

МЕЖУЗЕЛЬНЫЙ (КРАУДИОННЫЙ) МЕХАНИЗМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ

В.А.Инденбом

Краудионь — межузельные атомы, движущиеся вдоль плотноупакованных направлений, равно как и другие возможные конфигурации межузельных атомов, хорошо известные в радиационной физике, по традиции не принимаются во внимание в физике пластичности. Предполагается, что благодаря высокой энергии образования этих дефектов их концентрация пренебрежимо мала по сравнению с концентрацией других точечных дефектов решетки. В процессах диффузии, в частности, определяющую роль обычно приписывают вакансиям, а не межузельным атомам. Последние заставляют, однако, провести переоценку роли межузельных атомов в процессах пластичности и разрушения и позволяют уточнить ранее высказывавшиеся нами гипотезы [1] о возможных условиях осуществления и макроскопического проявления межузельного механизма переноса масс.

Заметим, что любой вакансионный сток при достаточном понижении температуры и повышении напряжений должен превратиться в источник межузельных атомов (направление переноса масс при этом остается прежним). Пусть химический потенциал вакансий вблизи стока понижен (а химический потенциал межузельных атомов повышен) на величину $\Delta\mu = \gamma\sigma$, где σ — величина напряжения, γ — активационный объем (прирост деформации при поглощении одной вакансии или рождении одного межузельного атома). Тогда равновесная концентрация вакансий вблизи стока будет понижена (а равновесная концентрация межузельных атомов повышена) в $\exp(\Delta\mu/kT)$ раз. При $\Delta\mu \gg kT$ поток вакансий к стоку почти не зависит от напряжения, а встречный поток межузельных атомов экспоненциально нарастает с напряжением и может превзойти по своей эффективности перенос масс вакансиями. Переход от вакансионного к

межузельному механизму переноса масс происходит при

$$\Delta \mu = U_D^M - U_D^V - s kT. \quad (1)$$

Здесь U_D^M и U_D^V — соответственно энергии активации самодиффузии по междузельному и вакансионному механизму, $s = \ln(D_0^M/D_0^V \eta)$, где D_0^M и D_0^V — предэкспоненциальные факторы в коэффициентах самодиффузии по междузельным и вакансиям, η — вакансионное пересечение вдали от стока. При низких температурах смена механизма диффузии достигается при напряжении

$$\sigma^* = \gamma^{-1}(U_D^M - U_D^V). \quad (2)$$

При повышении температуры критическое напряжение σ^* понижается с температурным коэффициентом $s \gamma^{-1} k$. Оценка параметра s для различных вариантов вакансионных стоков дает значение порядка нескольких единиц, разность $U_D^M - U_D^V$ обычно не превышает 1 эВ . Поэтому подавление обычного вакансионного механизма диффузии и превращение вакансионных стоков в междузельные источники отнюдь не является экзотическим событием.

По нашей просьбе Е.Н.Рожанский с сотрудниками проверил существование междузельного переноса масс при локальной деформации, когда напряжения приближаются к теоретической прочности материала, и критерий (1) может удовлетворяться при упорядка атомного объема (т. е. для деформации путем непосредственно переноса масс). Оказалось, что междузельные атомы (в данном случае следовало ожидать их появление в наиболее подвижной краудионной конфигурации) действительно выносят из-под индентора значительную часть материала, и их вклад может быть надежно выявлен на фоне движения дислокаций по возникновению междузельных петель вдали от дислокационной розетки [2].

Межузельные атомы должны, очевидно играть заметную роль и в других случаях приложения высоких напряжений (деформирование взрывом, ударные воздействия, высокоскоростная деформация и т. д.). Более того, при низких деформирующих напряжениях междузельные атомы могут возникать в местах высоких локальных внутренних напряжений, неминуемо образующихся в связи с гетерогенностью пластической деформации. Примером могут служить различные дислокационные конфигурации. В случае локальных барьеров, расположенных на расстоянии ℓ вдоль дислокации, $\gamma = \sigma^2 \ell$, где σ — параметр решетки, и приложенное внешнее напряжение эффективно увеличивается в (ℓ/σ) раз. При разумных значениях $\ell \sim 10^2 + 10^3 \sigma$ критерий (1) выполняется для сравнительно невысоких ($1 + 10 \text{ кг/мм}^2$) напряжениях и обычных температурах.

Зависимость интенсивности междузельного потока, вытекающего из бывшего вакансионного стока, от температуры и напряжения описывается выражением $\exp[-(U_D^M - \gamma\sigma)/kT]$, что очень похоже на формулу Журкова [3], описывающую общие закономерности ползучести и долговечности многих материалов в широкой области температур и напряжений. При этом константы U_D^M и γ согласуются с эмпирическими постоянными U_0 и γ в формуле Журкова. Ранее уже отмечалось, что U_0 совпадает с известными теоретическими и экспериментальными оценками энергии междузельных атомов [1, 4] (энергия миграции этих дефектов очень низка). Соответствие γ -параметрам дислокационных сеток было проверено по нашей просьбе Мышляевым [5]. Межузельная трактовка зако-

на Журкова подтверждается также влиянием характера напряженного состояния на энергию активации ползучести и разрушения [6] и прямыми опытами по определению типа неравновесных точечных дефектов по типу петель, возникающих при закалке деформируемых образцов [7].

В последнее время были обнаружены предсказываемые межузельной гипотезой аномалии в ходе кривых ползучести и долговечности: при $\sigma = \sigma^*(T)$ действительно прекращалась линейная зависимость энергии активации от напряжения, эта энергия резко понижалась на величину $s k T$ и достигала уровня U_D^V [8]. Значение постоянной s оказалось в хорошем согласии с макроскопической оценкой этой величины по балансу межузельных и вакансионных потоков. Для окончательного установления межузельного механизма с точки зрения фундаментальных явлений как ползучесть и долговечность кристаллических материалов необходимы, конечно, прямые опыты по определению концентрации межузельных атомов и конкретизация типа вакансионных стоков, превратившихся в межузельные источники. Такими стоками, в частности, могут быть не только ступеньки на дислокациях, неконсервативно мигрирующие вслед за дислокациями, но и зародышевые трещины или поры.

Заметим, что межузельная гипотеза в общем (некраудинном) варианте допускает очевидное обобщение на случай некристаллических тел, поскольку энергия образования и миграции межузельных атомов во всех конфигурациях, кроме краудинной, зависит лишь от ближнего порядка в расположении атомов.

В заключении автор выражает глубокую благодарность С.Н.Журкову, А.Н. Орлову и Б.Р.Регелю за многочисленные дискуссии по проблеме и М.М.Мышляеву, Б.А.Степанову и Б.Б.Шпейзману за постановку экспериментальной проверки межузельной гипотезы.

Институт кристаллографии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 октября 1970 г.

Литература

- [1] Б.Л.Инденбом. Сб. Физика щелочно-галогидных кристаллов, Рига, 1962; Деформационное упрочнение, изд. ФТИНТ АН УССР, Харьков, 1969; Intern. Conf. on Crystal Lattice Defects, abstr. I-11, Kyoto, Japan 1962; Б.Л.Инденбом, А.Н.Орлов. УФН, 76, 557, 1962.
- [2] Б.Б.Рожанский, М.П.Назарова и др. Деформационное упрочнение, изд. ФТИНТ АН УССР, Харьков, 1969; Phys. Stat Sol., 1970, в печати; VII Congress Internat de Microscopie Electronique, Grenoble, France, 2, 585, 1970.
- [3] С.Н.Журков. Вестник АН СССР, 27, 78, 1957; 38, 46, 1968.
- [4] Б.Л.Инденбом, А.Н.Орлов. Проблемы прочности, №12, 1970.
- [5] М.М.Мышляев. ФТТ, 7, 591, 1965.
- [6] И.Е.Куров, Б.А.Степанов, Б.Б.Шпейзман. Сб. Физика металлов и металловедение, Труды ЛПИ, №305, стр. 71, 1969.
- [7] М.М.Мышляев, С.С.Олевский, Г.Б.Елашвили, Б.А.Лихачев. ДАН СССР, 191, 1022, 1970; М.М.Мышляев, С.С.Олевский, С.И.Максимов, Б.А.Лихачев, Г.Б.Елашвили. Phys. Stat. Sol. в печати.
- [8] Б.А.Степанов, Б.Б.Шпейзман. ФММ, 29, 375, 1970; М.М.Мышляев, Б.А.Степанов, Б.Б.Шпейзман. Phys. Stat. Sol., в печати.