

## К Р А Т К И Е С О О Б Щ Е Н И Я

УДК 539.4.019.3

© 1993

## К ВОПРОСУ О СЛИЯНИИ СТУПЕНЕЙ СКОЛА

В.М.Финкель, Н.В.Дорохова, В.П.Сафронов

Разрушение материалов всегда сопровождается образованием ступеней скола [1-3]. Описание их сближения выполнено в работах Фриделя [4,5], где с помощью модели линейного натяжения были определены координата точки слияния  $x_0$  и угол встречи  $\varphi$ , который составлял  $\sim 12^\circ$ . Эти оценки имеют хорошее согласование с опытом, если проекция линии фронта на плоскость скола прямая (далее — прямой фронт). Однако экспериментальные наблюдения показывают, что и при этом объединения ступенек часто не происходит вообще. Если же линия фронта искривлена, значения  $x_0$  и  $\varphi$  не совпадают с реальными. Наблюдаемые отступления от теории свидетельствуют о необходимости дополнительного рассмотрения механизма формирования фрактографического рельефа. Целью работы явилось изучение возможности слияния ступенек в связи с энергией дислокационной системы и влияния на этот процесс кривизны фронта разрушения.

Вершина трещины представлялась в виде кусочно-прямолинейной конфигурационной дислокации (рис. 1,а). Горизонтальные участки отвечали разрушению по спайности, наклонные участки моделировали ступени скола, составляющие в ШГК углы  $45$  и  $135^\circ$  с поверхностью раскола. При расчетах использовалась вторая ориентация. Проекция общей длины дислокационного отрезка на плоскость скола выбиралась постоянной. Искривление линии фронта задавалось изменением угла  $\alpha$  от  $0$  до  $90^\circ$  (рис. 2,а). В каждой серии вычислений варьировался интервал между ступеньками  $l_3$ , а их высота и величина угла  $\alpha$  оставались неизменными. Сближение или удаление ступенек происходило синхронно, т.е. размеры крайних участков все время оставались равными друг другу. Расстояние  $l_3$  менялось от  $2$  до  $480$  мкм, а высота ступенек варьировалась в пределах  $h = 0.02 \div 10$  мкм. Выбор нижней границы изменения  $h$  определялся уровнем, за которым невозможна проверка полученных результатов оптическими средствами. Верхний предел устанавливался с учетом того, что при  $h \gtrsim 10$  мкм ступени уже не имеют четкой кристаллографической огранки и представление их прямолинейным отрезком становится неприемлемым.

Как известно [6], полная энергия кусочно-прямолинейной конфигурации, состоящей из отрезков  $C_i$  с векторами Бюргерса  $b_i$ , представляет собой сумму собственных энергий  $W_{c_i}$  ее частей и энергии взаимодействия отдельных элементов друг с другом  $W_{ij}$  и может быть записана в виде

$$W = \sum_i W_{c_i} + \sum_{i < j} W_{ij},$$

где обозначение  $i < j$  показывает, что каждая энергия взаимодействия учитывается лишь один раз. Выражения для  $W_{c_i}$  и  $W_{ij}$  получены в [6].

Дислокация, моделирующая вершину границы, имела краевую ориентацию. Исключение составляли участки, имитирующие ступени скола и содержащие компоненту кручения. Вычисление энергии дислокационной системы проводилось на IBM-PC (язык программирования «Паскаль»). Полученные значения нормировались на коэффициент  $\mu b^2 / 4\pi(1-\nu)$ . Критерием в решении вопроса о целесообразности слияния ступенек служило стремление системы к состоянию с минимальной энергией.

Результаты расчетов представлены на рис. 1, 2. Средний наблюдаемый интервал  $l_3$  обычно составляет 10–30 мкм, максимальные значения не превышают 100 мкм, поэтому рассмотрим фрагменты графиков, ограниченные  $l_3 < 100$  мкм.

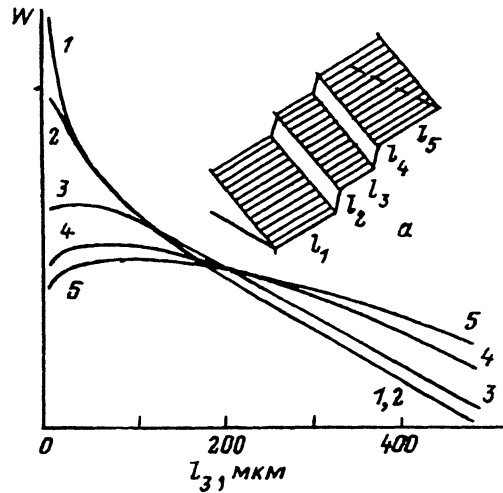


Рис. 1. Зависимость  $W = f(l_3)$  при прямом фронте ( $\alpha = 0$ ) и различной высоте ступеней  $h$ .

$h = 0.02$  (1),  $0.2$  (2),  $2$  (3),  $6$  (4),  $10$  мкм (5).  
 $W_{\max} = 8849$ ,  $W_{\min} = 7976$ .  
 а — конфигурация дислокационного отрезка при  $\alpha = 0$ .

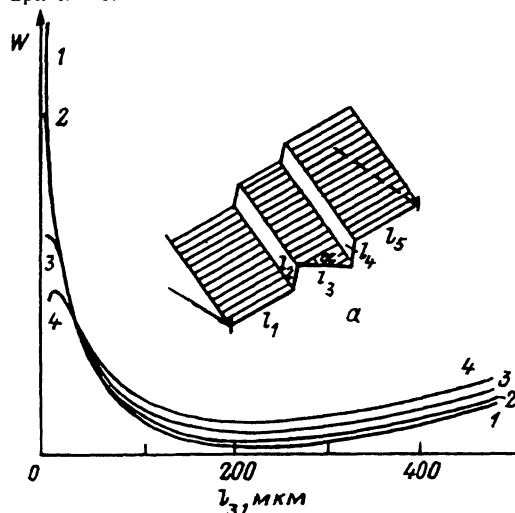


Рис. 2. Зависимость  $W = f(l_3)$  при искривленном фронте ( $\alpha = 18^\circ$ ) и различной высоте ступеней  $h$ .

$h = 0.2$  (1),  $2$  (2),  $6$  (3),  $10$  мкм (4).  
 $W_{\max} = 8466$ ,  $W_{\min} = 8288$ .  
 а — конфигурация дислокационного отрезка при  $\alpha > 0$ .

а) П р я м о й ф р о н т. Если проекция фронта на поверхность разрушения линейная ( $\alpha = 0$ ), а ступени равны по величине ( $l_2 = l_4$ ), кривые  $W = f(l_3)$  имеют максимум. Это означает, что система может переходить в состояние с меньшей энергией путем сближения или удаления ступеней. Чем меньше высота ступеней, тем на более близких расстояниях они будут тяготеть друг к другу. В частности, для  $h = 0.2$  мкм сближение будет происходить на расстояниях  $l_3 < 2$  мкм, а для  $h = 10$  мкм — при  $l_3 < 60$  мкм.

С возрастанием  $h$  происходит сглаживание максимумов. В результате появляются горизонтальные участки, на которых изменение энергии составляет менее 0.04%.<sup>1</sup> В этих условиях изменение расстояния между ступенями практически не влияет на энергию системы и становится возможным их независимое параллельное движение.

Таким образом, при  $\alpha = 0$  на поверхности разрушения возможны два типа рельефа: сливающиеся и расходящиеся ступеньки (речной узор) и система параллельных линий. Сразу после пересечения трещиной субграницы высота ступенек и расстояния между ними малы — единицы и десятки ангстрем соответственно. Здесь будет происходить слияние. При этом высота ступенек и расстояние между ними постепенно увеличиваются и по достижении  $h \sim 0.5$  мкм и  $l_3 = 10-25$  мкм становится возможным их параллельное распространение.

б) К р и в о й ф р о н т. Основное отличие — исчезновение горизонтальных участков на графиках в области  $l_3 = 0-100$  мкм (рис. 2). Ступени теперь могут только сливаться или удаляться друг от друга (речной узор). По мере увеличения  $\alpha$  форма зависимости меняется и при  $\alpha \approx 90^\circ$  вырождается в прямую. При этом ступени могут только сливаться.

Сравним результаты расчетов с экспериментом. Как показали выполненные нами оптические исследования (LiF, NaCl), пересечение прямым фронтом трещины любого дислокационного скопления всегда сопровождается слиянием ступенек. Затем на расстояниях в несколько сотен микрон этап объединения прекращается, и далее ступени идут параллельно друг другу. Двигаясь таким образом, они могут проходить до тысяч микрон. Именно такая последовательность развития рельефа следовала и из анализа теоретических графиков. Наблюдается согласование между численными и оптическими данными и по порядку величин  $h$  и  $l_3$ . Если вершина трещины имеет криволинейную форму ( $\alpha > 0$ ), на всем протяжении своего движения она оставляет за собой только ручьевого узор (и в эксперименте, и в теории).

#### Список литературы

- [1] Fisher F.C. // Acta Met. 1954. V. 2. P. 9.
- [2] Gilman J.J. // Acta Met. 1955. V. 3. P. 277.
- [3] Gilman J.J. // J. Appl. Phys. 1958. V. 29. P. 747.
- [4] Фридель Ж. Атомный механизм разрушения. М.: Металлургиздат, 1963. С. 504-533.
- [5] Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. 644 с.
- [6] Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 600 с.

Ростовский-на-Дону институт  
автоматизации и технологии машиностроения

Поступило в Редакцию  
22 февраля 1993 г.

<sup>1</sup> Для сравнения отметим, что разброс значений  $W$  для ступеней различной высоты варьируется от 2.5 до 11%.