

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СТРУКТУРЕ ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ, ОБРАБОТАННОЙ ИМПУЛЬСАМИ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© О.И. Дацко, В.И. Алексеенко, А.Д. Шагова

Донецкий физико-технический институт Академии наук Украины,
340114 Донецк, Украина
(Поступила в Редакцию 12 октября 1994 г.
В окончательной редакции 18 января 1996 г.)

Показано, что релаксационные процессы, возникающие в литой бронзе Br012 после ее обработки импульсами слабого магнитного поля, приводят к разрушению примесной атмосферы на дислокациях, сопровождающемуся пластификацией материала, а затем к формированию новой атмосферы.

В настоящее время известно, что после обработки импульсами слабого магнитного поля ($H \leq 10^6$ А/м) магнитных и немагнитных материалов, содержащих дефекты и находящихся в неравновесном состоянии, в них возникают длительные релаксационные процессы которые обуславливают изменения структуры и свойств [1].

Существует мнение, что в результате обработки импульсами слабого магнитного поля (ОИМП, ТИМФ) изменения структуры материала в общем случае носят дислокационно-диффузионный характер [2]. Предполагается, что этот характер проявляется в процессах микропластической деформации (возникает за счет магнитострикционного сжатия), распада существующих и формирования новых комплексов точечных дефектов (ТД, РД), взаимодействия ТД распавшихся комплексов с дислокациями, которое сходно с деформационным старением.

В пользу дислокационно-диффузионного механизма перестройки структуры материала после ОИМП свидетельствует ряд данных. В [3] методом электронно-микроскопического декорирования показано, что после ОИМП монокристаллического NaCl (с примесью CdCl₂), содержащего частицы примесей фазы CdCl₂·6NaCl, в нем происходит постепенный распад частиц примесей фазы на единичные ТД либо на группировки ТД. Распад начинается через 10 дней после ОИМП и длится в течение 25 дней. В [1] приведены данные, указывающие на процессы деформационного старения в сталях после их ОИМП: уменьшение параметра решетки мартенсита, выделение мелкодисперсных фаз упрочнителей, увеличение твердости. В [4] показано, что с течением времени после ОИМП бездислокационного монокристаллического кремния, изменения уровня его высокочастотного внутреннего трения

носят колебательный характер. Наблюдаемые изменения связываются с перестройкой ТД и дефектных комплексов, взаимодействующих с упругими полями дислокаций, введенными, вероятно, в поверхностный слой кремния в процессе его механической обработки. В [5] установлено, что после ОИМП быстрорежущей стали 10P6M5K5 ее максимум низкочастотного внутреннего трения при 543 К уменьшается, что свидетельствует об изменении степени взаимодействия дислокаций с ТД.

Однако процессы и механизмы изменения дефектной структуры материала после ОИМП остаются неизученными, и исследования в этой области представляются актуальными. Одним из направлений исследований, имеющих принципиальное значение, является рассмотрение вопроса о возможном влиянии ОИМП на комплексы ТД, расположенные не в матрице, а на дислокациях, которые блокируют их движение, а также о возможном сходстве и различии происходящих при этом изменений структуры с изменениями, имеющими место при микропластической деформации (МПД, МРД) и последующем деформационном старении материала. Настоящая работа посвящена этому вопросу. Поставленная задача может быть рассмотрена путем изучения динамических свойств дислокаций. В связи с этим целесообразно использовать метод внутреннего трения и исследовать кинетику уровня внутреннего трения при различных температурах и амплитудных зависимостей внутреннего трения материала после его ОИМП и МПД.

1. Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследований использовалась литая оловянистая бронза Бр012, имеющая дендритную структуру. Исследуемые образцы изготавливались путем механической обработки и имели форму прямоугольной призмы размером $3 \times 3 \times 60$ мм.

Использовался метод низкочастотного внутреннего трения — обратный крутильный маятник с частотой около 1 Hz [6]. Образец для исследований, являясь составной частью крутильного маятника, размещался в центре нагревательной печи, которая помещалась в магнитном соленоиде установки для ОИМП. Это позволяло без демонтажа образца производить его ОИМП, МПД, а также осуществлять измерение его внутреннего трения до и после обработок.

Температурные зависимости внутреннего трения изучались в амплитудно-независимой области при относительной деформации материала, равной $4 \cdot 10^{-5}$, а амплитудные зависимости — в интервале амплитуд деформации от $4 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-4}$. Погрешность измерений не превышала 10%. Температура измерялась с точностью ± 5 К. ОИМП производилась при комнатной температуре по следующему режиму: амплитудное значение поля составляло $3 \cdot 10^5$ А/м, длительность переднего фронта импульса 10^{-4} с, частота следования импульсов 1 Hz, время обработки 8 min. МПД материала осуществлялась путем закручивания образца вокруг оси до величины относительной деформации $3 \cdot 10^{-3}$ и сохранения этого состояния в течение 10 min. Остаточная деформация составляла $1 \cdot 10^{-4}$.

Предварительные исследования показали, что внутреннее трение, наблюдаемое после ОИМП и МПД, чувствительно к неконтролируемой МПД материала, которая возникает при монтаже образца в уста-

повку, а также к происходящим после этого с течением времени процессами возврата и деформационного старения. В связи с этим приведенные далее результаты работы получены на образцах, которые выдерживались в течение нескольких дней после монтажа в установку. Было также учтено то обстоятельство, что если через несколько дней после ОИМП материал вновь подвергнуть повторной ОИМП, то внутреннее трение обнаруживает незначительные изменения. При этом оно может как увеличиваться, так и уменьшаться, по-видимому, в зависимости от структурного состояния материала. В случае повторной МПД внутреннее трение обнаруживает такие же изменения, как и после первой МПД.

2. Результаты исследований

На рис. 1, 2 приведены исходные значения и кинетические зависимости амплитудно-независимого внутреннего трения $Q^{-1}(t)$ при температурах 293, 343, 393, 443, 493 К после ОИМП и МПД.

Как видно из этих рисунков, сразу после ОИМП и после МПД материала уровень внутреннего трения мгновенно увеличивается, а затем с течением времени изменяется: после ОИМП увеличивается, а затем снижается (при всех выбранных температурах), а после МПД только снижается. Амплитуда этих изменений с ростом температуры увеличивается. Выявленная кинетика уровня внутреннего трения в поликристаллической Бр012 после ОИМП сходна с наблюдаемым в [4] начальным периодом кинетики уровня высокочастотного внутреннего трения в монокристаллическом кремнии после ОИМП.

Изменения уровня внутреннего трения с течением времени после ОИМП происходят более медленно по сравнению с наблюдаемыми после МПД (рис. 1, а, 2, а).

Спадающие участки на кинетических зависимостях внутреннего трения в материале после ОИМП и МПД с достаточной степенью достоверности описываются выражением $Q^{-1} = Q_0^{-1} \exp(-t/\tau)$ или супер-

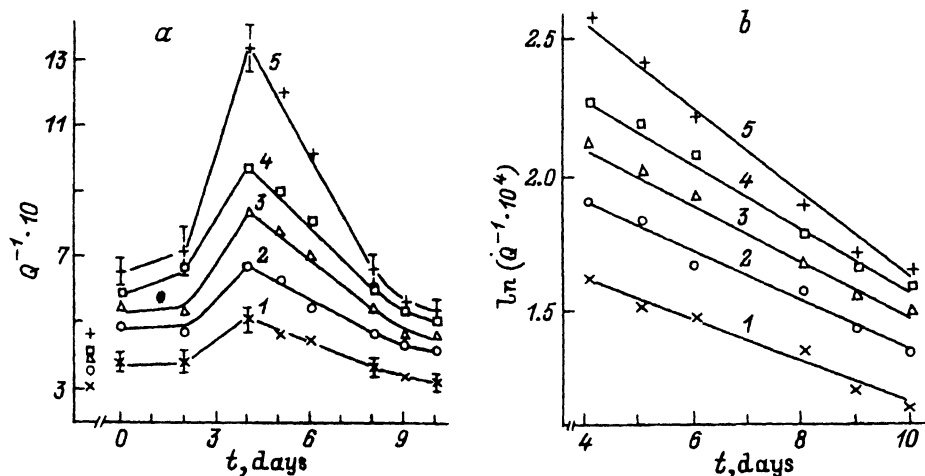


Рис. 1. Временные зависимости уровней низкочастотного внутреннего трения при различных температурах в литой Бр012 после ОИМП.

а) $Q^{-1}(t)$, б) $\ln Q^{-1}(t)$. T (К): 1 — 293, 2 — 343, 3 — 393, 4 — 443, 5 — 493.

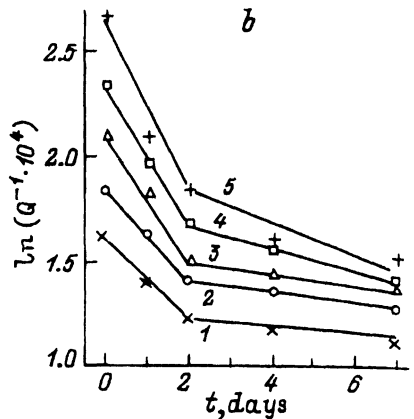
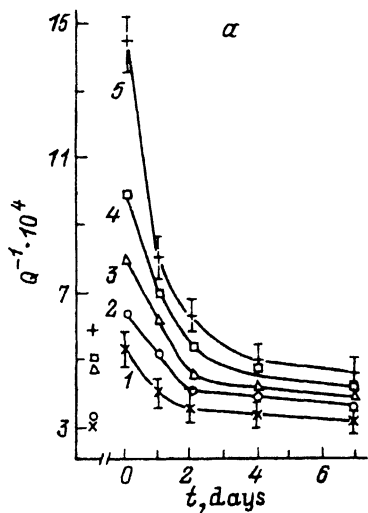


Рис. 2. Временные зависимости уровней низкочастотного внутреннего трения при различных температурах в литой Бр012 после МПД.

а) $Q^{-1}(t)$, б) $\ln Q^{-1}(t)$. T (K): 1 — 293, 2 — 343, 3 — 393, 4 — 443, 5 — 493.

позицией таких функций [7] для $n = 1$, где Q^{-1} — измеряемый уровень внутреннего трения, t — время, τ — время релаксации, Q_0^{-1} — значение внутреннего трения при $t = 0$ (рис. 1, б, 2, б). Характер полученных зависимостей свидетельствует о том, что в материале после ОИМП релаксационный процесс осуществляется по одному механизму (рис. 1, б), а после МПД он протекает по двум различным параллельно идущим механизмам, один из которых превалирует в течение первых двух суток, а второй — в дальнейшем (рис. 2, б). Значения времен релаксации этих двух механизмов для исследуемых температур приведены в таблице.

Наблюдаемая зависимость времени релаксации от температуры свидетельствует о том, что релаксационный процесс носит термоактивационный характер и описывается выражением $\tau = \tau_0 \exp(U/kT)$ [7], где τ_0 — предэкспоненциальный множитель, T — температура, U — энергия активации. Анализ полученных зависимостей $\ln \tau(1/T)$ позволил оценить значения энергий активации релаксационных процессов.

Температурная зависимость времен релаксации в Бр012 после ОИМП (TIMF) и МПД (MPD)

T, K	τ , дни		
	ОИМП (TIMF)	МПД (MPD)	
	τ_1	τ_1	τ_2
293	13.30	5.40	57.0
343	10.90	4.65	40.0
393	9.52	3.43	22.2
443	8.68	3.07	17.4
493	6.45	2.53	12.9

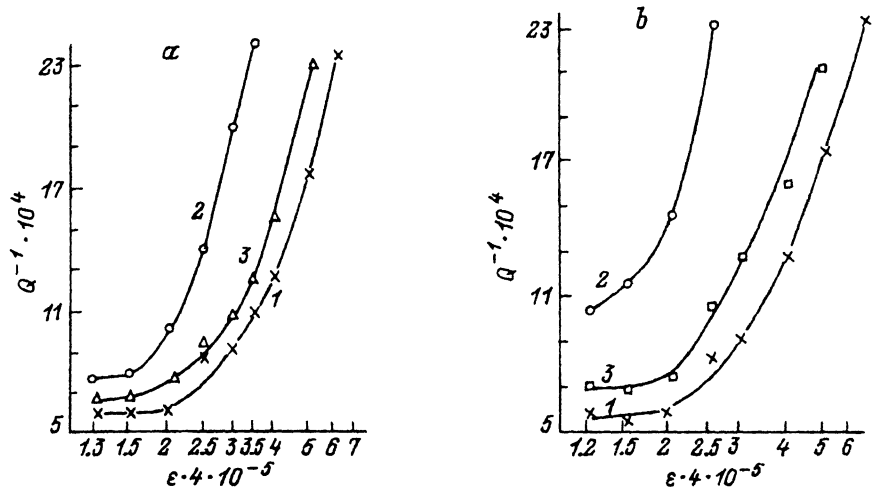


Рис. 3. Амплитудные зависимости низкочастотного внутреннего трения в литой Br012 до и после ее ОИМП (а) и МПД (б).

1 — исходная до ОИМП (или МПД), 2 — после ОИМП (или МПД), 3 — через 6 суток после ОИМП (или через сутки после МПД).

Так, после ОИМП $U = 0.038 \text{ eV}$, после МПД $U = 0.045$ (1–2 суток) и 0.114 eV (2–7 суток).

На рис. 3 приведены амплитудные зависимости внутреннего трения до и после ОИМП и МПД материала. Вначале имеет место амплитудно-независимое внутреннее трение Q^{-1} , затем, начиная с некоторой критической амплитуды деформации ϵ_{cr} , наблюдается амплитудно-зависимое внутреннее трение.

После ОИМП и МПД материала амплитудная зависимость внутреннего трения изменяется: Q^{-1} растет, ϵ_{cr} уменьшается (кривые 1, 2 на рис. 3). Затем с течением времени происходят изменения в обратную сторону (это иллюстрируется веером кривых, одна из которых приведена на рис. 3 (кривая 3)). Возвращение к исходному состоянию после ОИМП осуществляется медленнее, чем после МПД. Так, заметное уменьшение (представленное кривой 3) после ОИМП имеет место через шесть суток, а после МПД — через одни сутки.

3. Обсуждение результатов

Сравнение полученных кинетик уровня внутреннего трения после ОИМП и МПД, а также существующие представления относительно физической природы внутреннего трения [6,8,9] и изменений структуры материала в результате ОИМП [1–5] и МПД [10], последующего деформационного старения [11] позволяют следующим образом интерпретировать результаты эксперимента. После ОИМП в материале происходят разблокировка дислокаций и пластификация материала. Этот эффект, наиболее вероятно, должен быть обусловлен разрушением комплексов ТД на дислокациях в результате ОИМП. Затем вновь имеют место процесс повторной блокировки свободных дислокаций и упрочнение материала. Этот эффект, по-видимому, происходит в ре-

зультате диффузии по линии дислокаций ТД, которая протекает значительно эффективнее, чем объемная диффузия [9], и образования новых комплексов ТД.

В случае МПД вначале имеют место отрыв дислокаций от комплексов ТД и появление новых дислокаций. Затем с течением времени дислокации вновь блокируются комплексами ТД за счет диффузии ТД к дислокациям (эффект деформационного старения). Причем их диффузия к дислокациям, вероятно, происходит частично из матрицы (механизм с большей энергией активации), а частично по линии дислокаций (механизм с меньшей энергией активации). Это обуславливает наличие двух механизмов процесса релаксации, двух времен релаксаций и двух энергий активации.

При анализе этого эффекта мы не исключаем возможности наличия двух механизмов релаксации после МПД за счет диффузии по линии дислокации двух типов ТД.

Полученные результаты показывают, что обнаруженные изменения структуры после ОИМП, характеризуемые комплексами ТД и их взаимодействием с дислокациями, имеют элементы как сходства, так и различия с изменениями, наблюдаемыми после МПД и при последующем деформационном старении. Сходство наблюдается в явлении разблокировки дислокаций от комплексов ТД и в последующей блокировке разблокированных дислокаций ТД. Однако механизмы этих явлений после ОИМП и МПД различны.

Авторы выражают признательность Б.Я. Сухаревскому за поддержку исследований влияния ОИМП на структуру материала.

Список литературы

- [1] Сб. Обработка импульсным магнитным полем. Материалы IV науч.-техн. семинара с международным участием по нетрадиционным технологиям. София-Горький (1989). 134 с.
- [2] Постников С.Н., Сидоров В.П., Иляхинский А.Б. и др. В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности, статика и динамика деформируемых систем. Всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-та. Горький (1980). С. 138-143.
- [3] Дистлер Г.И., Каневский А.М., Москвин В.В. и др. ДАН АН СССР 268, 3, 591 (1983).
- [4] Постников С.Н., Бузынин В.Н., Бузынин А.Н. и др. В сб.: Обработка импульсным магнитным полем. Материалы V науч.-практ. семинара с международным участием по нетрадиционным технологиям. София-Нижегород (1992). С. 30-36.
- [5] Велошенко В.А., Бузынин В.Н., Дацко О.И. и др. Деп. в ВИНТИ 13.07.1987, рег. № 5004. С. 1387-1388.
- [6] Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. М. (1974). 324 с.
- [7] Гинцбург Я.С. Релаксация напряжений в металлах. М. (1957). 453 с.
- [8] Новиков А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М. (1975). 452 с.
- [9] Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М. (1962). 554 с.
- [10] Дударев Е.Ф. Микроскопическая деформация и предел текучести поликристаллов. Томск (1988). 265 с.
- [11] Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. М. (1972). 320 с.