALS UNDER IRRADIATION

P.A. Selyshchev, V.V. Moskalenko

Within the framework of the dislocation climb-glide model a theoretical approach to influence of the impurity on the evolution of creep of metals under irradiation. It takes into account that glide dislocation can capture point defects and their small clusters and also impurity can make up impurity-vacancy systems. Results of the investigation of nonlinear equations for the creep development are shown as state diagram and phase portrait. It is investigated the change of state diagram and phase portraits under the influence of impurity. It is shown depending on conditions of the irradiation and characteristic of irradiated material, one or two inconvertible states of the stationary creep exist. All qualitative effects (fracture, inflection, hysteresis, dip of creep's speed) are particular to the creep in irradiated materials, it has a place as in pure, as in materials with an admixture.