Доклады Академии Наук СССР
1953. Том XCIII, № 4

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Н. С. ФАСТОВ

О ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ НА ГРАНИЦАХ БЛОКОВ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ

(Представлено академиком И. П. Бардиным 5 X 1953)

В процессе пластической деформации происходит разделение кристалла системой плоскостей скольжения на пластинки скольжения, которые, в свою очередь, разделены на упруго-напряженные блоки — области когерентного рассеяния рентгеновских лучей. Величина блоков (как и пластинок скольжения) зависит от степени деформации и при больших деформациях, когда упрочнение металла уже прекратилось (или почти прекратилось), достигает по порядку величины нескольких сот ангстрем.

Одновременно с упруго-напряженными блоками при пластической деформации возникают значительные, беспорядочные искажения решетки — искажения III рода. Последние, в основном, обусловливают энергию остаточных напряжений (примерно на 98—99%), которая по калориметрическим измерениям достигает нескольких калорий на грамм.

Указанные представления о структуре пластически деформированного металла являются хотя и весьма вероятными, но не достоверными. Они возникли как результат интерпретации рентгенограмм пластически деформированного металла, что может оказаться неоднозначным. Однако большинство исследователей придерживается вышеуказанных модельных представлений.

Некоторые авторы высказывают предположение о том, что область, занимаемая искажениями решетки III рода, расположена, в основном по границам блоков и пластинок скольжения ([1]). Если последнее предположение правильно, то подавляющая часть энергии, приобретенной металлом в процессе пластической деформации, сосредоточена по границам блоков и пластинок скольжения. Принимая последнее предположение можно вывести ряд следствий.

Рассмотрим поверхностную энергию блоков и пластинок скольжения. Величины поверхностной энергии, приходящейся на 1 см², удельные поверхностные энергии α по границам блоков и пластинок скольжения могут значительно отличаться друг от друга. Однако всю энергию, сосредоточенную по границам блоков и пластинок скольжения, можно отнести к поверхности только блоков и рассматривать среднюю удельную поверхностную энергию блоков $\bar{\alpha}$, т. е. рассматривать величину

$$\bar{\alpha} = \frac{E_{\text{пов}}}{S}, \tag{1}$$

где $E_{\text{пов}}$ — общая поверхностная энергия, S — полная поверхность блоков.

Если средний размер блоков l, то поверхностная энергия, приходящаяся на один блок, будет

$$E'_{\text{нов}} \cong w\rho l^3,$$

где w — энергия остаточных напряжений на 1 г, ρ — плотность металла.

Поверхность, приходящаяся на один блок

$$S' \sim 3l^2,$$

следовательно,

$$\bar{\alpha} \approx \frac{w\rho l}{3}. \tag{2}$$

Подсчет $\bar{\alpha}$ по этой оценочной формуле дает для нее значение несколько сот эрг/см^2.

Оценим относительный объем, занимаемый областью искажений решетки III рода.

При пластической деформации часть атомов из своих правильных положений в узлах кристаллической решетки, отвечающих абсолютному минимуму потенциальной энергии, переходит в другие, неправильные положения, отвечающие относительному минимуму потенциальной энергии. Вследствие этого решетка искажается, а металл переходит в метастабильное состояние. На рис. 1 схематически показана зависимость потенциальной энергии атома E от величины его смещения x из узла кристаллической решетки. Точка A рис. 1 соответствует положению атома в узле кристаллической решетки, точка C — его неправильному положению.

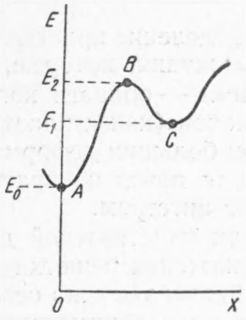

Рис. 1

При разупрочнении вследствие теплового движения атомы искаженной решетки из своих неправильных положений переходят в правильные, преодолевая разделяющие эти положения потенциальные барьеры, высота которых E_2—E_1. Разупрочнение сопровождается выделением некоторого количества тепла Q. Скорость разупрочнения характеризуется энергией активации разупрочнения, которая по порядку величины составляет несколько десятков тысяч калорий на моль и определяется высотой потенциального барьера E_2—E_1.

Количество выделенного тепла при полном разупрочнении (оно равно энергии остаточных напряжений) определяется разностью глубин потенциальных ям $E_1 - E_0$ и величина его — порядка 100 кал. на моль.

Разность глубин потенциальных ям $E_1 - E_0$ и высота потенциального барьера $E_2 - E_1$ сравнимы между собой, т. е. являются величинами одного и того же порядка. Это следует из того, что энергия активации самодиффузии в несколько раз больше энергии активации разупрочнения. Кроме того, энергия активации разупрочнения может значительно меняться (от наличия примесей). Следовательно,

$$E_1 - E_0 \approx E_2 - E_1. \tag{3}$$

Поэтому, если бы все атомы металла находились в точке C рис. 1, то энергия искаженной решетки достигала бы по порядку величины энергии активации разупрочнения, т. е. несколько десятков тысяч калорий на моль; в действительности она достигает порядка ста калорий на моль. Следовательно, относительный объем искаженной решетки может достигать максимально, при больших деформациях (и при обычных температурах), величины порядка 0,01.

Минимальный размер блоков достигает величины порядка 100 междуатомных расстояний, т. е. блок содержит $\sim 10^6$ атомов. Число атомов, находящихся на поверхности блока, порядка 10^4, или 0,01 числа атомов, содержащихся в блоке. Отсюда следует считать, что толщина поверхностного слоя на границах блоков составляет 1—2 междуатомных расстояний.

Энергия искаженной решетки в единице объема W в зависимости от внешне приложенной нагрузки равна [2].

$$W = \rho w = \lambda \frac{\sigma^2 - \sigma_s^2}{2E}, \tag{4}$$

где σ — напряжение; σ_s — величина, близкая к пределу текучести; E — модуль упругости; λ — материальная постоянная (безразмерная), равная нескольким десяткам.

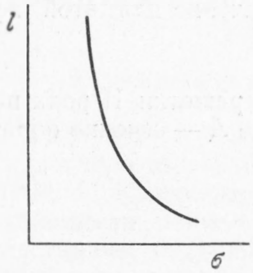

Рис. 2

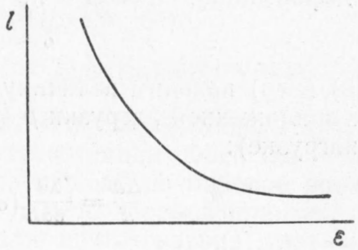

Рис. 3

Если $\overline{\alpha}$ практически не зависит от степени деформации, то из (2) и (4) можно найти средний размер блоков в зависимости от напряжения σ:

$$l \approx \frac{6\overline{\alpha}E}{\lambda\left(\sigma^2 - \sigma_s^2\right)}. \tag{5}$$

При выводе (2) и (5) предполагалось, что в недеформированном металле размеры блоков когерентного рассеяния бесконечны, т. е. не учитывалась мозаичная структура. Если размер мозаичных блоков в недеформированном металле l_0, то вместо (5) будем иметь

$$l \approx \frac{\overline{\alpha} l_0}{\overline{\alpha} + \frac{\lambda l_0}{6E}\left(\sigma^2 - \sigma_s^2\right)}. \tag{5'}$$

Однако ввиду небольшой точности определения размера блоков в пластически деформированном металле, особенно при больших размерах блоков, с достаточной степенью точности можно пользоваться уравнением (5).

Схематически зависимость средней величины блоков l от напряжения $\sigma(\varepsilon)$ и от деформации ε приведена, соответственно, на рис. 2 и 3. В настоящее время нет экспериментальных данных по зависимости l от σ для однородного напряженного состояния, и имеется только одна работа по определению зависимости l от ε для однородного напряженного состояния [3]. Однако ввиду того, что теоретически размер блоков l связывается с приложенным напряжением, а не с величиной деформации, количественное сравнение теории с опытными данными, приведенными в [3], затруднительно. Экспериментальная кривая по зависимости l от ε при растяжении, приведенная в [3], качественно сходна с теоретически рассчитанной кривой.

Поскольку было предположение, что средняя удельная поверхностная энергия блоков $\overline{\alpha}$ существенно не меняется от степени деформации, то искажения решетки по границам блоков в процессе деформирования также не должны меняться. Отсюда можно сделать предположение, что все блоки в среднем растягиваются (и сжимаются) на одну и ту же величину

$$\delta = \frac{\Delta a}{a} l, \tag{6}$$

где $\Delta a/a$ — среднее значение абсолютных значений деформаций упруго-напряженных блоков. Это означает, что величина искажений II рода в решетке в среднем такая, какая получилась бы при смещении границ блоков на одну и ту же величину δ, независимо от размера блоков l. Б. М. Ровинский и Л. М. Рыбакова ([3]) действительно обнаружили, что произведение средней величины упругой деформации блоков $\varepsilon_{бл} = \Delta a/a$ на среднюю величину блоков почти не зависит от величины деформации. Последнее обстоятельство косвенно подтверждает предположение о том, что средняя удельная поверхностная энергия блоков практически не меняется от степени деформации. Оценка δ по (6) дает значение для этой величины

$$\delta \sim 10^{-8} \text{ см}.$$

Из (5) и (6) находим величину искажений решетки II рода в зависимости от приложенной нагрузки p ($\sigma = p/A$, где A — сечение образца при данной нагрузке):

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\lambda\delta}{6\alpha E}\left(\sigma^2 - \sigma_s^2\right). \tag{7}$$

Следовало бы поставить эксперименты по количественной проверке формул (5), (6) и (7).

Институт металловедения и физики металлов
ЦНИИЧМ

Поступило
5 X 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Г. С. Жданов, Я. С. Уманский, Рентгенография металлов, ч. II, М.—Л., 1938. [2] Н. С. Фастов, ДАН, 92, № 6 (1953). [3] Б. М. Ровинский, Л. М. Рыбакова, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1952).