

- [1] З е л ь д о в и ч Б.Я., П и л и п е ц к и й Н.Ф., Ш к у н о в В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 240 с.
- [2] Л у к и н В.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
- [3] В а с и л ь е в О.И., Л е б е д е в С.С., С е м е н о в Л.П. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 2347-2348.
- [4] К о л о м и е ц С.М. В кн.: Тез. докл. Ш Всес. сов. по распространению лазерного излучения в дисперсной среде, ч. Ш. Обнинск: ИЭМ, 1985, с. 92-95.

Поступило в Редакцию
6 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 4 26 февраля 1989 г.
05.1

О КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ ПОЛЗУЧЕСТИ И КРИТИЧЕСКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ СДВИГА ОБЛУЧАЕМЫХ МЕТАЛЛОВ

Ш.Ш. И б р а г и м о в, Д.В. К а м ш и л и н,
Ю.С. П я т и л е т о в, О.Г. Т ю п к и н а

В металлических образцах под воздействием облучения высокоэнергетичными частицами создаются радиационные дефекты (кластеры, вакансионные и межузельные петли, вакансионные поры). Они служат барьерами для движущихся дислокаций и определяют величину критического напряжения сдвига $\tau_{кр}$ и скорости ползучести $\dot{\epsilon}$ [1]. Изменение мощности и концентрации барьеров в результате облучения является общей причиной, совместно влияющей на $\dot{\epsilon}$ и $\tau_{кр}$, поэтому $\dot{\epsilon}$ и $\tau_{кр}$ — коррелированные величины [2]. Установление вида корреляционной зависимости $\dot{\epsilon}$ от $\tau_{кр}$ и определение степени тесноты связи¹ этих величин составляет предмет настоящей работы.

В качестве объекта исследования выбран модельный металлический материал с кубической решеткой, содержащий прямолинейные краевые дислокации плотностью ρ_n , ориентированные вдоль координатных осей x_β ($\beta=1, 2, 3$) и имеющие векторы Бюргерса, на-

¹ Термин „степень тесноты связи“ является общепринятым в математической статистике. Он характеризует, насколько сильно связаны друг с другом исследуемые случайные величины.

правленные вдоль x_B . Кристалл подвержен облучению с интенсивностью образования поврежденных K смещений на атом в секунду (сна/с), в результате которого в нем образовались межузельные петли и вакансионные поры объемнои плотностью N_{IL} и N_U размером r_{IL} и r_U соответственно.

Вычисление критического напряжения сдвига проводим с помощью ЭВМ-моделирования движения дислокации через сетку случайно расположенных препятствий (пор, петель, дислокаций леса) [3, 4]. Мощность барьера определяется критическим углом $\varphi_{кр}$, образуемым сегментами дислокации в точке расположения барьера, начиная с которого дислокация преодолевает этот барьер. Согласно классификации Бемента [5], вакансионные поры — „сильные” барьеры ($\varphi_{кр} = 1.4$ рад), дислокации леса и межузельные петли — „слабые” ($\varphi_{кр} = 2.8$ рад). За $\tau_{кр}$ принимается такое напряжение, при котором дислокация преодолевает все барьеры на площадке моделирования [3, 4].

Скорость радиационной ползучести $\dot{\epsilon}$ вычисляем в рамках модели, основанной на скольжении и переползании дислокаций [16], по формуле

$$\dot{\epsilon} = \frac{L}{\lambda} b \rho_n^{(n)} v, \quad (1)$$

где λ — средний размер радиационных дефектов-барьеров; b — модуль вектора Бюргерса; $\rho_n^{(n)}$ — плотность скользящих дислокаций; v — скорость переползания дислокаций; L — расстояние, проходимое дислокацией в плоскости скольжения между двумя устойчивыми конфигурациями (оно рассчитывается с помощью ЭВМ-моделирования по тому же методу, что и $\tau_{кр}$).

Введем безразмерные параметры \mathcal{X} и α , характеризующие долю „слабых” барьеров и среднее расстояние между барьерами в плоскости скольжения дислокации соответственно: $\mathcal{X} = (\rho_F + \rho_L) / \rho_T$, $\alpha = l / l_0$. Через ρ_T обозначена полная плотность барьеров в плоскости скольжения ($\rho_T = \rho_F + \rho_L + \rho_U$), где ρ_F — плотность дислокаций леса, $\rho_L = 2r_{IL}N_{IL}$, $\rho_U = 2r_U N_U$, l — среднее расстояние между барьерами ($l = \rho_T^{-1/2}$), l_0 — значение l при фиксированной плотности барьеров 10^{14} м^{-2} ($l_0 = 10^{-7} \text{ м}$). В принятых здесь приближениях параметр α принимает значение от ≈ 0.3 до $\sqrt{3}$, а \mathcal{X} меняется в пределах $\alpha^2/3 \leq \mathcal{X} \leq 1$.

Расчет зависимостей $\tau_{кр}$ и $\dot{\epsilon}$ от \mathcal{X} и α при использовании параметров сталей и сплавов на основе железа [6], температуре 720 К, внешнем растягивающем напряжении $\sigma = 40 \text{ МПа}$, $K = 10^{-7} \text{ сна/с}$, $\rho_F = 1/3 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$, $r_{IL} = r_U = 10^{-8} \text{ м}$ показал, что с уменьшением концентрации барьеров при неизменном соотношении между количеством „сильных” и „слабых”, а также с увеличением доли „слабых” барьеров при неизменной их общей концентрации $\tau_{кр}$ монотонно уменьшается, а $\dot{\epsilon}$ — увеличивается. Отсюда можно заключить, что $\dot{\epsilon}$ и $\tau_{кр}$ — коррелированные величины, хотя между ними нет прямой причинной связи и функциональной зависимости. На основании полученных данных определим характеристики корр-

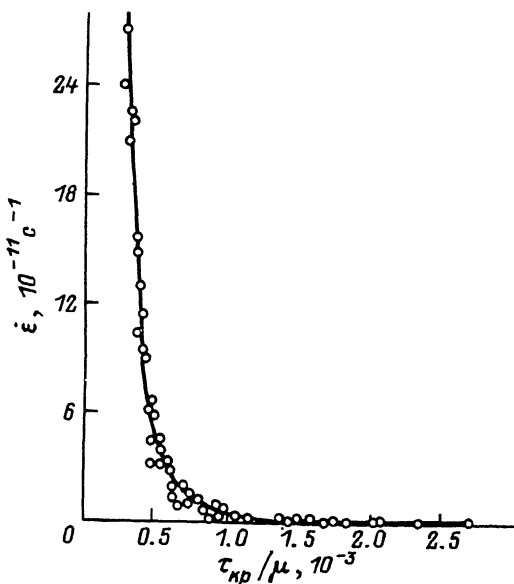


Рис. 1. Корреляционная зависимость $\dot{\epsilon}$ от $\tau_{кр}$.

ляционной зависимости $\dot{\epsilon}$ от $\tau_{кр}$: линию регрессии $\dot{\epsilon}$ по $\tau_{кр}$ и корреляционное отношение γ , отражающее степень тесноты связи $\dot{\epsilon}$ и $\tau_{кр}$.

С этой целью, по методике, принятой в математической статистике (см., например, [7]), строим поле корреляции с координатами $\dot{\epsilon}$ и $\tau_{кр} / \mu$ (μ — модуль сдвига), нанеся на него точки, отвечающие значениям $\dot{\epsilon}$ и $\tau_{кр}$, полученным при разных α и $\alpha \mathcal{E}$ (рис. 1). Затем, вычислив средние значения $\dot{\epsilon}$ при разных $\tau_{кр}$, определяем линию регрессии $\dot{\epsilon}$ по $\tau_{кр}$ (сплошная линия на рис. 1). Она неплохо аппроксимируется степенной функцией

$$\dot{\epsilon} = A(\tau_{кр} / \mu)^{-B}, \quad (2)$$

где $A = 7.14 \cdot 10^{-22} \text{ с}^{-1}$; $B = 3.28$.

Разброс точек на корреляционном поле относительно линии регрессии и отклонение этой линии от горизонтальной прямой показывают, насколько сильно связаны $\dot{\epsilon}$ и $\tau_{кр}$. Количественной характеристикой степени тесноты связи служит корреляционное отношение γ [7] (при $\gamma = 0$ корреляция отсутствует; при $\gamma \rightarrow 1$ она настолько сильна, что корреляционная зависимость переходит в функциональную). Из данных, приведенных на рис. 1, следует $\gamma = 0.983$, что свидетельствует о сильной корреляции между $\dot{\epsilon}$ и $\tau_{кр}$.

Сравним полученные результаты с экспериментальными данными из работы [8], в которой была исследована корреляция между ско-

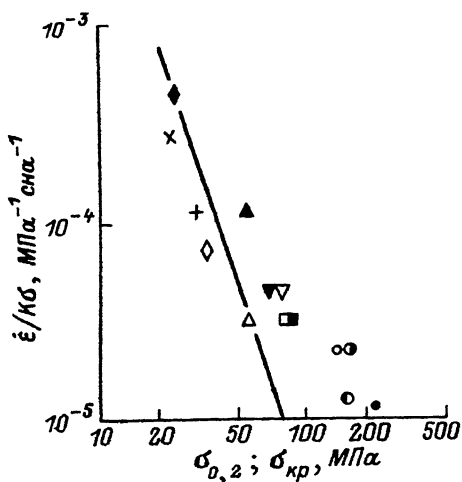


Рис. 2. Корреляционная зависимость $\dot{\epsilon}/K\sigma$ от $\sigma_{кр}$, вычисленная по формуле (2). Значками разного типа обозначены полученные в работе [8] значения $\dot{\epsilon}/K\sigma$ для ряда ГЦК-металлов и сплавов (облучение протонами с энергией 6.2 МэВ) и $\sigma_{0.2}$ этих материалов в исходном состоянии.

ростом радиационной ползучести и пределом текучести $\sigma_{0.2}$ ряда ГЦК-металлов и сплавов. На рис. 2 воспроизведены данные из [8] (значки разного типа) и нанесена линия регрессии $\dot{\epsilon}$ по $\sigma_{кр}$, взятая из рис. 1 (эквивалентом $\sigma_{0.2}$ в наших расчетах служит растягивающее напряжение $\sigma_{кр} = 2\tau_{кр}$, при котором сдвиговые компоненты напряжения принимают значение $\tau_{кр}$). Из рис. 2 видно, что хотя приведенные значения $\sigma_{0.2}$ относятся к исходному (необлученному) состоянию материалов, расчетная линия регрессии $\dot{\epsilon}$ по $\sigma_{кр}$, задаваемая степенной зависимостью (2), неплохо отражает наблюдаемую в эксперименте связь $\dot{\epsilon}$ с $\sigma_{0.2}$.

То обстоятельство, что $\dot{\epsilon}$ и $\sigma_{кр}$ — коррелированные величины, может быть использовано на практике. Зная вид корреляционной зависимости $\dot{\epsilon}$ от $\sigma_{кр}$ и используя результаты кратковременных испытаний на растяжение, можно не проводя длительных испытаний, делать определенные выводы о скорости ползучести.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ибрагимов Ш.Ш., Кирсанов В.В., Пятилетов Ю.С. Радиационные повреждения металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.

- [2] Кирсанов В.В., Трушин Ю.В. В сб.: Моделирование на ЭВМ дефектной структуры кристаллов. Л.: ФТИ, 1987, с. 28-33.
- [3] Foreman J.E., Makin M.J. // *Phil. Mag.* 1966. V. 14. P. 735-740.
- [4] Кирсанов В.В., Тюпкина О.Г. Препринт 6-81, Алма-Ата, ИЯФ АН КазССР, 1981. 40 с.
- [5] Vement A.L. // *Rev. Roum. Phys.* 1972. V. 17. P. 360-380.
- [6] Пятилетов Ю.С. // *ФММ.* 1982. Т. 54. С. 1080-1087.
- [7] Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. М.: Металлургия, 1968. 227 с.
- [8] Jung P., Ansari M.I. // *J. Nucl. Mater.* 1986. V. 138. P. 40-45.

Институт ядерной
физики АН Казахской ССР
Алма-Ата

Поступило в Редакцию
4 июля 1988 г.