

тер связей препятствует сдвиговому движению, а также мешает перемещению одного атома вслед за другим, как это имеет место при движении дислокаций в решетке. Разрушение начинается прежде, чем дислокации могут обеспечить достаточно большие сдвиги, поскольку их движение затруднено по сравнению с движением дислокаций в металлах. Ионные кристаллы гораздо более пластичны, если они совершенно чистые (обычные кристаллы могут быть и хрупкими из-за наличия внедренных в них дефектов). Электростатические силы — ненаправленные, и потому ионы могут перемещаться с места на место в той мере, в какой этому мешают их размеры. Металлы, как мы видели выше, наиболее пластичны: в них возможно свободное перемещение дислокаций.

Все существующие методы упрочнения (наклеп при прокатке, легирование, термообработка и др.) связаны с увеличением плотности дислокаций и позволяют повысить прочность до значений порядка $10^{-3} G$. Более заманчивым является получение бездефектных кристаллов, которые должны обладать прочностью, близкой к теоретической. Такие бездислокационные нитевидные кристаллы (или «усы») сейчас выращивают при больших пересыщениях искусственным путем из железа, германия, золота, олова, кадмия, никеля, меди и др. Диаметр «усов» порядка 100 нм. Преимущественный спиральный рост «усов» в одном направлении связан с тем, что они содержат одну единственную винтовую дислокацию. Наличие одной такой дислокации не снижает прочности, так как при растяжении кристалла напряжение сдвига на нее не действует. «Усы» обнаруживают колоссальную прочность. Медь выдерживает нагрузку $5,9 \cdot 10^9$ Па вместо привычных $1,8 \cdot 10^8$ Па, а железо — $1,4 \cdot 10^{10}$ Па вместо $2,5 \cdot 10^9$ Па. Упругая деформация может достигать нескольких процентов, в то время как у обычных кристаллов она не превышает сотых долей процента (см. табл. 4.1). Длина выращиваемых сейчас «усов» не превышает нескольких миллиметров. К сожалению, попытки увеличить длину «усов» приводят к катастрофическому снижению прочности. Однако даже такие небольшие «усы» вполне годятся для изготовления, например, подвесов чувствительных приборов, «усы» можно заливать связующим пластиком и получать материалы, прочность которых, хотя вдвое меньше, чем у чистых «усов», но все равно чрезвычайно велика.

4.5. ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ

До сих пор мы говорили о вязком разрушении твердых тел, которому предшествует значительная пластическая деформация, при этом разрушение происходит в том месте образца, где образуется «шейка» весьма малого сечения (см. рис. 4.2). Кроме вязкого разрушения твердые тела могут испытывать хрупкое

разрушение, наступающее после малой предварительной пластической деформации или вообще без нее. Хрупкое разрушение наблюдается часто у неметаллов и у многих металлов при очень низких температурах (исключение составляют металлы с ГЦК-решеткой).

В идеальном случае считают, что хрупкое разрушение должно происходить в результате мгновенного разрыва межатомных связей по плоскости, перпендикулярной действующему нормальному напряжению. Оценка теоретического напряжения (теоретической прочности), при котором должно происходить хрупкое разрушение, показывает, что эта величина одного порядка с модулем нормальной упругости E (так же, как теоретическое сопротивление сдвигу — одного порядка с модулем сдвига G), а именно

$$\sigma_{\text{теор}} \approx E/10. \quad (4.41)$$

Более точным является значение теоретической прочности

$$\sigma_{\text{теор}} = (\gamma_s E/a)^{1/2}, \quad (4.42)$$

где γ_s — удельная поверхностная энергия; a — межатомное расстояние.

Пользуясь формулой (4.41), оценим величину $\sigma_{\text{теор}}$ для стекла. Так как для стекла $E = 8 \cdot 10^{10}$ Па, то $\sigma_{\text{теор}} = 8 \cdot 10^9$ Па. Техническая же или реальная прочность стекла равна $8 \cdot 10^7$ Па, т. е. она на два порядка ниже теоретической. Такая ситуация имеет место для большинства твердых тел.

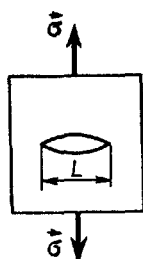
Первая попытка объяснить указанное расхождение была сделана А. Гриффитсом (1920). Для объяснения низкой прочности стекла он предположил, что в твердом теле существуют микротрещины, которые могут играть роль концентраторов напряжений. Гриффитс описал хрупкое разрушение твердого тела как процесс превращения упругой энергии, сосредоточенной в объеме твердого тела при приложении нагрузки, в поверхностную энергию его частей, образовавшихся при разрушении, ему же принадлежит и метод расчета технической прочности твердых тел. Рассмотрим схему этого расчета.

Допустим, что к пластине единичной толщины приложено растягивающее напряжение σ . Тогда в единичном объеме пластины без трещины запасенная упругая энергия

$$1/2 \sigma \varepsilon = 1/2 \sigma^2/E. \quad (4.43)$$

При внезапном возникновении в теле поперечной трещины длиной L (рис. 4.18) высвобождается упругая энергия в зоне плоской эллипсоидальной трещины (полуоси эллипса L и $L/2$), т. е. в области объемом $\pi L^2/2$. Упругая энергия пластины уменьшается на

$$W = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \frac{\pi L^2}{2} = \frac{\pi \sigma^2 L^2}{4E}. \quad (4.44)$$



Возникновение трещины сопровождается образованием двух новых поверхностей с удельной поверхностной энергией γ_s , что требует затраты энергии

$$U = 2\gamma_s L. \quad (4.45)$$

Полное изменение энергии пластины, связанное с образованием трещины:

$$T = U - W = 2\gamma_s L - \frac{\pi \sigma^2 L^2}{4E}. \quad (4.46)$$

Рис. 4.18. Трещина по Гриффитсу

Если длина трещины такова, что $\partial T / \partial L = 0$, то трещина находится в состоянии неустойчивого равновесия. Трещина большего размера быстро распространяется, так как упругая энергия при увеличении L уменьшается быстрее, чем увеличивается поверхностная энергия. Трещина меньшего размера расти не будет и вовсе закроется, поскольку в этом случае, наоборот, поверхностная энергия уменьшается быстрее, чем возрастает упругая энергия.

Критический размер трещины находим, приравнявая нулю производную $\partial T / \partial L$:

$$L_{кр} = 4\gamma_s E / (\pi \sigma^2). \quad (4.47)$$

Из формулы (4.47) следует оценка напряжения, достаточного для того, чтобы тело, содержащее трещину с размером $L_{кр}$, разрушилось:

$$\sigma = 2 \left(\frac{\gamma_s E}{\pi L} \right)^{1/2}. \quad (4.48)$$

Условие нестабильного роста трещины было найдено Гриффитсом без рассмотрения напряженного состояния у кончика трещины, вблизи которого концентрируются напряжения. В настоящее время известно, что острая трещина с радиусом в вершине, равным межатомному расстоянию a , приводит к локальному повышению напряжения до значения

$$\sigma_{\max} = \sigma (1 + 2\sqrt{L/2a}). \quad (4.49)$$

Комбинируя (4.49) с (4.42) при $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{теор}}$, получим

$$\sigma = \left(\frac{\gamma_s E}{2L} \right)^{1/2}. \quad (4.50)$$

Это означает, что если в твердом теле имеется трещина длиной L с радиусом у вершины, равным a , то при достижении величины приложенного напряжения σ локальное напряжение у вершины трещины достигнет теоретического значения $\sigma_{\text{теор}}$ и трещина распространяется вплоть до разрушения пластины, если в силу каких-то причин трещина не притупится.

Заметим, что теория Гриффитса в ее первоначальной форме

неприменима к металлам, поскольку в них вряд ли можно создать такие условия, при которых пластическое течение было бы полностью исключено. Как показал Е. Орован, учет энергии пластической деформации может производиться в рамках соотношений, полученных Гриффитсом. Для этого в формулу (4.48) для расчета разрушающего напряжения вместо удельной поверхностной энергии γ_s необходимо ввести энергию пластической деформации γ_p :

$$\sigma = 2 \left[\frac{(\gamma_p + \gamma_s) E}{\pi L} \right]^{1/2} \quad (4.51)$$

В подавляющем большинстве случаев экспериментальная проверка этой формулы подтвердила ее правильность.

Важным вопросом является зарождение и рост трещин, являющихся причиной хрупкого разрушения. Трещины могут возникать в процессе получения твердого тела и особенно при его механической обработке. Существует несколько возможных механизмов зарождения трещин при приложении к твердому телу механического напряжения.

Опишем качественно дислокационный механизм, предложенный А. Стро и Н. Моттом. Представим себе, что к кристаллу приложено растягивающее напряжение, вызывающее в нем скольжением краевых дислокаций вдоль какой-то плоскости скольжения (рис. 4.19). Пусть на пути движущихся дислокаций встретится непреодолимый для них барьер (граница зерен, места пересечений плоскостей скольжения дислокаций и др.). Если температура, при которой происходит процесс, невысока, то головная дислокация у барьера остановится, движущаяся за ней дислокация начнет как бы «наваливаться» на нее и она будет испытывать при этом давление. Если у препятствия затормозится ряд следующих друг за другом n дислокаций, то головная дислокация будет испытывать напряжение, n — кратно превосходящее внешнее. Это напряжение может оказаться настолько большим, что превзойдет прочность кристалла и вблизи головной дислокации зародится клиновидная трещина, которая возникает вследствие объединения ближайших к препятствию дислокаций.

Итак, наличие микротрещин в объеме образца оказывает определяющее влияние на прочность твердых тел.

Состояние поверхности образца (наличие трещинок, царапин) и среда, в которой он находится, также оказывают большое влияние на прочность. Так, еще

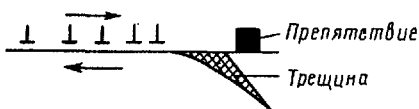


Рис. 4.19. Образование трещины под действием нормальных напряжений

А. Ф. Иоффе показал, что после погружения кристаллов поваренной соли в воду ее прочность на разрыв возрастает с $4,9 \cdot 10^6$ до $1,6 \cdot 10^9$ Па, т. е. прочность после операции погружения становится близкой к теоретической.

Присутствие в окружающей среде поверхностно-активных веществ, способных сильно адсорбироваться, снижает поверхностную энергию. Частицы, адсорбированные на поверхности, распирают зародышевые трещинки, проникают в глубь тела и разрушают его разрывную прочность. Для уменьшения влияния трещинок и царапин на прочность необходимо либо их «залечивать», либо каким-то способом от них избавляться. Самый простой способ — удаление поверхностного слоя в подходящем травителе. В настоящее время все большее применение находит способ, связанный с облучением приповерхностного слоя твердого тела ускоренными ионами либо инертных элементов, либо ионами металлов с соответствующим температурным отжигом, в результате чего происходит залечивание трещинок и царапин.

Итак, предел прочности твердых тел еще далек, и нужна огромная и кропотливая работа для его достижения. Эта работа, в частности, касается развития количественной теории дислокаций, требует окончательной разгадки механизма образования «усов», изучения влияния малых примесей на процессы деформации и разрушения. Злободневной проблемой является проблема получения материалов особой чистоты, поскольку большинство физических свойств твердых тел (не только механических) определяется присутствующими в них примесями.

ГЛАВА 5

КОЛЕБАНИЯ АТОМОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

В твердом теле атомы при любой температуре, включая 0 К, непрерывно совершают колебания около их среднего положения равновесия. При небольших амплитудах такие колебания можно считать гармоническими. С повышением температуры амплитуды и энергии этих колебаний увеличиваются. Так как атомы в твердом теле сильно связаны друг с другом, то возбуждение колебаний одного из атомов передается ближайшим атомам, которые, в свою очередь, передают это возбуждение своим соседям и т. д. Этот процесс подобен процессу распространения звуковых волн в твердом теле. Все возможные колебания сильно связанных между собой атомов можно представить как совокупность взаимодействующих упругих волн различной длины, распространяющихся по всему объему кристалла. Так как твердое тело ограничено по размерам, то