05

Критерий зарождения микротрещины в упругом поле дисклинации, экранированном ансамблем дислокаций

© Г.Ф. Сарафанов[2,3], В.Н. Перевезенцев[1,2]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
[2] Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород
[3] Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: gf.sarafanov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 22 августа 2014 г.

Рассмотрены условия устойчивости микротрещины в упругом поле клиновой дисклинации, экранированном распределенным дислокационным ансамблем. Определено значение пороговой мощности дисклинации, выше которой возможно существование микротрещины. Показано, что пластическая деформация, экранирующая упругое поле дисклинации, стабилизирует рост микротрещины.

При величине пластической деформации, предшествующей макроскопическому разрушению, классические дислокационные модели образования микротрещин [1] оказываются малоэффективными и не позволяют описывать экспериментальные данные. Это связано с тем, что в условиях развитой пластической деформации характер дефектных структур становится качественно иным. Наряду с продолжающимися пластическими трансляциями решетки возникают и постоянно усиливаются ее пластические ротации, формируются мезодефекты [2,3]. Последние вызывают фрагментацию кристалла, т. е. в ходе деформации он разбивается на совокупность мелких (доли микрон) фрагментов, относительные разориентировки которых монотонно нарастают [4]. Локализуясь при пластической деформации на межкристаллитных границах, мезодефекты (стыковые дисклинации, планарные мезодефекты) вызывают мощные дальнодействующие напряжения, обусловливающие зарождение микротрещин, последующее их развитие и разрушение материала.

Согласно экспериментальным данным, в деформируемых кристаллах формируются дисклинационные конфигурации, у которых отсутствует логарифмическая расходимость дальнодействующих напряжений [2,4]. Поэтому при построении моделей разрушения материала путем появления микротрещин вблизи концентраторов напряжений дисклинационного типа обычно рассматривают лишь их экранированные системы, например диполи, квадруполи и т.д. [5]. Между тем, как показано в работах [6,7], более эффективным способом экранировки упругого поля такого рода мезодефектов может оказаться дислокационное экранирование.

В настоящей работе на основе энергетического анализа сформулирован критерий устойчивости микротрещины в окрестности клиновой дисклинации, упругое поле которой экранировано распределенным ансамблем движущихся дислокаций.

В реальности образование микротрещин происходит преимущественно в тройных стыках из-за наличия в них стыковых дисклинаций, само возникновение которых обусловлено пластической деформацией в их окрестности [2,3]. В двумерной постановке, в рамках которой будет проводиться дальнейший анализ, стыковые дисклинации соответствуют обычным клиновым дисклинациям [4].

Для простоты рассмотрим ситуацию, когда процесс пластической деформации в окрестности дисклинации осуществляется движением дислокаций по одной системе скольжения. Это позволит теоретически проанализировать условия, необходимые для существования устойчивой микротрещины в упругом поле клиновой дисклинации, используя результаты работ [6–8]. В этих работах показано, что кинетическое перераспределение дислокаций в области дисклинации приводит к экранированию ее упругого поля, что обеспечивает существенное понижение общей упругой энергии системы дефектов кристалла. При этом зависимость энергии экранированной дисклинации W от размера кристалла R на малых расстояниях $(r \ll r_d)$ имеет вид $W \sim R^2$, характерный для неэкранированного случая [5], а на больших $(r \gg r_d)$ — приобретает параболический характер $W \sim \sqrt{R}$ (где r_d — радиус экранирования упругого поля [6]). Именно это обстоятельство, как будет показано в данной статье, приводит к стабилизации роста возникших микротрещин.

Отметим, что используемый в настоящей работе энергетический подход не является единственно возможным способом решения ис-

5

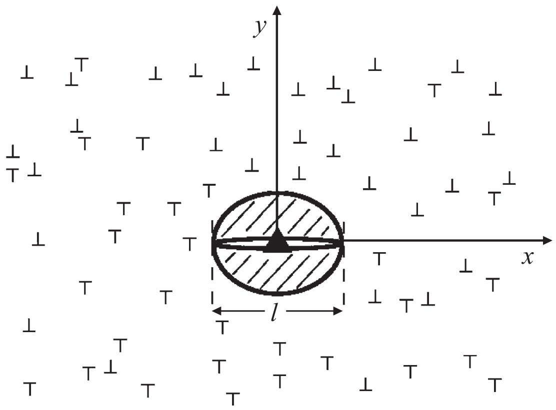

Рис. 1. Пластически деформируемый кристалл, в центре которого помещена дисклинация мощности ω, в упругом поле растягивающих напряжений σ_{yy} которой возникает микротрещина длины.

ходной задачи. Существует метод конфигурационной силы [1], применяемый, в частности, при анализе зарождения микротрещин в упругих полях дисклинационных конфигураций [9]. В последующем мы предполагаем его применить наряду с энергетическим анализом в расширенном варианте статьи, где будет обоснована эквивалентность обоих подходов и целесообразность их применения в зависимости от конкретной физической постановки задачи.

Итак, рассмотрим кристалл, пластически деформируемый вдоль одной системы скольжения, например вдоль оси $0x$, в центре которого помещена дисклинация мощности ω (рис. 1). Поскольку в пластической зоне проявляются эффекты экранировки упругого поля на характерном расстоянии $r_d \ll R$, то кристалл можно считать бесконечным [8].

Предположим, что по мере увеличения мощности дисклинации ω при некотором пороговом значении ω_c растягивающие напряжения дисклинации в ее окрестности вызовут образование микротрещины некоторой длины $l (l \ll R)$.

Освобожденная упругая энергия поступает в вершины трещины и там затрачивается на образование новой свободной поверхности.

Если считать удельную работу разрушения на единицу площади новой поверхности γ постоянной материала, то работа, затрачиваемая на образование микротрещины длины l, равна $\Gamma = 2\gamma l$.

С другой стороны, микротрещина приведет к уменьшению упругих деформаций в зоне, прилегающей к микротрещине, и соответственно уменьшению упругих напряжений. По Сен-Венану [10] эта зона релаксаций оказывается порядка l^2, поэтому выберем ее в форме малого цилиндра радиусом $l/2$. Тогда произойдет высвобождение энергии из зоны релаксации $S_L \sim l^2$, и энергия упругой области уменьшится. Изменение общей энергии ΔW при этом будет равно

$$\Delta W = 2\gamma l - \iint\limits_{S_L} w(x,y)dxdy = 2\gamma l - \frac{G\omega^2 r_d}{8\pi(1-\nu)^2} \int\limits_0^{l/2} f(r/r_d)dr, \qquad (1)$$

где $w(x,y)$ — плотность упругой энергии дисклинации, экранированной системой движущихся дислокаций, G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона, функция $f(z) = f(r/r_d)$ определяется следующим образом [6]:

$$f(z) = z\{K_1^2(z)[I_0(2z) - 1] + (1-2\nu)K_0^2(z)[I_0(2z) + 1]\}, \qquad (2)$$

в которой $I_n(z)$ и $K_n(z)$ — модифицированные функции Бесселя n-го порядка первого и второго рода соответственно [6].

Из анализа зависимости (1) следует, что изменение энергии $\Delta W l$, при мощности дисклинации ω меньшей некоторого порогового значения ω_c, является монотонно возрастающей функцией, т.е. возникновение микротрещины сколь угодно малой длины энергетически невыгодно. По мере увеличения мощности дисклинации при $\omega > \omega_c$ у функции $\Delta W(l)$ появляются два экстремума — максимум и минимум при некоторых значениях аргумента l_c и l_s (рис. 2). При $\omega = \omega_c$ значения l_c и l_s совпадают, образуя на зависимости $\Delta W(l)$ плато.

В результате при $\omega > \omega_c$ становится возможным появление микротрещины, длина которой превышает критическое значение l_c: при $l < l_c$ микротрещина схлопывается, а при $l > l_c$ самопроизвольно растет. Ее рост прекращается при достижении устойчивого состояния при $l = l_s(\omega)$. Это соответствует попаданию системы в минимум потенциала $\Delta W(l)$. Отметим, что наличие потенциальной ямы у зависимости $\Delta W(l)$

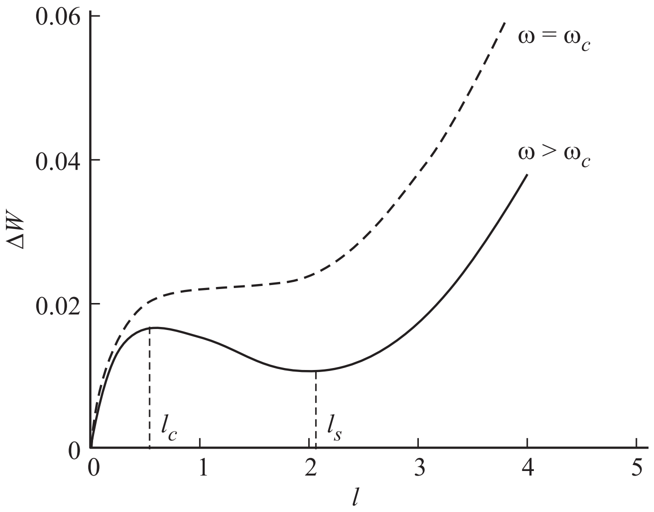

Рис. 2. Зависимость изменения упругой энергии кристалла, нормированной на величину $G\omega^2 r_d^2/2\pi(1-\nu)$ от длины микротрещины l, нормированной на величину r_d при мощности дисклинации ω, равной (штриховая линия) и выше (сплошная линия) пороговой мощности ω_c. Графики построены при значениях $\gamma = Gb/8$ и $\nu = 1/3$.

обусловлено эффектом экранирования упругого поля дисклинации ансамблем движущихся дислокаций [6,7].

Из условия $d\Delta W/dl = 0$, которое сводится к выражению

$$2\gamma = \frac{G\omega^2 r_d}{16\pi(1-\nu)^2} f(l/2r_d),$$

нетрудно определить значение пороговой мощности дисклинации

$$\omega_c = (1-\nu)\sqrt{\frac{32\gamma\pi}{Gr_d f_{\max}(l_c)}}, \tag{3}$$

при превышении которой возможно существование стабильной микротрещины длиной $l = l_s(\omega)$. Заметим, что максимальное значение функции $f(l)$ достигается при $l = l_c$ и соответствует плато на зависимости $\Delta W(l)$ (рис. 2).

Учитывая свойства функции (2), имеем $f_{\max} \approx 0.7$ при $l_c \approx 1.2r_d$. При типичных значениях параметров $\gamma = Gb/8$, $\nu = 1/3$ равенство (3) сводится к виду

$$\omega_c \approx \sqrt{\frac{8b}{r_d}}. \qquad (4)$$

Сделаем оценки. При $b = 3 \cdot 10^{-8}$ cm, $r_d = 0.2\,\mu$m [5] имеем

$$\omega_c \approx 0.11 \sim 6.3^\circ, \quad l_c \approx 0.24\,\mu\text{m}. \qquad (5)$$

Таким образом, пластическая деформация, экранирующая упругое поле дисклинации, не позволяет микротрещине лавинообразно расти и стабилизирует ее рост. Это приводит к накоплению микротрещин в местах пластических несовместностей, преимущественно в стыках зерен, где формируются стыковые дисклинации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-03-00484) и частичной поддержке гранта ННГУ (соглашение 2013 г. 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ) и гранта правительства Российской Федерации (договор № 14.B25.31.0023).

Список литературы

[1] *Инденбом В.Л.* // ФТТ. 1967. Т. 3. В. 7. С. 2072–2079.
[2] *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
[3] *Рыбин В.В., Зисман А.А., Золоторевский Н.Ю.* // ФТТ. 1985. Т. 27. С. 181–185.
[4] *Rybin V.V.* // Problems of material science. 2003. N1(33). P. 9–28.
[5] *Владимиров В.И., Романов А.Е.* Дисклинации в кристаллах. Л.: Наука, 1986. 224 с.
[6] *Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н.* // ФТТ. 2007. Т. 49. В. 10. С. 1780–1786.
[7] *Perevezentsev V.N., Sarafanov G.F.* // Rev. Adv. Mater. Sci. 2012. V. 30. P. 73–89.
[8] *Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 18. С. 35–43.
[9] *Рыбин В.В., Зисман А.А., Жуковский И.М.* // Проблемы прочности. 1982. № 12. С. 10–15.
[10] *Хирт Дж., Лоте И.* Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 599 с. (Hirth J.P., Lothe J. Theory of Dislocations. McGraw Hill, N.Y. 1968).