

05.1;07

Дальнодействующее влияние облучения светом на микротвердость металлов в слоисто-гетерогенных системах

© Д.И. Тетельбаум, Ю.А. Менделева, А.Ю. Азов

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
E-mail: Tetelbaum@phys.unn.ru

Поступило в Редакцию 1 октября 2003 г.

Установлено, что дальнодействующее влияние облучения светом на механические свойства (микротвердость) металлов (эффект фотомеханической памяти) имеет место при облучении не только отдельных фольг, но и стопок, изготовленных из одного и того же или разных материалов. При этом результат облучения зависит не только от материалов фольг, входящих в состав стопок, но и от присутствия слоев естественного окисла на каждой из фольг. Стравливание слоев окисла и затем выращивание новых слоев, а также перерывы в облучении приводят (при использованных в работе условиях) к усилению влияния засветки. Обсуждается возможный механизм найденных закономерностей.

Введение. Недавно нами было обнаружено новое явление, заключающееся в изменении микротвердости H на обратной стороне металлической фольги при ее облучении светом в режимах, при которых это изменение нельзя объяснить нагревом [1–7]. Явление было названо эффектом фотомеханической памяти металлов (ФПМ), так как изменения сохраняются и после облучения. Установлено, что необходимым условием существования эффекта является наличие слоя естественного окисла (ЕО) на облучаемой стороне фольги. Металлическая фольга с присутствующим на ее поверхности (поверхностях) ЕО фактически представляет собой гетерогенную систему, состоящую из собственно металла и тонких слоев диэлектрика (ЕО). Более сложной гетерогенной системой является стопка из двух и более фольг, для которой возможны различные комбинации присутствия или отсутствия слоев ЕО на входящих в состав стопки фольгах. Исследование особенностей проявления эффекта для различных сло-

истых композиций, состоящих из собственно металлов и слоев ЕО, позволило бы получить информацию о взаимодействии компонентов слоистых систем и тем самым продвинуться в понимании механизма данного эффекта. (Ранее нами было обнаружено дальнедействующее влияние ионного облучения на микротвердость фольг, входящих в состав стопок [8]). В настоящем сообщении излагаются и обсуждаются результаты ряда экспериментов со слоисто-гетерогенными системами для случаев одиночных фольг и стопок, состоящих из двух фольг.

Методика эксперимента. Использовались прокатанные фольги двух сплавов: поликристаллического — пермаллоя-79 с толщиной $20\ \mu\text{m}$ и нанокристаллического — 5БДСР (сплав сложного состава на основе железа) с толщиной $30\ \mu\text{m}$. Выбор этих двух сплавов в качестве объектов исследования определялся тем, что пермаллой-79 — „модельный“ материал, для которого ранее нами было выполнено большинство экспериментов по ФПМ, а 5БДСР — сплав, для которого также обнаружены значительные изменения микротвердости обратной стороны фольги при облучении.

Источником света служила лампа накаливания с мощностью $20\ \text{W}$ (световая мощность $10\ \text{W}$). Расстояние от источника до фольги — $5\ \text{cm}$, время засветки — $10\ \text{s}$. Этот режим соответствует для фольг пермаллоя-79 первому минимуму (максимальному по абсолютной величине значению) на зависимости относительного изменения H от дозы облучения [4,5].

Измерения H проводились на приборе ПМТ-3 до облучения и затем спустя не более $10\ \text{min}$ после облучения. Ограничения по времени измерения обусловлены тем, что изменения микротвердости релаксируют после прекращения облучения, причем эта релаксация, как правило, становится существенной спустя примерно $1\ \text{h}$. Вопросы методики измерения и оценок погрешностей детально изложены в [9]. Нагрузки P при измерении H (они выбирались в области плато на кривых $P(H)$) составляли $20\ \text{g}$ для пермаллоя-79 и $50\ \text{g}$ для сплава 5БДСР. С учетом данных работы [9] изменения H можно с запасом считать значимыми, если они превышают 4% . Удаление ЕО проводилось путем травления в кислоте HCl , не действующей на сами сплавы. Чтобы исключить элементы случайности, эксперименты повторялись, так что приведенные ниже результаты достаточно надежны.

Результаты. Прежде чем выполнять опыты со стопками, было исследовано влияние повторных облучений (с промежуточным удалением и без удаления ЕО) для *одиночных* фольг пермаллоя-79. Ранее [4,5] было установлено, что при их облучении в указанном выше режиме относительное изменение H с *необлученной* стороны ($\Delta H/H_0$) равно -20% . Для фольг 5БДСР с необлученной стороны $\Delta H/H_0 = +20\%$. С *облученной* поверхности для тех и других фольг изменения H незначительные. В обоих случаях травление ЕО с облучаемой стороны фольги перед засветкой приводит к тому, что облучение вообще перестает влиять на микротвердость, если промежуток времени между травлением и засветкой не слишком велик. Ниже приведены результаты ряда опытов, выполненных с одиночными фольгами и стопками.

Опыт 1. Влияние повторного облучения для фольг пермаллоя-79.

Последовательность операций: облучение; измерение H с необлученной стороны; травление ЕО; выдержка на воздухе в течение 30 min (наращивание нового ЕО); повторное облучение; измерение. Результаты оформлены в виде схемы на рис. 1. Видно, что описанная процедура приводит к большему изменению H по сравнению со случаем однократного облучения фольги. На рис. 2 приведены результаты опыта, в котором последовательность операций была той же самой,

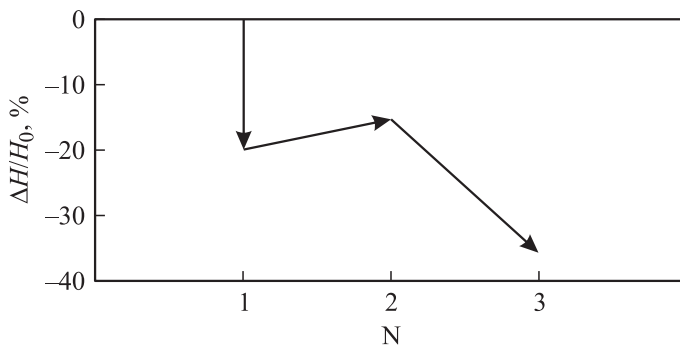


Рис. 1. Относительное изменение микротвердости при последовательных операциях: облучение (первая стрелка); травление ЕО и последующая выдержка на воздухе (вторая стрелка); повторное облучение (третья стрелка); N — порядковый номер операции.

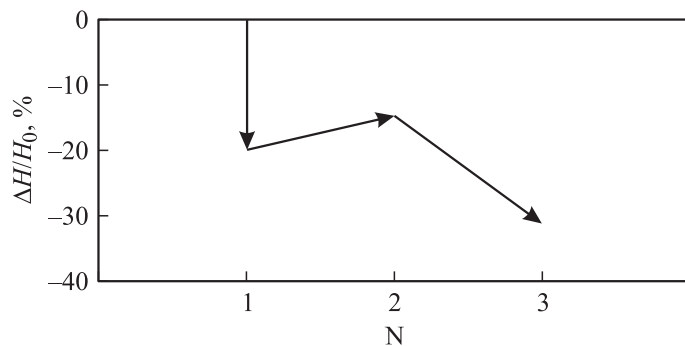


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но без стравливания ЕО.

но стравливания ЕО перед повторным облучением не проводилось. Усиление эффекта имеет место и в этом случае.

Опыт 2. Облучение стопки из двух фольг пермаллоя-79.

Относительные изменения для нижней фольги составляют:

- с верхней стороны: $\Delta H/H_0 = -10\%$,
- с нижней стороны: $\Delta H/H_0 = -35\%$.

Видно, что имеет место изменение H нижней (экранированной) фольги, причем оно более значительно по сравнению со случаем облучения одиночной фольги. Кроме того, в отличие от случая облучения одиночной фольги изменение H происходит и с верхней стороны экранированного образца. Таким образом, экранирование не только не устранило действия света, но даже усилило его влияние.

Опыт 3. То же, что в опыте 2, но в качестве верхней фольги используется 5БДСР.

В этом случае для нижней фольги получаем:

- с верхней стороны: $\Delta H/H_0 = -20\%$,
- с нижней стороны: $\Delta H/H_0 = -26\%$.

Абсолютное значение $\Delta H/H_0$ с нижней стороны, как и в опыте 2, больше, чем при облучении одиночной фольги пермаллоя-79. С верхней стороны изменение выражено еще резче, чем в опыте 2. Следовательно, усиление эффекта при экранировании имеет место и для случая разнородных фольг в стопке.

Опыт 4. То же, что в опыте 2, но с облучаемой стороны верхней фольги перед облучением удален ЕО.

В этом случае облучение не изменяет микротвердость ни верхней, ни нижней фольги.

Опыт 5. То же, что в опыте 2, но ЕО удален перед облучением с обеих сторон нижней фольги.

На обратной стороне верхней фольги микротвердость изменилась так же, как и в случае облучения одиночной фольги пермаллоя-70, а микротвердость нижней фольги осталась без изменения. Таким образом, наличие на фольге ЕО является необходимым условием проявления эффекта и в том случае, когда эта фольга заэкранирована.

Опыт 6. То же, что в опыте 3, но с облучаемой стороны верхней фольги (БДСР) перед облучением удален ЕО.

Для нижней фольги с обеих сторон $\Delta H/H_0 = 0$. Этот результат совпадает со случаем облучения стопки *однотипных* фольг с удаленным ЕО на облучаемой стороне экранирующей фольги.

Обсуждение результатов. Результаты описанных выше опытов показывают, что дальнодействующее влияние света на металлы присуще слоисто-гетерогенным системам, в которых, кроме собственно металлов, по крайней мере, одним из компонентов является слой диэлектрика (в данном случае — ЕО). Вместе с тем эти результаты дают некоторые подсказки при построении моделей изучаемого явления. В [10] было предложено теоретическое объяснение эффекта дальнодействия, основанное на генерации и распространении „волны переключения“ при наличии потока энергии в системе с более чем одним локальным минимумом свободной энергии. Данный механизм не требует существенного нагрева под действием потока. Наличие нескольких минимумов свободной энергии в изучаемых нами материалах (прокатанных фольгах) может обеспечиваться, в частности, существованием различных состояний системы дефектов. Этот механизм применим и к случаю стопок фольг из одного или разных материалов (см. опыты 2, 3). Он объясняет идентичность характера изменения микротвердости под действием столь разных видов облучения, как ионное, электронное [8] и фотонное. Однако приведенные здесь, а также в [6] результаты по влиянию ЕО показывают, что одного только существования потока энергии (если он не слишком мощный) недостаточно для реализации эффекта ФПМ: необходима дополнительная стимуляция перестройки системы дефектов металла. Такая стимуляция может обеспечиваться деформационными

волнами (ДВ), возникающими в ЕО и затем проникающими в металл. В [6,7] мы предположили, что нелинейные ДВ возникают за счет кулоновских сил при захвате фотоэлектронов ловушками в ЕО (диэлектрике). По мере облучения и насыщения разных групп ловушек характер (амплитуда и форма) ДВ может изменяться. Резонно допустить, что именно изменение характера ДВ служит одной из причин сложного, немонотонного вида дозовой зависимости микротвердости [4,5]. После прекращения облучения („отдых“) ловушки могут разряжаться, и после возобновления засветки (опыт 1) H будет продолжать изменяться в ту же сторону, что и при первом облучении, тогда как в отсутствие „отдыха“ направление дрейфа H для используемого режима облучения фольг пермаллоя-79 меняется с увеличением экспозиции на противоположное [4,5]. Аналогично объясняется результат опыта по сравливанию старого (облученного) и последующему наращиванию свежего ЕО.

Из экспериментов далее следует, что в стопке из двух фольг для проявления эффекта в нижней фольге необходимо, чтобы ЕО во время облучения присутствовал не только на облучаемой (экранирующей) фольге, но и на обращенной к ней стороне нижней фольги (см. опыты 4, 5, 6). Этот факт можно объяснить следующим образом. Допустим, что перестройка системы дефектов в верхней фольге в результате облучения не только изменяет микротвердость вблизи обратной стороны, но и вызывает эмиссию (экзоэмиссию) частиц (электронов или ионов) с нижней поверхности. Эмитированные частицы, в свою очередь, захватываются ЕО нижней фольги и возбуждают в ней ДВ. В то же время ДВ, возбужденные в ЕО *верхней* фольги, по-видимому, сильно поглощаются или рассеиваются на интерфейсе и слабо проникают (или вообще не проникают) в нижнюю фольгу. Поэтому в отсутствие ЕО на нижней фольге ее микротвердость не меняется.

Еще один важный результат — это усиление эффекта при облучении стопок (опыт 2 и 3). Ранее на основании опытов по эффекту дальнего действия при *ионном* облучении был сделан вывод, что ДВ могут усиливаться при взаимодействии с протяженными дефектами [11]. В случае ФПМ именно этим можно объяснить парадоксальный факт более значительного изменения H на обратной стороне верхней фольги по сравнению с облучаемой стороной и на нижней стороне экранированной фольги по сравнению с неэкранированной.

Таким образом, при объяснении результатов важно учитывать активную роль компонентов слоистых систем, выражающуюся, согласно

нашей интерпретации, в генерации ДВ (в ЕО), экзоэмиссии (на выходной поверхности фольги), усилении ДВ за счет взаимодействия последних с протяженными дефектами, поглощении и рассеянии ДВ (на интерфейсах). Пока существование этих процессов является гипотезой. Прямая их фиксация и теоретическое обоснование — задачи дальнейших исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке программы „Университеты России“.

Список литературы

- [1] *Тетельбаум Д.И., Трофимов А.А., Азов А.Ю.* и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 23. С. 9–13.
- [2] *Тетельбаум Д.И., Пантелеев В.А., Азов А.Ю.* и др. // Поверхность. 2000. № 5. С. 87–89.
- [3] *Тетельбаум Д.И., Азов А.Ю., Гуткин М.В.* и др. // Вестник ННГУ. Сер. Физика твердого тела. 2000. В. 1 (3). С. 263–270.
- [4] *Tetelbaum D.I., Azov A.Yu., Kuril'chik E.V.* et al. // Vacuum. 2003. V. 70. N 2–3. P. 169–173.
- [5] *Тетельбаум Д.И., Курильчик Е.В., Азов А.Ю.* и др. // Поверхность. 2003. № 4. С. 67–69.
- [6] *Тетельбаум Д.И., Азов А.Ю., Голяков П.И.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 2. С. 35–41.
- [7] *Tetelbaum D.I., Semin Yu.A., Khabibulov V.V.* et al. // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3687. P. 264–267.
- [8] *Tetelbaum D.I., Kuril'chik E.V., Latisheva N.D.* // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 1997. B127/128. P. 153–156.
- [9] *Тетельбаум Д.И., Азов А.Ю.* // Вестник ННГУ. Сер. Физика твердого тела. 2001. В. 2 (5). С. 120–130.
- [10] *Кривелевич С.А.* // Вестник ННГУ. Сер. Физика твердого тела. 1998. В. 2. С. 71–78.
- [11] *Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д.* и др. // ФТП. 1986. Т. 20. С. 503–507.