

УДК 539.67 : 669.01

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

М. А. КРИШТАЛ, М. А. ВЫБОЙЩИК, В. А. СУДНИК

**ПИК ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЙ ДИФФУЗИЕЙ
В ЯДРЕ ДИСЛОКАЦИИ***

(Представлено академиком Н. Н. Рыкалиным 20 II 1974)

В работах ⁽¹⁻⁴⁾ был предложен способ определения параметров диффузии вдоль дислокаций по результатам измерений временной зависимости внутреннего трения (в.т.), а также предсказано существование двух пиков в.т., связанных с диффузией по дислокациям.

Один из них ⁽¹⁾ возникает, когда приложенное напряжение изменяется с частотой $\omega = 1/\tau_1$, где $\tau_1 = 2l_c^2/D_d$ — время релаксации перераспределения атомов примесей вдоль дислокаций после приложения нагрузки, l_c — среднее расстояние между примесными атомами на дислокациях и D_d — коэффициент диффузии атомов примесей вдоль дислокаций. Этот пик низкочастотный и, согласно работе ⁽¹⁾, соответствует ~ 1 Гц.

Другой пик в.т. ^(3, 4) связан с резонансом частот внешнего поля напряжений и собственных термических «скачков» атомов примесей на дислокациях на частотах порядка единиц килогерц. В этих же работах ^(3, 4) была поставлена задача об обнаружении указанного дислокационного пика в.т. и описаны преимущества расчета параметров дислокационной диффузии по пику в сравнении с их определением по временной зависимости в.т. Однако до настоящего времени оба эти пика не обнаружены.

Высокочастотный дислокационный пик дает возможность рассчитывать коэффициенты диффузии в ядре дислокации и, возможно, вдоль границ зерен и субструктурных границ. Коэффициенты диффузии, рассчитанные таким методом, свободны от допущений о ширине границы или эффективном сечении дислокации. Знание этих величин позволяет подойти к вопросу о строении дислокационного ядра и границ зерен, а также о природе дислокационного и зернограничного механизмов диффузии ⁽⁵⁾.

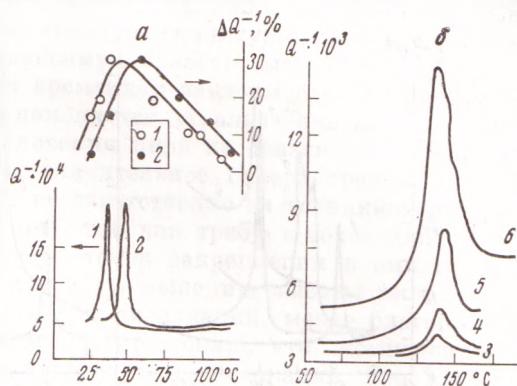
Целью настоящей работы было экспериментальное нахождение и изучение некоторых закономерностей проявления дислокационного пика в.т. Для решения этой задачи была разработана новая автоматическая аппаратура с непрерывной регистрацией в.т. при изгибных или крутильных колебаниях стержней в диапазоне частот 0,5—5 кГц, амплитуд 10^{-7} — 10^{-4} и температур от -196 до 600°C . Химический состав образцов приведен в табл. 1. Образцы перед измерениями отжигали в вакууме при температурах $\sim 0,85 T_{\text{пл}}$ в течение 5 час. с целью гомогенизации и стандартизации структуры зерен. Частота собственных колебаний различных образцов составляла 0,7—2,8 кГц.

Указанный пик должен находиться в интервале температур проявления временной зависимости в.т., положение которой определяется частотой измерения ⁽⁶⁾. Энергия, которую способны рассеять диффундирующие атомы на дислокациях, пропорциональна энергии активации диффузии вдоль дислокаций в поле переменных напряжений, концентрации

* Результаты работы докладывались на VI Всесоюзной конференции по релаксационным явлениям в твердых телах, Каунас, 20—23 июня 1973 г.

примесей на дислокациях и плотности дислокаций. Нами выполнен численный расчет для атомов Zr, растворенных в алюминии, при следующих параметрах: энергия активации диффузии атомов Zr вдоль дислокаций в алюминии составляет 12,1 ккал/г-ат (измерена независимым методом по методике (3)), концентрация Zr 10^{-4} , плотность дислокаций 10^7 см $^{-2}$ и радиус дислокационной трубы ~ 30 Å. Получена энергия

Рис. 1. Кривые в.т. и температурно-частотная зависимость приращения ΔQ в.т. при возбуждении в течение 3 мин.: 1, 2 — Al + 0,03 вес.% Cu при частотах 1,83 кгц (1), 2,82 кгц (2); 3—6 — Cu + 0,176 вес.% Cd на частоте 0,7 кгц и амплитудах деформации измерения $5 \cdot 10^{-7}$ (3), 10^{-6} (4), $2 \cdot 10^{-6}$ (5), $4 \cdot 10^{-6}$ (6); 3, 6 — нагрев, 3, 6 — охлаждение



порядка $4 \cdot 10^{-2}$ эрг/см 3 . С другой стороны, образец алюминия, имеющий модуль упругости $6,47 \cdot 10^{11}$ дн/см 2 , амплитуду деформации измерения 10^{-6} и высоту пика 10^{-2} , может рассеять энергию $3,23 \cdot 10^{-3}$ эрг/см 3 . Сопоставление полученных величин показывает, что такой пик может быть экспериментально обнаружен.

На рис. 1 приведены температурные зависимости в.т. алюминия и меди. Для сплава Al + 0,03 вес.% Cu измерения выполнены на одном образце при разных частотах. Видно, что пик в.т. относится к типу релаксационных, так как изменение частоты колебаний сдвигает пик по температуре, практически не изменяя его высоты и формы. Энергия активации пика, вычисляемая по его температурному положению, равна 10,6 ккал/г-ат и хорошо соответствует энергии, рассчитанной по температурно-частотному сдвигу (10,0 ккал/г-ат).

Результаты дальнейших систематических исследований следующие:
а) пик расположен в интервале температур и частот проявления временной зависимости в.т. и соответствует температурам максимальных временных приращений в.т. при равных частотах измерения (рис. 1, 1, 2);
б) пик наблюдается в отожженных образцах и ярко проявляется при

Таблица 1

Матрица	Примесь	Концентрация примеси, вес.%	Q_d , ккал/г-ат		Ширина пика, град	$D_0 \cdot 10^4$, см 2 ·сек $^{-1}$
			по пиру	по методу (3)		
Al A999	Cu	0,005	10,6	6,1	5	4,15
		0,01	11,1	—	6	2,74
		0,03	10,6	—	6	2,6
		0,05	11,8	—	7	3,95
	Ti	0,005	12,7	10,0	6	3,0
	Fe	0,005	11,9	5,5	12—15	2,7
Al A99	Zr	0,005	13,2	12,1	6	76,0
	—	0,01	10,9	—	8	2,18
Cu 99,999	Zn	0,10	25,8	—	20	$40 \cdot 10^4$
	Ge	0,11	26,8	27,7 *	15	$22 \cdot 10^4$
	Cd	0,176	23,4	—	20	$1,8 \cdot 10^4$

* Данные работы (10).

концентрациях примесей в пределах 0,005—0,1 вес.%; в) температурное положение пика с увеличением частоты измерения сдвигается в сторону повышенных температур; г) температура пика зависит от размера атома примеси и возрастает с его увеличением (рис. 2, 1—4); д) рост концентрации примеси увеличивает высоту пика и сдвигает его в область повышенных температур (рис. 2, 5, 6); е) в одном и том же образце высота пика растет с повышением амплитуды деформации измерения

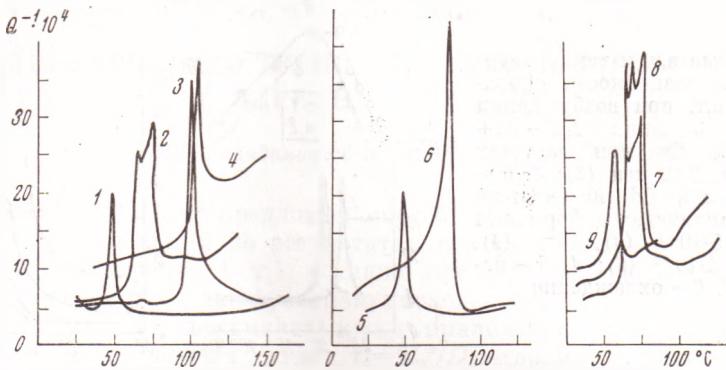


Рис. 2. Кривые в.т. сплавов А999 в зависимости от вида примеси: 1 — Cu, 2 — Fe, 3 — Ti, 4 — Zr; от концентрации примеси: 5 — 0,03 вес.% Cu, 6 — 0,05 вес.% Cu; от амплитуды деформации: 7 — $8 \cdot 10^{-6}$; 8 — 10^{-5} ; 9 — после остаточной деформации 0,5% и $\varepsilon = 10^{-5}$

(рис. 1, 3—6 и рис. 2, 7, 8); ж) после небольшой холодной деформации образца сжатием или кручением высота пика уменьшается (рис. 2, 9); з) для образцов, содержащих примесь железа, наблюдается появление пиков-спутников (рис. 2, 2, 7—9).

Анализ особенностей поведения пика показывает, что он не относится к деформационным, так как незначительная пластическая деформация приводит к уменьшению его высоты или исчезновения. Пик вновь возникает после отжига. Высота и температурное положение пика полностью определяются концентрацией и видом примесных атомов. Поэтому естественно предположить, что природа его возникновения обусловлена взаимодействием между дислокациями и примесными атомами, так как параметры пика определяются плотностью дислокаций, количеством примесей на них и видом примесей (сжимаемость, размер и заряд иона примеси). Об этом свидетельствует и низкая величина энергии активации процесса (около 0,5 эв для Al и 1,0 эв для Cu).

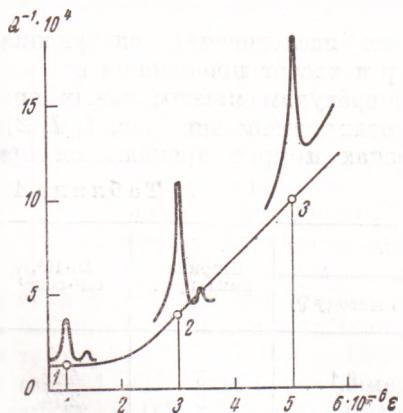


Рис. 3. Амплитудная зависимость в.т. алюминия А99 и пики на температурной зависимости в.т.

примесей по дислокациям. Поэтому можно предполагать три механизма возникновения пика: а) отрыв дислокаций от примесных атомов с последующим перезакреплением в течение цикла, б) взаимодействие дислокационных перегибов с атомами примеси, вызывающее диффузионные «скачки» атомов примесей вдоль перегибов, в) перемещение примесных

Поскольку пик расположен в области максимального проявления временной зависимости в.т. (при равных частотах измерения), то его природа, по-видимому, связана с диффузией атомов

атомов вдоль дислокаций под действием силы, возникающей вследствие изменения линейного напряжения при деформации растяжение — сжатие в образце для дислокаций, ориентированных близко к направлению силы. Во всех случаях пик в.т. возникает при температурах, когда совпадают частоты деформации измерения и «скачков» атомов по дислокациям.

Результаты экспериментальных данных (рис. 3) показывают, что в амплитудонезависимой области в.т., где временной зависимости не обнаружено, пик наблюдается. С увеличением амплитуды деформации измерения с переходом в амплитудозависимую область высота пика резко возрастает, здесь же наблюдается и временная зависимость. Температурное положение пика практически не изменяется. Анализ данных рис. 3 показывает, что: 1) механизм возникновения пика не связан с отрывом дислокаций от атомов примесей; 2) значительное перераспределение длин дислокационных сегментов также не ответственно за возникновение пика для всех трех амплитуд деформаций, так как требует более длительного циклирования. Отрыв дислокаций от точек закрепления в амплитудозависимой области должен приводить к уменьшению высоты пика. По-видимому, с увеличением ε растет вклад дислокаций, менее благоприятно ориентированных к приложенному напряжению, что компенсируется уменьшением высоты пика вследствие отрыва дислокаций. Пик в.т., связанный с отрывом дислокаций от точек закрепления согласно моделям (7, 8), должен смещаться в сторону понижения температур с возрастанием ε . Обнаруженный пик практически не изменяет своего температурного положения, незначительно ($1-2^\circ$) смещаясь в сторону повышенных температур с возрастанием ε на порядок. В связи с этим механизм возникновения пика исключается. В реальных случаях следует считаться с суперпозицией механизмов б) и в), которая наряду с несколькими сортами атомов, может вызвать появление пиков-спутников.

По формуле Эйнштейна для температур пика и известных частот колебаний образцов определяли коэффициенты диффузии по дислокациям $D_d = k a^2 / \tau$, где τ — время релаксации, $\tau = (2\pi f)^{-1}$, f — частота приложенного напряжения, a — длина «скакка» (параметр решетки) и k — геометрический коэффициент, который можно принять в случае диффузии по дислокациям равным $1/2$. По температурному положению пика рассчитаны величины энергии активации Q_d диффузии по дислокациям. Значения Q_d и вычисленные величины предэкспоненциального множителя D_0 приведены в табл. 1. Отношение полученных величин Q_d к соответствующим величинам объемной диффузии находится в пределах 0,4—0,6 и хорошо соответствует данным обзора Баллуффи (9).

В табл. 1 приведены также величины Q_d , рассчитанные по методике (1—4) в работе (6). Тенденция к линейной зависимости Q_d от радиуса атома примеси (3, 4) сохраняется, однако с увеличением размера атома примеси различие в Q_d , измеренных разными методами, уменьшается.

Авторы признательны Д. М. Левину за полезное обсуждение настоящей работы.

Тульский политехнический
институт

Поступило
13 III 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. Ямауджи, Ч. Л. Баэр, В сборн. Актуальные вопросы теории дислокаций, 1968. ² Ч. Л. Баэр, Там же. ³ М. А. Криштал, М. А. Выбойщик, В сборн. Взаимодействие между дислокациями и атомами примесей в металлах и сплавах, Тула, 1969. ⁴ М. А. Криштал, Механизм диффузии в железных сплавах, 1972. ⁵ М. А. Криштал, ДАН, т. 192, № 5, 1025 (1970). ⁶ М. А. Криштал, М. А. Выбойщик, В. А. Судник, ФММ, т. 36, № 5, 1103 (1973). ⁷ R. Hasiguti, J. Less—Common Metals, v. 2, № 28, 249 (1972). ⁸ K. Lücke, J. Schlipf, Res. Group U. K. Atomic Energy Author, № AERE-R, 5944/1, 118 (1969). ⁹ Р. Баллуффи, В сборн. Термически активированные процессы в металлах, 1973. ¹⁰ E. C. Oren, C. L. Bauer, Acta Metallurgica, v. 15, 773 (1967).