

тизма, является устойчивым, так как соответствует условию минимума функционала энергии.

В настоящей работе показано, что при отсутствии стабилизирующих факторов

1) полосовые домены со 180° -ными ДС являются неустойчивым образованием,

2) при $Q_1 \leq 2$ доменная структура как таковая отсутствует: пленка однородно намагничена в своей плоскости,

3) при $Q_1 \geq 4$ появляются чередующиеся «нормальные» и «плоскостные» домены приблизительно одинаковой ширины, и так как при переходе от «нормального» домена к «плоскостному» вектор намагниченности разворачивается на 90° , то 180° -ная ДС разбивается на две 90° -ные.

В заключение отметим, что влияние стабилизирующих факторов, например одноосной анизотропии, а также толщины магнитной пленки на ее доменную структуру в настоящее время детально изучается и будет опубликовано в последующих работах.

Авторы выражают благодарность Ф. В. Лисовскому за обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов. М., М., 1983.
2. Пынько В. Г., Кан С. В., Дымпилов Р. М. // VI Международный коллоквиум по тонким магнитным пленкам. Минск, 1973. С. 15.
3. Lilley V. A. // Phil. Mag. 1950. 41, N 318. P. 792.
4. Мяхар В. В. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 1976.
5. Антонов Л. И., Осипов С. Г., Хапаев М. М. // ФММ. 1983. 55, № 5. С. 917.
6. Антонов Л. И., Терновский В. В., Хапаев М. М. // ФММ. 1989. 67, № 1. С. 52.
7. Браун У. Ф. Микромагнетизм. М., 1979.
8. Антонов Л. И., Журавлев С. В., Лукашева Е. В., Матвеев А. Н. // ФММ. 1992. 12. С. 23.
9. Антонов Л. И., Лукашева Е. В., Мухина Е. А. // ФММ. 1995. 80, № 2. С. 5.

Поступила в редакцию
24.02.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 2

УДК 548.4:534

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭВОЛЮЦИЮ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ПЕТЕЛЬ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

О. В. Бубновская, Д. Л. Леготин, Н. А. Тяпунина

(кафедра молекулярной физики и физических измерений)

При помощи метода компьютерного моделирования исследована эволюция скользящих дислокационных петель под действием ультразвука с учетом неоднородных по пространству полей внутренних напряжений. Установлено, что под действием ультразвука происходит аннигиляция всех петель, а наличие неоднородных полей напряжений приводит к изменению времени жизни петель и нарушению их радиальной симметрии. Уменьшение или увеличение времени жизни зависит от взаимного расположения петли и источника неоднородного поля.

Введение

Известно, что под действием ультразвука система структурных дефектов переходит в возбужденное состояние, что оказывает существенное влияние на структурно-чувствительные свойства материалов [1]. Для лучшего понимания процессов, происходящих в кристаллах при ультразвуковом воздействии, важно знать, как ведут себя в ультразвуковом поле характерные элементы дислокационной структуры. К числу последних следует отнести замкнутые дислокационные петли, которые, как показывают многочисленные экспериментальные данные, могут присутствовать в достаточно больших количествах в материалах, подвергавшихся облучению, закаливанию, действию сосредоточенной нагрузки, деформации ультразвуком [2, 3].

Экспериментально эволюция дислокационных петель под действием ультразвука изучалась, насколько нам известно, в единственной работе [4]. В кристалл LiF петли с радиусами 4—30 мкм вводили путем прокатывания стальных шариков по поверхности образцов. Было установлено, что под действием ультразвука петли со значением радиусов, превышающим 8 мкм, расширялись; петли с меньшими значениями начальных радиусов аннигилировали.

Экспериментальное наблюдение дислокационных структур обычно проводится только до и после ультразвукового воздействия на образец. Метод компьютерного моделирования позволяет изучать эволюцию дислокационных петель в процессе ультразвукового нагружения. При помощи метода ЭВМ-моделирования радиально-симметричные дислокационные петли, размер которых много меньше длины волны ультразвука, изучались в [5]. Было показано, что если рассматривать только однородные по пространству поля напряжений, то петли сохраняют круговую форму. Под действием ультразвука в отсутствие внутренних полей напряжений в кристалле все дислокационные петли неизбежно аннигилируют. Время жизни петли зависит от ее начального радиуса и от амплитуды ультразвука [5].

В реальных кристаллах всегда существуют неоднородные по пространству внутренние поля напряжений, создаваемые структурными дефектами. Цель данной работы состояла в изучении влияния неоднородных по пространству полей напряжений на эволюцию замкнутых дислокационных петель произвольной формы под действием ультразвука. Для достижения поставленной цели был использован метод компьютерного моделирования, одним из преимуществ которого является то, что он позволяет изучать процессы, происходящие за промежутки времени порядка периода ультразвуковых колебаний (10^{-5} — 10^{-6} с).

1. Модель и алгоритм

Основное уравнение движения элемента дислокационной петли имеет вид

$$Bv = F_{it} + F_{us} + F_{in} + F_{st}, \quad (1)$$

где B — коэффициент динамического торможения; v — скорость дислокации; F_{it} — сила самодействия; F_{us} — сила, создаваемая ультразвуковым полем; F_{in} — сила, обусловленная неоднородным по пространству полем структурных дефектов; F_{st} — сила типа сухого трения.

Уравнение (1) решали в тех же приближениях, что и в работе [6], где даны уравнение типа (1) в безразмерном виде и выражение

для смещения элемента дислокации. Отличие состоит в том, что в [6] изучали эволюцию петель только в неоднородных по пространству полях. В данном случае в правую часть уравнения (1) введен дополнительный член F_{us} — сила, обусловленная ультразвуковым воздействием, модуль которой равен $F_{us} = b\sigma_0 \sin \omega t$, где b — модуль вектора Бюргерса, σ_0 и ω — амплитуда напряжения и частота ультразвука.

Алгоритм расчета на ЭВМ дислокационной конфигурации в целом подробно приведен в [6]. Напомним, что движение дислокационной петли представлялось в виде последовательности конфигураций с шагом по времени Δt . В начальный момент времени $\tau_0 = 0$ в поле напряжений вносили дислокационную петлю начального радиуса R_0 , затем рассчитывали смещение каждого элемента петли и строили конфигурацию в момент времени $\tau_0 + \Delta t$. Процесс аннигиляции моделировался феноменологически. Если в процессе сжатия петли ее радиус становился равным некоторому заранее выбранному параметру аннигиляции a , то считали, что дислокационная петля перестала существовать. Время жизни дислокационной петли определялось как время, которое просуществовала петля от момента ее введения в кристалл до аннигиляции.

2. Результаты ЭВМ-экспериментов и их обсуждение

Основные закономерности поведения дислокационных петель при совместном действии ультразвука и неоднородного по пространству поля рассмотрим на примере поля, создаваемого прямолинейной винтовой дислокацией.

Моделирование проводили на примере кристаллов NaCl. Дислокационные петли помещали в плоскости XU , которую выбирали таким образом, чтобы она совпадала с одной из плоскостей легкого скольжения из системы $\{110\}$; вектор Бюргерса петли считали направленным вдоль оси U . Прямолинейную винтовую дислокацию располагали вдоль оси Z . При таком выборе системы координат на петлю со стороны прямолинейной дислокации действует компонента напряжения σ_{yz} [2]:

$$\sigma_{yz} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{X}{X^2 + Y^2}. \quad (2)$$

Здесь G — модуль сдвига.

Подробный анализ поля напряжений, создаваемого прямолинейной винтовой дислокацией, дан в [6]. Дислокационные петли размещали в области положительных (область 1) и отрицательных (область 2) значений напряжения поля винтовой дислокации, чтобы проанализировать влияние неоднородных полей разных знаков на эволюцию дислокационных петель. Петли располагали на разных расстояниях от источника поля. При этом варьировался параметр r , равный расстоянию от ближайшей точки петли до оси U . Значения начальных радиусов дислокационных петель R_0 брали в интервале $0,6 R_{cr} \leq R_0 \leq 2,8 R_{cr}$. Здесь R_{cr} — критический радиус; петли, размер которых $R_0 \geq R_{cr}$, могут находиться в кристалле в стационарном состоянии в отсутствие ультразвукового воздействия (для значения стартового напряжения $\sigma_{st} = 0,3$ МПа [7] критический радиус равен $R_{cr} = 12$ мкм).

ЭВМ-моделирование проводилось применительно к условиям натурных экспериментов, в которых ультразвуковое воздействие осуществляется в колебательном режиме, когда в образцах формируется стоячая ультразвуковая волна в килогерцевом диапазоне частот. Час-

тота ультразвука была выбрана равной $f=140$ кГц; амплитуда напряжения ультразвука варьировалась в интервале от 0,1 до 2 МПа.

Значения параметров для кристаллов NaCl были взяты следующие: вектор Бюргера $b=3,99 \cdot 10^{-10}$ м [8]; коэффициент динамической вязкости $B=0,021$ сП [9]; модуль сдвига $G=1,8 \cdot 10^{10}$ Н/м² [8].

Поскольку размер петли много меньше длины волны ультразвука, то наличие ультразвукового поля не должно менять форму петли. Отклонение формы дислокационной петли от круговой обусловлено присутствием неоднородного по пространству поля структурных дефектов. Однозначно характеризовать петлю линейными размерами невозможно, поэтому удобно рассматривать площадь, охватываемую петлей.

Графики зависимостей площади от времени $S(t)$ для петли, находящейся в ультразвуковом поле и в поле прямолинейной винтовой дислокации в областях 1 и 2, приведены на рис. 1 (кривые 1 и 2 соответственно). По оси абсцисс отложено время в относительных единицах τ/T , где T — период ультразвука. Начальный радиус петли равен 10 мкм. Для сравнения на рис. 1 приведена кривая 3, которая соответствует случаю, когда на петлю действует только ультразвук. Рассмотрим основные этапы эволюции петли на примере кривой 2 рис. 1. В нижней части рис. 1 приведена зависимость напряжения ультразвука в относительных единицах σ_{us}/σ_0 от времени. Участок AB кривой 2 соответствует положительному полупериоду ультразвуковых колебаний — петля расширяется. На участке BC дислокационная петля неподвижна вследствие стартового напряжения. Участок CD соответствует отрицательному полупериоду ультразвуковых колебаний — петля

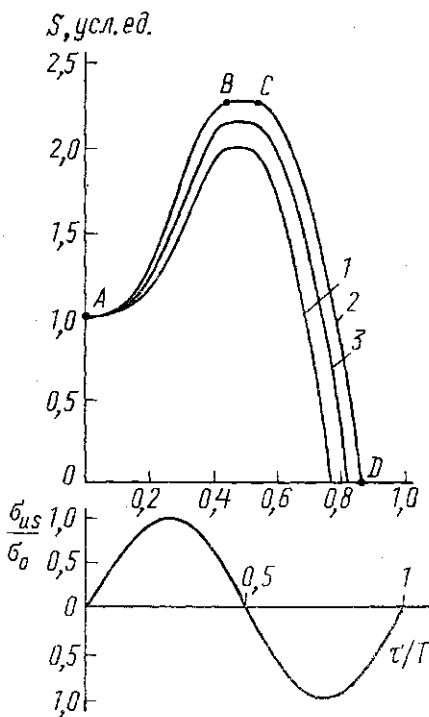


Рис. 1

сжимается и аннигилирует, как только ее радиус становится равным параметру аннигиляции. Присутствие неоднородного по пространству поля не меняет качественно вид кривой $S(t)$, но влияет на размер петли, как видно из сравнения кривых 1—3 рис. 1. Дислокационные петли, размещенные в области положительных значений напряжения неоднородного поля, достигали меньших размеров по сравнению со случаем, когда на них действовал только ультразвук, и наоборот, размещенные в области отрицательных значений напряжения петли достигали больших размеров. ЭВМ-эксперимент показал, что дислокационные петли, начальные радиусы которых принадлежат интервалу $0,6 R_{cr} \leq R_0 \leq 2,8 R_{cr}$, под действием ультразвука аннигилируют за промежуток времени $\tau < T$.

Время жизни петли τ зависит от ее начального радиуса R_0 и от амплитуды напряжения ультразвука σ_0 . На рис. 2 и 3 приведены графики зависимости времени жизни петли в ультразвуковом поле соответственно от начального радиуса петли R_0 (при постоянной ампли-

туде напряжения ультразвука, $\sigma_0=1$ МПа) и от амплитуды напряжения ультразвука σ_0 (при заданном начальном радиусе петли, $R_0=16$ мкм). На обоих рисунках кривые 1 и 2 соответствуют петлям, находящимся в областях 1 и 2 поля напряжений прямолинейной винтовой дислокации при одновременном воздействии ультразвука, кривые 3 — случаю, когда на петлю воздействует только ультразвук. Как видно из рис. 2 и 3, время жизни петли тем больше, чем больше ее начальный радиус (см. рис. 2) и чем меньше амплитуда напряжения ультразвука (см. рис. 3). При этом если петля находится в области положительного значения напряжения поля винтовой дислокации, то время жизни ее меньше, а если в области отрицательных — больше, чем в случае, когда на петлю воздействует только ультразвук. Эта закономерность видна также из рис. 1 (сравните отрезки, отсекаемые кривыми 1, 2, 3 от оси времени).

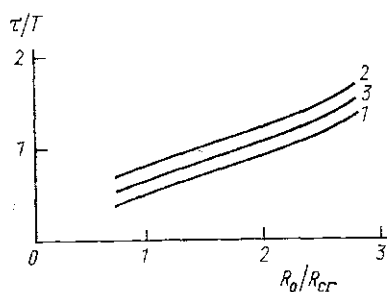


Рис. 2

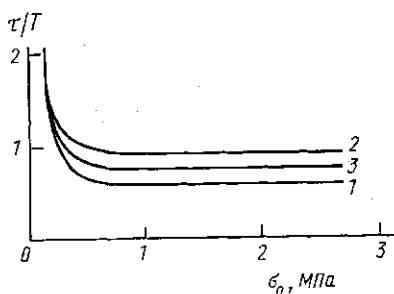


Рис. 3

Таким образом, под действием ультразвука происходит аннигиляция всех петель, а наличие неоднородных по пространству полей напряжений приводит к изменению времени жизни дислокационных петель, находящихся в ультразвуковом поле и нарушению их радиальной симметрии. Уменьшение или увеличение времени жизни петли зависит от взаимного расположения петли и источника неоднородного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тяпунина Н. А., Благовещенский В. В., Зиненкова Г. М., Ивашкин Ю. А. // Изв. вузов. Физика. 1982. № 6. С. 118.
2. Предводителей А. А., Тяпунина Н. А., Зиненкова Г. М., Бушуева Г. В. Физика кристаллов с дефектами. М., 1986.
3. Атта А. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1985.
4. Белозерова Э. П., Казак Ф. А. // Динамика дислокаций. Харьков, 1968. С. 509.
5. Кульган И. Н., Тяпунина Н. А. // ЖТФ. 1994. 64, № 2. С. 114.
6. Леготин Д. Л., Бубновская О. В., Тяпунина Н. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1996. № 1. С. 58 (Moscow University Phys. Bull. 1996. N 1).
7. Предводителей А. А., Ракова Н. К., Нан Хул Бинь // ФТТ. 1967. 9. С. 308.
8. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Киев, 1982.
9. Мэзон У. Физическая акустика. М., 1968. Т. 3, ч. Б. С. 106.

Поступила в редакцию
12.04.94
В окончательной редакции
27.09.95