

О ПРИРОДЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА МАГНИТО-СТИМУЛИРОВАННУЮ МИКРОПЛАСТИЧНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ Al

В.И.Альшиц¹⁾, Е.В.Даринская, Е.Ю.Михина, Е.А.Петржик

Институт кристаллографии РАН

117333 Москва, Россия

Поступила в редакцию 9 апреля 1998 г.

Обнаружено значительное увеличение подвижности дислокаций в монокристаллах Al, помещенных в постоянное магнитное поле в отсутствие механического нагружения образцов, при дополнительном пропускании через них постоянного электрического тока невысокой плотности ($10^5 - 10^6$ А/м²). По-видимому, роль тока сводится к откреплению дислокаций от сильных центров закрепления на поверхности кристалла в результате поверхностной электромиграции дефектов. В пользу подобного предположения свидетельствует то обстоятельство, что в образцах с поверхностью, изолированной слоем лака, пропускание тока через объем кристалла не меняет обычный уровень подвижности дислокаций в магнитном поле. Выдвинута гипотеза, что поверхностная электромиграция дефектов, освобождающая дислокации и разблокирующая дислокационные источники, определяет также физический механизм давно обнаруженной макро-пластификации металлов при пропускании через них электрического тока.

PACS: 61.82.-d, 62.20.Fe, 75.90.+w, 76.30.Da

Как известно, в отсутствие внешних воздействий положение дислокаций в кристалле определяется сложным балансом между дальнедействующими внутренними напряжениями, порождаемыми самими дислокациями, и короткодействующими барьерами, связанными с потенциальным рельефом решетки (рельефом Пайерлса – Набарро), с примесными центрами и другими дефектами. Одним из наиболее распространенных методов понижения внутренних напряжений в кристаллах является их отжиг – выдержка при повышенной температуре. В результате, дислокации, термоактивационно преодолевая короткодействующие барьеры, перемещаются таким образом, чтобы снизилась запасенная упругая энергия, а значит, и средний уровень внутренних напряжений.

Существуют и альтернативные методы релаксации дислокационной структуры. Одним из таких методов является открытый относительно недавно магнитоэластический эффект (МПЭ) в немагнитных кристаллах [1], заключающийся в откреплении дислокаций от парамагнитных стопоров в постоянном магнитном поле. Считается [2–4], что открепление происходит в результате эволюции спиновой подсистемы взаимодействующей пары дислокация – парамагнитный центр, завершающейся спин-зависимым переходом [5], разрушающим локальный барьер. Экспериментально МПЭ проявляется в релаксации дислокационной структуры в образцах, помещенных в постоянное магнитное поле, а также в значительной магниточувствительности макропластичности [6, 7], микротвердости [8] и т.д.

Существенно, что МПЭ проявляется и в немагнитных металлах, в частности, в монокристаллах Zn [9] и Al [10,11]. В то же время, хорошо известен так называемый

¹⁾ e-mail: alshits@mechan.incr.msk.su

мый "электронно-пластический" эффект [12–16], заключающийся в пластификации немагнитных металлов при пропускании через них импульсного электрического тока. К сожалению, природа этого эффекта так и не была сколько-нибудь убедительно расшифрована. Ниже мы возвращаемся к этой проблеме на уровне индивидуальных дислокаций в рамках исследования дислокационных пробегов в монокристаллах Al при совместном действии постоянного магнитного поля и электрического тока. Как мы увидим, подобный нетрадиционный подход "смешивания" двух разных эффектов не только не запутает картину, но, напротив, позволит разделить их вклады и выдвинуть обоснованную гипотезу о природе влияния электрического тока на подвижность дислокаций.

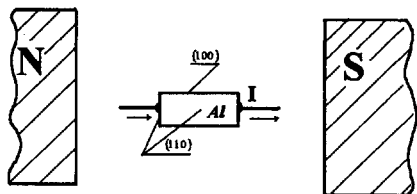


Рис.1. Схема эксперимента

Опыты проводились на спектрально чистых (99,999%) образцах Al, вырезанных из единого монокристалла в форме прямоугольных призм с примерными размерами $3 \times 3 \times 8$ мм. Ориентация одной пары граней выбиралась параллельно системе плоскостей {100}, две другие пары граней принадлежали системе {110} (см.рис.1). После вырезания образцов их поверхности подвергались химической полировке. Затем к их торцам припаивались провода. Положения краевых дислокаций, параллельных направлению $\langle 112 \rangle$ с вектором Бюргера, ориентированным вдоль $\langle 110 \rangle$, фиксировались в образцах с уже припаянными проводами с помощью избирательного химического травления граней {100}. После первого травления образец помещался в постоянное магнитное поле $B = (0.1 - 0.6)$ Тл на время t от 10 мин до 6 ч. Одновременно через образец пропускался электрический ток $I = (2 - 9)$ А. Затем рабочие поверхности образца {100} повторно травлились, что позволяло выявить дислокационные пробег и по их гистограмме определить средний пробег дислокаций при данных условиях. Более подробно методика измерения дислокационных пробегов описана в работе [10].

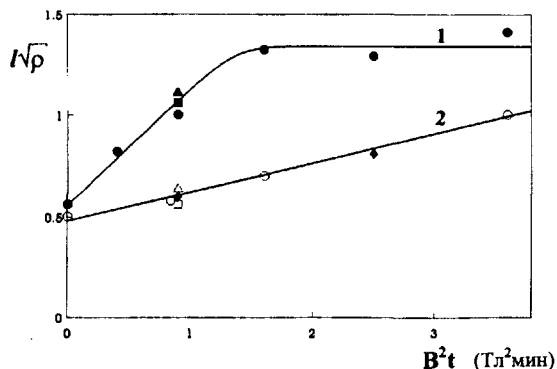


Рис.2. Зависимость нормированного среднего пробега дислокаций $l\sqrt{\rho}$ (ρ — плотность дислокаций) от величины магнитной индукции B и времени t выдержки образцов в магнитном поле при одновременном пропускании электрического тока $I = 3$ А (\bullet , \blacktriangle , \blacksquare) и 5 А (\blacklozenge) и в отсутствие тока (\circ , \triangle , \square); экспериментальные точки \blacksquare , \square и \blacktriangle , \triangle отвечают соответственно "плавающим" контактам и жесткому креплению проводов к образцу в деревянном фиксаторе; а точки \blacklozenge относятся к образцам с поверхностью, покрытой электроизоляцией

В результате проведенных экспериментов было обнаружено, что пропускание через образцы Al постоянного электрического тока плотностью $10^5 - 10^6 \text{ А/м}^2$ заметно увеличивает подвижность дислокаций в магнитном поле. На рис.2 представлены две зависимости нормированного среднего пробега дислокаций от индукции магнитного поля B и времени t выдержки образцов в магнитном поле, отвечающие одновременно пропусканию через образец электрического тока $I = 3 \text{ А}$ (кривая 1) и отсутствию такового (кривая 2, точки \circ, Δ, \square). Как и в предыдущих исследованиях магнито-пластического эффекта в монокристаллах Al [10], эти зависимости оказались линейными по B^2t с последующим насыщением среднего пробега на уровне, отвечающем характерному расстоянию между дислокациями ($\sim 1/\sqrt{\rho}$). Видно, что даже слабый постоянный электрический ток в 3 А радикально сказывается на подвижности дислокаций. Фоновый средний пробег l_0 при $B = 0$, как обычно, связан с релаксацией дислокационной структуры в результате вытравливания поверхностных или приповерхностных стопоров на дислокациях [17]. Относительно высокий уровень l_0 в этих экспериментах по сравнению с нашими данными в работе [10] может быть связан с более неравновесной дислокационной структурой, формировавшейся в результате введения свежих дислокаций в образцы в процессе припайки проводов. Кроме того, следует учитывать, что в настоящей работе использовались другие кристаллы Al и более "быстрый" травитель.

На рис.3 показана зависимость того же нормированного среднего пробега дислокаций $l\sqrt{\rho}$ от величины тока I при фиксированных магнитном поле $B = 0.3 \text{ Тл}$ и времени магнитной "обработки" кристалла $t = 10 \text{ мин}$. Наблюдается квазилинейное увеличение пробегов с тенденцией к насыщению примерно на том же уровне, что и на рис.2. Существенно, что измеренная зависимость оказывается практически нечувствительной к взаимной ориентации магнитного поля и электрического тока (точки \bullet и \circ в пределах ошибки эксперимента $\sim 15\%$ принадлежат одной и той же кривой). В равной мере рассматриваемый эффект не обнаруживает чувствительности к понижению температуры от комнатной до 77 К (точка \blacktriangle на рис.3). Заметим, что в отсутствие магнитного воздействия на кристалл пропускание того же электрического тока 8 А при той же температуре 77 К никак не сказывается на дислокационной подвижности – средний пробег остается на фоновом уровне (точка Δ на рис.3).

В действительности, для того, чтобы убрать обусловленный током рост подвижности дислокаций, нет необходимости в полном выключении магнитного поля – достаточно выключить магнитоэластический эффект, то есть опустить уровень магнитной индукции B ниже определенного порогового значения B_c . Согласно [18], при $B < B_c$ процессы спин-решеточной релаксации, хаотизирующие спины, идут эффективнее, чем спиновая эволюция в магнитном поле. В результате, спин-зависимые переходы в магнитном поле в системе парамагнитный центр – дислокация оказываются подавленными и магнито-стимулированное открепление дислокаций прекращается. Уровень порогового поля B_c чувствителен к состоянию парамагнитных центров. Например, рентгеновское облучение уменьшает B_c [18]. Представляет интерес выяснить, не влияет ли электрический ток на пороговое поле B_c . Проведенная экспериментальная проверка дает уверенно отрицательный ответ на этот вопрос. Рис.4 демонстрирует ступенчатую зависимость наклона линейной части кривых $l(B^2t)$ (см. рис.2) от магнитного поля при $I = 0$ (точки \circ) и $I = 3 \text{ А}$ (точки \bullet). Как видно из рисунка, электрический ток лишь значительно повышает высоту ступеньки в

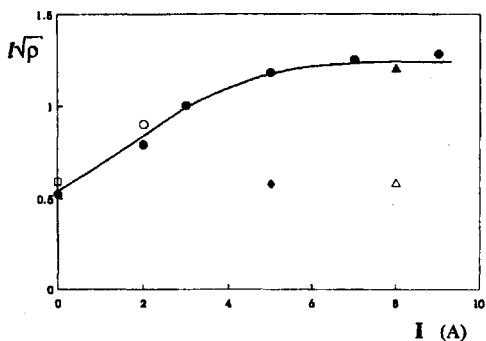


Рис.3. Зависимость нормированного среднего пробега дислокаций $l\sqrt{\rho}$ от величины электрического тока I при $B = 0.3\text{Тл}$ (\bullet , \circ , \blacktriangle , \square , \blacksquare) и при $B = 0$ (Δ) для температур 293 К (\bullet , \circ , \square , \blacklozenge) и 77 К (\blacktriangle , Δ); экспериментальные точки \bullet , \blacktriangle , Δ , \blacklozenge соответствуют ориентации $I \parallel B$, а точка \circ — ориентации $I \perp B$; точка \square отвечает приложению дополнительной механической нагрузки 26 г/мм^2 (при $I = 0$, $B = 0.3\text{Тл}$); точка \blacklozenge относится к образцам с поверхностью, покрытой электроизоляцией

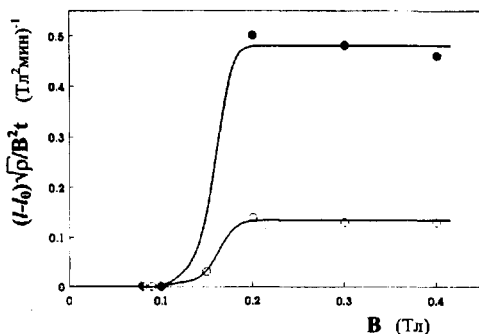


Рис.4. Зависимость отношения $(I - I_0)\sqrt{\rho}/B^2 t$ от величины магнитной индукции B при электрическом токе 3 А (\bullet), 6 А (\circ) и в отсутствие тока (\circ) (точки \circ — по данным [18])

области $B > B_c$, оставляя положение порогового поля неизменным. По-видимому, электрический ток не затрагивает заметным образом элементарный акт открепления дислокаций от парамагнитных центров в магнитном поле.

Обратимся теперь к анализу возможных механизмов наблюдаемого влияния электрического тока на дислокационную подвижность. Судя по обнаруженной температурной нечувствительности этого влияния (см. рис.3), причина не может сводиться к прямому тепловому действию тока, приводящему в условиях наших экспериментов к слабому разогреву образцов (на $1 - 2^\circ$ при $3 - 4 \text{ А}$). Однако указанный разогрев мог бы сказаться косвенным образом, порождая контактные напряжения в месте спайки из-за разности коэффициентов теплового расширения олова и алюминия. Оценка показывает, что при токе $3 - 4 \text{ А}$ речь идет о напряжениях порядка 10 г/мм^2 , которых по нашим данным совершенно недостаточно для заметного увеличения подвижности дислокаций. Об этом свидетельствует экспериментальная точка \square на рис.3, отвечающая дополнительной механической нагрузке 26 г/мм^2 , которая прикладывалась к образцу одновременно с магнитным полем $B = 0,3 \text{ Тл}$ при $I = 0$.

Другой возможный источник вызываемой током паразитной дополнительной нагрузки на образце связан с механическими моментами, возникающими в местах спайки из-за силы со стороны магнитного поля на подводящие провода с током. Конечно, мы стремились минимизировать эти силы, ориентируя подводящие провода параллельно магнитному полю (рис.1). Однако чтобы полностью исключить возможное влияние рассматриваемого фактора, в экспериментах использовались и две другие схемы подвода тока к образцу. В первой — провода с образцом были жестко зафиксированы в деревянном фиксаторе (см. экспериментальные точки \blacktriangle и Δ на рис.2), а во второй схеме использовались "плавающие" контакты между проводами и образцом с помощью проводящей эмульсии (точки \blacksquare и \square на рис.2). Нетрудно ви-

деть, что средний пробег дислокаций l практически не зависит от способа подвода тока к образцу.

Как оказалось, природа наблюдаемого влияния электрического тока на подвижность дислокаций отнюдь не сводится к аппаратным эффектам. Идея разгадки была подсказана нашими старыми данными по изучению МПЭ в кристаллах NaCl в процессе непрерывного травления [2]. По нашим наблюдениям, в условиях непрерывного растворения поверхности среднее время задержки дислокаций на "старте" после включения магнитного поля снижается на порядок по сравнению с обычной методикой эксперимента, когда травление осуществляется до и после магнитной "обработки" образца. Естественно предположить, что постоянное травление исключает сильное закрепление дислокаций весьма подвижными поверхностными дефектами, быстро накапливающимися на поверхности кристалла из окружающей среды. Напротив, в рамках обычной методики визуализации дислокаций многие из них задерживаются на "старте" сильными стопорами на поверхности, дожидаясь подхода других дислокаций, обеспечивающих силовой отрыв первых от поверхностных дефектов. Такой процесс может иметь эстафетный характер и быть весьма растянутым во времени.

Предположим, что роль электрического тока в наших экспериментах сводится к откреплению дислокаций от поверхностных дефектов вследствие, например, электромиграции последних. Тогда, с одной стороны, естественными выглядят все приведенные выше экспериментальные данные. А с другой стороны, мы получаем в руки простой способ исключить влияние электрического тока, не выключая самого тока. Для этого достаточно блокировать его поверхностную компоненту. Проверочный эксперимент выполнялся следующим образом. После первого травления, фиксирующего начальные положения дислокаций, поверхность образца покрывалась слоем лака. Затем образец помещался в магнитное поле $B = 0.3$ или 0.5 Тл с одновременным пропусканием по нему тока $I = 5$ А в течение 10 мин. Вслед за этим лак смывался растворителем и поверхность {100} повторно травилась. Соответствующие экспериментальные точки \blacklozenge на рис.2 и 3, как и ожидалось, находятся на том же уровне, что и средний пробег дислокаций в образцах, через которые ток не пропускаться вообще.

Таким образом, наблюдаемое влияние электрического тока на подвижность дислокаций в магнитном поле, по-видимому, не имеет непосредственного отношения к МПЭ. Впрочем, то обстоятельство, что в наших экспериментах указанное влияние наблюдается лишь в области существования МПЭ ($B > B_c$), является весьма важным свидетельством. Оно отражает тот факт, что электрический ток сам по себе не обеспечивает открепления дислокаций от точечных дефектов в объеме кристалла, но может эффективно влиять на подвижность дислокаций в комбинации с другими воздействиями, в том числе, например, с механической нагрузкой. Именно эта комбинация использовалась в опытах Троицкого и др. [12–15] при их наблюдении пластифицирующего действия электрического тока в процессе макродеформирования металлических образцов. Авторы использовали импульсы тока плотностью $10^8 - 10^9$ А/м² и длительностью $\sim 10^{-4}$ с, следующие с частотой 2–400 Гц, которая выбиралась из условия, чтобы оптимизировать эффект, не допуская заметного электронагрева образцов. Эффект наблюдался в режиме релаксации напряжений [13], ползучести [14] и активного нагружения [15]. Попытки его объяснения авторами [12,

16] так или иначе связаны с концепцией увлечения дислокаций в металле направленным потоком электронов. Между тем существующая теория подобного увлечения [19, 20] предсказывает его при плотностях тока на 2–3 порядка выше, чем в экспериментах [12–15]. Более того, эффект прямого увлечения дислокаций электрическим током в меди действительно непосредственно визуально наблюдался в электронном микроскопе при плотностях тока, превышающих порог порядка 10^{11} А/м² [21].

Таким образом, природа "электронно-пластического" эффекта вряд ли имеет какое-либо отношение к электронному увлечению дислокаций. В свете наших данных естественно предположить, что она обусловлена откреплением дислокаций от поверхностных дефектов и разблокированием поверхностных источников дислокаций в результате электромиграции дефектов по поверхности. Такая гипотеза хорошо коррелирует с надежно установленным сильным влиянием поверхностных факторов на макропластические свойства металлов [22]. Прямую проверку этого предположения нетрудно осуществить точно так же, как это сделано в настоящей работе: электроизоляцией поверхности образцов.

Авторы признательны Б.И.Смирнову и О.В.Клявину за полезное обсуждение результатов и Н.И.Носковой за помощь в работе. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-02-16327).

-
1. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, Т.М.Перекалина, А.А.Урусовская, ФТТ **29**, 467 (1987).
 2. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, Е.А.Петржик, ФТТ **33**, 3001 (1991).
 3. M.Molotskii and V.Fleurov, Phys. Rev. Lett. **78**, 2779 (1997).
 4. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, О.Л.Казакова, ЖЭТФ **111**, 615 (1997).
 5. Я.Б.Зельдович, А.Л.Бучаченко, Е.Л.Франкевич, УФН **155**, 3 (1988).
 6. Ю.И.Головин, Р.Б.Моргунов, Письма в ЖЭТФ **61**, 583 (1995).
 7. А.А.Урусовская, В.И.Альшиц, А.Е.Смирнов, Н.Н.Беккауер, Письма в ЖЭТФ **65**, 470 (1997).
 8. Yu.I.Golovin, R.V.Morgunov, D.V.Lopatin, and A.A.Baskakov, Phys. Stat. Sol. (a) **160**, R3 (1997).
 9. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, И.В.Гектина, Ф.Ф.Лаврентьев, Кристаллография **35**, 1014 (1990).
 10. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, Е.А.Петржик, ФТТ **34**, 155 (1992).
 11. В.И.Альшиц, Р.Воска, Е.В.Даринская, Е.А.Петржик, ФТТ **35**, 70 (1993).
 12. О.А.Троицкий, Письма в ЖЭТФ **10**, 18 (1969).
 13. О.А.Троицкий, П.У.Калымбетов, ФММ **51**, 1056 (1981).
 14. V.I.Stachenko, O.A.Troitskii, and V.I.Spitsyn, Phys. Stat. Sol. (a) **79**, 549 (1983).
 15. О.А.Троицкий, М.М.Моисеенко, В.И.Спицин, ДАН СССР **274**, 587 (1984).
 16. О.А.Троицкий, А.М.Рощупкин, В.И.Стащенко и др., ФММ **61**, 990 (1986).
 17. В.Б.Парийский, А.И.Ландау, В.И.Старцев, ФТТ **5**, 1377 (1963).
 18. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, О.Л.Казакова и др., Письма в ЖЭТФ **63**, 628 (1996).
 19. В.Я.Кравченко, ЖЭТФ **51**, 1676 (1966).
 20. В.Б.Фикс, ЖЭТФ **80**, 2313 (1981).
 21. Е.Е.Вдовин, А.Ю.Касумов, ФТТ **30**, 311 (1988).
 22. В.П.Алехин, *Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов*, М.: Наука, 1983.