

## Влияние импульсов слабого магнитного поля на зернограничную релаксацию в алюминии

© О.И. Дацко, В.И. Алексеенко, А.Л. Брусова

Донецкий физико-технический институт Академии наук Украины,  
340114 Донецк, Украина

(Поступила в Редакцию 3 февраля 1999 г.)

Обнаружено, что обработка импульсами слабого магнитного поля поликристаллического алюминия технической чистоты во время его нагрева приводит к смещению зернограничного максимума низкочастотного внутреннего трения в сторону низких температур. Эффект связывается с уменьшением степени взаимодействия границ зерен с примесными атомами.

1. Согласно существующим представлениям [1], при обработке импульсами слабого магнитного поля (ИМП) материалов, содержащих дефекты кристаллической структуры и находящихся в неравновесном метастабильном состоянии, в них происходят изменения свойств и структуры примесно-дефектных комплексов (ПДК), которые обуславливают происходящие при этом изменения физико-механических свойств.

Как известно, ПДК в материале могут иметь различную природу, строение, свойства, химсостав, концентрацию примесных атомов, тип дефектов: вакансии, дислокации, границы раздела, двойники, трещины. Влияние ИМП и ПДК с точки зрения перечисленных факторов практически не изучено. Актуальность такой задачи обусловлена тем, что ее решение может раскрыть механизмы магнитоимпульсного воздействия на материалы и их свойства. Для решения задачи необходимо конкретизировать указанные выше характеристики ПДК с тем, чтобы понять их роль и место в этих механизмах.

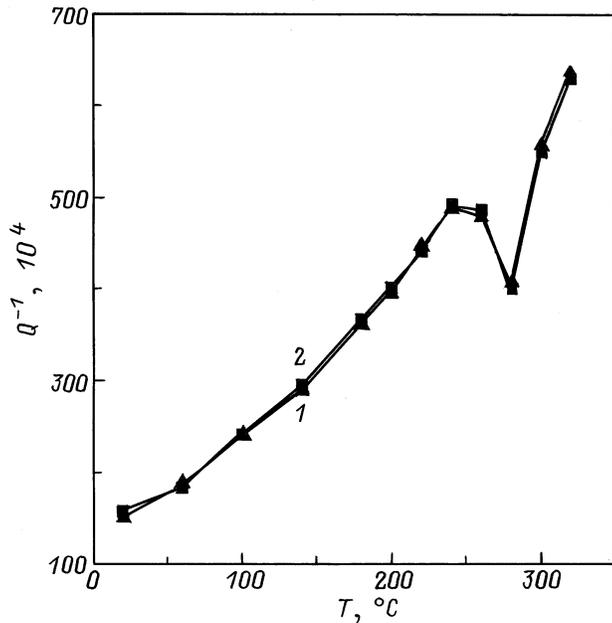
В настоящей работе рассматривается вопрос о физической сущности влияния ИМП на ПДК типа границы раздела кристаллитов с различной степенью блокирования примесными атомами. В частности, исследуется зернограничная релаксация в поликристаллическом алюминии различной чистоты при его магнитоимпульсной обработке.

Общепризнано, что границы раздела кристаллитов обуславливают появление на температурной зависимости низкочастотного внутреннего трения (ВТ) максимума, связанного с зернограничной релаксацией [2]. Температурное положение максимума и энергия активации зернограничной релаксации в значительной степени определяются примесными атомами, которые адсорбируются границами раздела кристаллитов и блокируют их движение. В общем случае увеличение концентрации примесных атомов в материале приводит к смещению зернограничного максимума в сторону более высоких температур и увеличению энергии активации процесса [3]. Если ИМП будет оказывать влияние на степень взаимодействия границ с примесными атомами, как это наблюдалось нами на закрепленных примесными дислокациях [4,5], то это должно проявиться в изменении параметров релаксационного процесса, выраженного зернограничным максимумом ВТ.

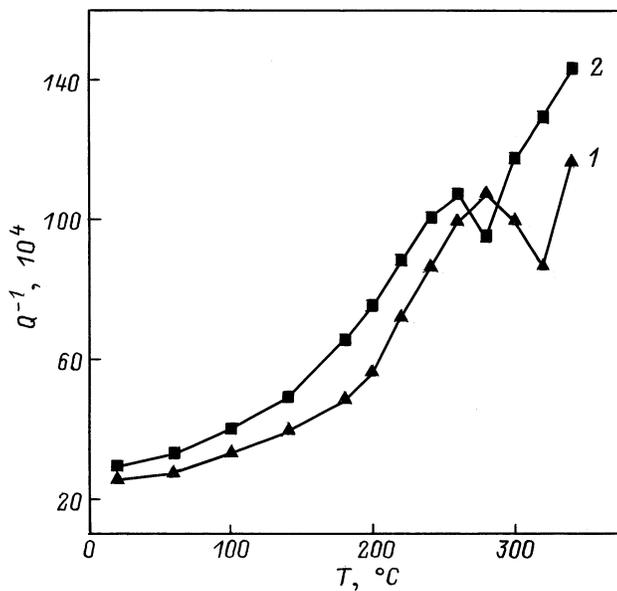
2. В качестве объектов исследований использовался поликристаллический алюминий технической чистоты (99.96%) и алюминий высокой степени чистоты (99.999%). Образцы получали механической обработкой из литого материала в виде призм с размерами  $3 \times 3 \times 60$  mm. Перед измерениями образцы подвергались отжигу при температурах рекристаллизации. ВТ изучалось на низкочастотной установке типа обратный крутильный маятник с частотой колебаний, близкой к 1 Hz. Для выявления влияния ИМП на ПДК граница-примесь изучались температурные зависимости ВТ при относительной амплитуде деформации материала  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-5}$ . Нагрев материала осуществлялся со скоростью  $\sim 2^\circ \text{ min}$ . Обработка материала ИМП производилась на установке ОИМП-101 по следующему режиму: амплитуда магнитного поля  $10^5$  A/m, длительность переднего фронта импульса  $10^{-4}$  s, частота следования импульсов 1 Hz. Измерения ВТ выполнялись без воздействия на материал ИМП и в условиях непрерывной обработки ИМП исследуемого материала.

3. На рис. 1 (кривая 1) изображена температурная зависимость ВТ для алюминия высокой степени чистоты. На этой зависимости наблюдается релаксационный пик ВТ с температурой максимума  $240^\circ \text{C}$ . На чистом алюминии (99.99%) аналогичный пик с температурой максимума  $280^\circ \text{C}$  наблюдал Ке на частоте 1 Hz и однозначно показал, что этот пик является по своей природе зернограничным [6]. В пользу того, что приведенный на рис. 1 пик ВТ является зернограничным, свидетельствует уменьшение его амплитуды и смещение максимума в область более высоких температур ( $275^\circ \text{C}$ ) в техническом алюминии (кривая 1 на рис. 2). Температурная зависимость ВТ в чистом алюминии, снятая в ИМП, не отличается от исходной (кривая 2 на рис. 1). Пик ВТ не смещается по температуре и не изменяет свою амплитуду. В то же время в техническом алюминии максимум зернограничного пика смещается в сторону низких температур на  $\sim 30^\circ$  за счет магнитоимпульсного воздействия на материал (кривая 2 на рис. 2). Таким образом, энергия активации зернограничной релаксации на закрепленных примесными границах в ИМП уменьшается в отличие от случая незакрепленных границ.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что ИМП не вносит никаких изменений в релакса-



**Рис. 1.** Температурная зависимость внутреннего трения в алюминии высокой степени чистоты: 1 — без импульсного магнитного поля; 2 — в импульсном магнитном поле.



**Рис. 2.** Температурная зависимость внутреннего трения в техническом алюминии: 1 — без импульсного магнитного поля; 2 — в импульсном магнитном поле.

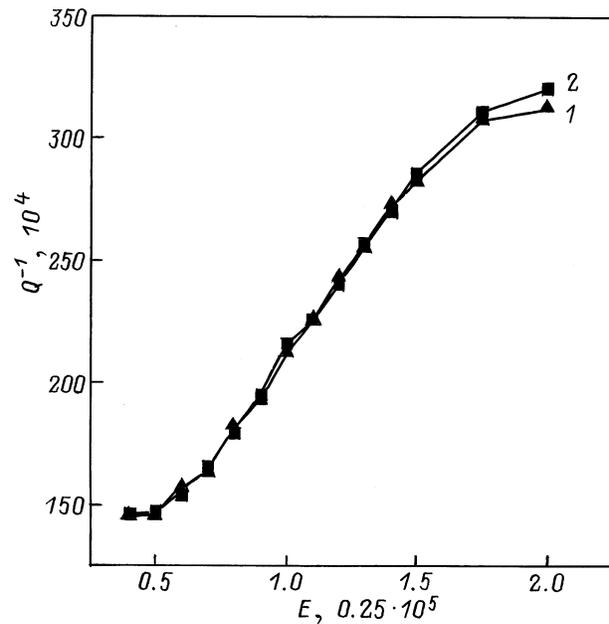
ционный процесс на незакрепленных границах. Другими словами, на зернограничную релаксацию ИМП не оказывает влияния. Наличие примесей в исследуемом материале существенным образом видоизменяет релаксационный процесс, блокируя его развитие. Применение ИМП к последнему случаю дает положительный эффект, способствуя оптимальному проявлению зернограничной релаксации. Становится очевидным, что на магнитное

поле реагируют не границы зерен, а атомы примесей, сегрегированные на них. В рамках дислокационной модели зернограничной релаксации [7] примеси, блокирующие движение границ, ограничивают релаксацию напряжений. В случае, если сегрегированные на границах примеси магнитоактивны, ИМП может изменить их энергию взаимодействия и увеличить (или уменьшить) степень релаксации напряжений, что и наблюдается на эксперименте.

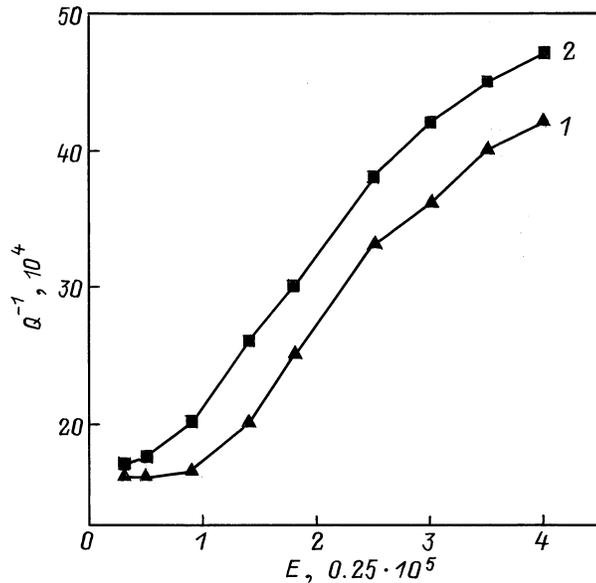
Для подтверждения такой гипотезы на техническом и особо чистом алюминии изучались амплитудные зависимости ВТ при комнатной температуре в условиях магнитоимпульсной обработки и без нее. В данном случае релаксация напряжений осуществлялась на дислокациях, в большей или меньшей мере закрепленных примесями.

Как видно из рис. 3 и 4, дислокационная релаксация ведет себя аналогично зернограничной — в особо чистом алюминии степень дислокационной релаксации во много раз больше, чем в техническом. Кроме этого, в особо чистом алюминии отсутствует и магнитный эффект: амплитудные зависимости ВТ в ИМП и без него совпадают (кривые 2 и 1 на рис. 3). В техническом алюминии степень дислокационной релаксации напряжений в ИМП повышается (в амплитуднозависимой области ВТ, кривая 2 на рис. 4). В амплитуднонезависимой области ВТ магнитный эффект снижается. Обращает на себя внимание и тот факт, что в ИМП в техническом алюминии уменьшается критическая амплитуда ( $\epsilon_1$ ) перехода от амплитуднонезависимого к амплитуднозависимому ВТ (кривая 2 на рис. 4).

Для анализа амплитудных зависимостей ВТ в рамках дислокационной модели Гранато–Люкке воспользуемся



**Рис. 3.** Амплитудная зависимость внутреннего трения в алюминии высокой степени чистоты при комнатной температуре: 1 — без импульсного магнитного поля; 2 — в импульсном магнитном поле.



**Рис. 4.** Амплитудная зависимость внутреннего трения в техническом алюминии при комнатной температуре: 1 — без импульсного магнитного поля; 2 — в импульсном магнитном поле.

выражениями для амплитуднонезависимого ВТ

$$Q^{-1} = \Omega \rho L_c^4 K / \pi^2 C, \quad (1)$$

где  $\Omega$  — ориентационный фактор;  $\rho$  — плотность дислокаций;  $L_c$  — длина свободного дислокационного сегмента;  $K$  — коэффициент, учитывающий тип распределения  $L_c$  по длинам;  $C$  — линейное натяжение дислокации. Для первой критической амплитуды деформации получается

$$\varepsilon_1 \sim [(U_b n^3) / (G b^3)]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $U_b$  — энергия связи примесей с дислокацией;  $n$  — концентрация атомов примеси на линии дислокации;  $G$  — модуль сдвига;  $b$  — вектор Бюргера. Для амплитуднозависимого ВТ

$$Q^{-1}(\varepsilon) = C_1 (C_2 / \varepsilon) F(C_2 / \varepsilon) \exp(-C_2 / \varepsilon), \quad (3)$$

где  $C_1 \sim \rho L_c^3$ ;  $C_2 = (K / L_c) \exp(U_b / kT)$ ;  $F(C_2 / \varepsilon)$  — функция, учитывающая распределение напряжений при различных схемах нагружения образца.

Приведенные выражения достаточно корректно описывают представленные в работе амплитудные зависимости ВТ и позволяют объяснить наблюдаемые на них изменения, обусловленные магнитоимпульсным воздействием. Проанализируем эти изменения по таким параметрам дислокационного ВТ как  $L_c$  и  $U_b$ , поскольку плотность дислокаций в исследуемом материале за счет ИМП не изменяется. Если в результате магнитоимпульсной обработки технического алюминия происходит изменение  $L_c$ , в частности, ее увеличение за счет уменьшения концентрации атомов примеси на линии дислокации, то за этим, как видно из выражений (1)–(3), последует увеличение амплитуднонезависимого и амплитуднозависимого ВТ, а также уменьшение  $\varepsilon_1$ . Действительно, на эксперименте

в техническом алюминии наблюдается рост амплитуднозависимого ВТ и снижение  $\varepsilon_1$  (кривая 2 на рис. 4), а вот существенного увеличения амплитуднонезависимого ВТ не происходит, хотя оно, как следует из выражения (1), наиболее чувствительно к изменению  $L_c$ . Таким образом, через параметр  $L_c$  невозможно объяснить экспериментальные данные. Поэтому наиболее адекватным в этом смысле параметром является  $U_b$ , поскольку энергия связи в явном виде не определяет уровень амплитуднонезависимого ВТ, но определяет уровень амплитуднозависимого ВТ и  $\varepsilon_1$ . Таким образом, эффект магнитного воздействия на дислокации, закрепленные примесями, может быть обусловлен снижением  $U_b$ .

Поскольку примеси качественно одинаковым образом сказываются на дислокационной и зернограничной релаксациях напряжений в техническом алюминии, то разумно допустить, что изменения зернограничной релаксации также могут быть связаны с уменьшением  $U_b$  в ИМП. Следует отметить, что выражение (1) справедливо для резонансного амплитуднонезависимого ВТ. Поэтому, если бы в результате магнитоимпульсной обработки технического алюминия происходили изменения в концентрации примесей на границах зерен (параметр  $L_c$ ), то изменялась бы и амплитуда зернограничного пика ВТ. В эксперименте никаких изменений амплитуды зернограничного пика в ИМП не наблюдается (кривая 2 на рис. 2). А смещение этого пика в сторону более низких энергий и может быть обусловлено уменьшением энергии взаимодействия примесей с границами зерен, которая входит как составляющая в энергию активации зернограничной релаксации ( $U_a$ ). Другими словами, ИМП оказывает влияние на эффективное время зернограничной релаксации, а это, как видно из выражения  $\tau = \tau_0 \exp(U_a / kT)$ , приводит к смещению резонансного пика ВТ.

Обнаруженный в работе магнитный эффект зернограничной релаксации представляет как практический интерес, поскольку продемонстрирована реальная и простая возможность пластифицировать материал, так и чисто научный интерес, поскольку использование ИМП в релаксационных процессах на границах зерен позволяет более глубоко подойти к изучению механизмов зернограничной релаксации и их моделированию.

## Список литературы

- [1] С.Н. Постников, В.П. Сидоров, А.В. Иляхинский. В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Изд-во Горьковского ун-та, Горький (1980).
- [2] В.С. Постников, И.М. Шармаков, Э.М. Масленников. В сб.: Релаксационные явления в металлах и сплавах. Металлургиздат, М. (1963).
- [3] А.В. Гринь. ФММ 4, 3, 561 (1957).
- [4] О.И. Дацко, В.И. Алексеенко, А.Д. Шахова. ФТТ 38, 6, 1799 (1996).
- [5] О.И. Дацко, В.И. Алексеенко. ФТТ 39, 7, 1234 (1997).
- [6] T.S. Ke. Phys. Rev. 71, 533 (1947).
- [7] А. Новик, Б. Берри. Релаксационные явления в кристаллах. Атомиздат, М. (1975).