

05;07;12

Влияние облучения светом на механические свойства металлов

© Д.И. Тетельбаум, А.Ю. Азов, П.И. Голяков

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

В окончательной редакции 7 августа 2002 г.

Получены экспериментальные доказательства (на примере фольг пермаллоя-79) того, что необходимым условием изменения микротвердости на необлученной стороне фольги при облучении светом является наличие слоя естественного окисла на облучаемой светом стороне фольги. Показано, что эффект не связан с нагревом образцов, а его величина немонотонно зависит от дозы облучения. Обсуждается возможный механизм эффекта.

Ранее [1] был обнаружен новый эффект, заключающийся в том, что при облучении фольг пермаллоя-79 светом происходит изменение их механических свойств, причем не только на облученной, но и на противоположной стороне фольги. Позднее было установлено, что эффект имеет место при облучении не только пермаллоя, но и других металлов [2,3]. Сходное явление обнаружено и для кремния [4].

В настоящем сообщении приведены результаты, однозначно свидетельствующие о том, что, во-первых, эффект не обусловлен нагревом, во-вторых, он проявляется лишь в ограниченном энергетическом (дозовом) интервале, в-третьих, необходимым условием существования эффекта является присутствие на облученной поверхности окисного слоя, по крайней мере в форме естественного окисла (ЕО).

Эксперименты выполнялись с фольгой сплава „пермаллой-79“ толщиной $20 \mu\text{m}$. В качестве источника света использовалась галогенная лампа мощностью 300 W. Микротвердость (H) измерялась прибором ПМТ-3. Путем тщательного изучения статистических и систематических погрешностей установлено, что среднеарифметическое изменение H более чем на 3–4% можно определять вполне надежно (с достоверностью, лучшей, чем 0.9). Выбор нагрузки (20 g), с одной стороны, обеспечивал приемлемую точность измерений, с другой — связан

с требованием обеспечения достаточно малого отношения глубины отпечатка к толщине образца.

В результате облучения сравнимые изменения H имеют место с обеих сторон. Так как дальнедействующий характер является наиболее интересной особенностью эффекта, мы приводим результаты только для тыльной стороны.

Чтобы надежно установить, что изменения H при облучении не обусловлены простым нагревом, кроме прямых измерений температуры термопарой, были осуществлены следующие варианты условий облучения.

1. Образцы во время засветки помещались на массивный металлический блок, надежный тепловой контакт с которым осуществлялся с помощью индий-галлиевой пасты. Этот режим использовался нами как базовый.

2. Для более эффективного отвода тепла была выполнена специальная серия опытов, в которой образцы при облучении помещались в кювету с деионизованной водой, что не только экранировало образец от теплового (ИК) излучения, но и обеспечивало лучший теплоотвод.

3. Засветка проводилась при различных температурах образцов (от 0 до 150°C).

Во всех случаях при одних и тех же мощностях и длительностях облучения изменения H оказались одинаковыми. Еще более показательны результаты следующего опыта, в котором поверхность фольги покрывалась тонким слоем черного красителя. Последний полностью поглощал свет, но практически не увеличивал полную теплоемкость образца. При этом нагрев излучением мог отличаться от нагрева в обычных условиях только в большую сторону. Оказалось, что изменения H (в пределах погрешности) в этом случае не наблюдались. Итак, увеличение H обусловлено не нагревом, а имеет более фундаментальную природу.

Следующий этап исследования заключался в установлении энергетических условий изменений H . Уже в [1] нами отмечался факт немонотонности зависимости относительного изменения микротвердости ($\Delta H/H$) от длительности облучения. Здесь мы выполнили систематические эксперименты по влиянию засветки на $\Delta H/H$ при различных временах облучения с фиксированным расстоянием до источника (R) и для различных R при фиксированном времени облучения. Оказалось, что в координатах $\Delta H/H \div D$, где D — энергия излучения, приходящаяся на единицу площади (экспозиционная доза), эти данные ложатся на

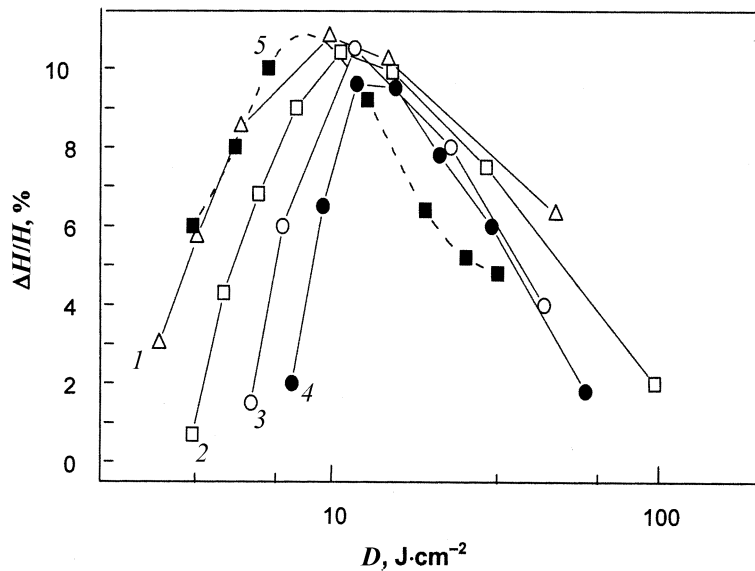


Рис. 1. Зависимость относительного изменения микротвердости фольг пермаллоя-79 (тыльная сторона) от плотности энергии (экспозиционной дозы) при облучении светом галогенной лампы (1–4) и ионами Ar^+ с энергией 40 keV (5). Длительность облучения светом, s : 1 — 2; 2 — 4; 3 — 6; 4 — 8. Значения $\Delta H/H$ для кривой 5 уменьшены в 2.5 раза.

достаточно близкие кривые, имеющие колоколообразную форму с максимумом, положение которого по оси абсцисс практически постоянно (рис. 1). Примечательно, что при увеличении D выше некоторого предела величина $\Delta H/H$ стремится к нулю. Это отчасти объясняет, почему эффект не был замечен ранее: оказывается, что для его обнаружения необходимо „попадание“ в определенный дозовый интервал. (Другой причиной является наличие релаксации: изменение H , произошедшее в результате облучения, после его прекращения в большинстве режимов спадает до нуля в течение времени порядка суток).

Интересно сравнить зависимости $\Delta H/H$ от D с немонотонной зависимостью $\Delta H/H$ от дозы, наблюдавшейся нами при ионном облучении металлических фольг [5] („малодозный эффект дальнего действия“ —

МЭД). Эта зависимость, построенная в тех же энергетических единицах, что и при облучении светом, также приведена на рис. 1. Видно, что не только ход зависимости, но и положения максимумов по шкале D для обоих видов облучения весьма близки.

Такая аналогия между случаями ионного и светового облучения, на наш взгляд, не случайна и указывает на необходимость поиска общих причин, приводящих к изменению свойств материала вдали от зоны непосредственного выделения энергии. Механизмы МЭД нами неоднократно обсуждались (см. [5] и ссылки там). Было показано, что наиболее вероятным является механизм возбуждения ионами упругих (точнее, деформационных) волн (ДВ) и их взаимодействия с исходными структурными несовершенствами. Последним придавалась ключевая роль как в МЭД [5], так и в случае эффекта дальнего действия при ионном облучении полупроводников [6]. В работе [6] даны теоретические оценки, относящиеся к модели ДВ в материалах с протяженными дефектами. Эти оценки с определенными коррективами остаются в силе и для металлов. Однако исходное допущение — генерация ДВ при воздействии столь „мягкого“ вида излучения, как свет от лампы накаливания, является наиболее трудным пунктом модели. Отсутствие сколько-нибудь заметного термического воздействия исключает возможность объяснений, базирующихся на возникновении температурных градиентов. Трудно допустить в нашем случае и наличие процессов, связанных с локализованным внутри металла возбуждением его электронной подсистемы, как, например, в случаях мощного лазерного облучения.

Ранее [2–3] мы предположили гипотезу о зарождении ДВ при захвате фотоэлектронов естественным окислом (ЕО). В настоящей работе осуществлена экспериментальная проверка этой гипотезы о роли ЕО. Для этого выполнена серия опытов в условиях, когда облучение проводится в отсутствие ЕО. Образец подвергался облучению светом, будучи погруженным в раствор соляной кислоты, которая стравливает ЕО, но не действует на сам металл. В полном соответствии с указанной гипотезой оказалось, что в этом случае облучение не приводит к изменению H . В другой серии опытов образцы облучались на воздухе после различных промежутков времени (τ), прошедшего между удалением ЕО и воздействием света. Из рис. 2 видно, что с ростом τ , т.е. по мере нарастания окисла, $\Delta H/H$ увеличивается и стремится к насыщению. Это указывает на то, что присутствие слоя ЕО во время об-

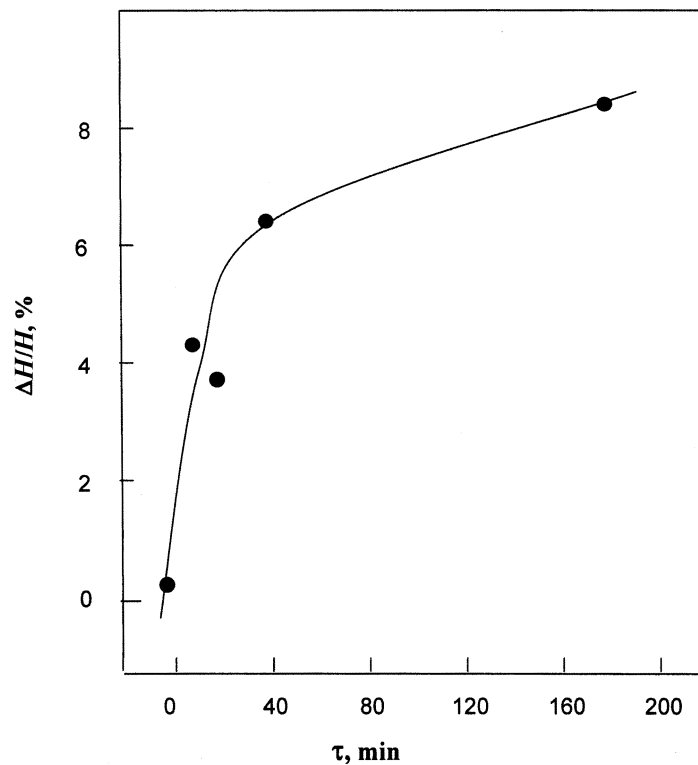


Рис. 2. Влияние удаления окисла с последующей выдержкой на воздухе в течение времени τ на величину относительного изменения микротвердости фольг (тыльная сторона) в результате облучения. Расстояние до источника света — 2.5 см, длительность облучения — 4 с.

лучения является необходимым условием эффекта. Присутствие окисла необходимо именно на облучаемой стороне: если ЕО перед облучением удалялся только с тыльной стороны, это практически не влияло на результат. Заметим, что ЕО выступает в данном явлении лишь в роли посредника, так как изменения механических свойств происходят в самом металле. Удаление ЕО после облучения не изменяет величины H по сравнению с ее значением до удаления.

Каким же образом наличие ЕО может приводить к рассматриваемому эффекту? Предлагается следующая модель. При облучении светом происходят выбивание фотоэлектронов из металла и их захват ловушками в ЕО. В пермаллое, где преобладающий компонент сплава — никель, основой окисла, по-видимому, является окись никеля — диэлектрик с большой долей ионной связи [7]. Захват электрона ЕО влечет локальное нарушение равновесия атомов вследствие кулоновских сил, и возникающие сдвиги атомов порождают ДВ. Этот процесс был нами промоделирован методом молекулярной динамики (кратко об этом упоминалось в [3]). Кубический блок из ионов Ni и O моделировал участок ЕО. В начальный момент времени ионы находились в покое. Затем заряд одного из ионов скачком изменялся на единицу, моделируя захват электрона. Вследствие зарядовой разбалансировки сил межатомного взаимодействия атомы (ионы) приходили в движение. Программа „прослеживала“ скорости и импульсы всех атомов блока; с определенным шагом во времени и пространстве фиксировались величины давления, как результирующей силы (на единицу площади), действующей со стороны движущихся атомов на некоторый выделенный атом, расположенный на заданном расстоянии от „очага“ возмущения. Зависимость от расстояния экстраполировалась за пределы модельного блока. Оказалось, что возникающие давления сравнимы с теми, которые развиваются в тепловых пиках при ионном облучении [6]. После прохождения ДВ в металл процесс может разыгрываться в основном по тому же сценарию, что и в эффекте дальнего действия при облучении ионами [5,6]. В конечном итоге изменение микротвердости обусловлено воздействием ДВ на систему дефектов металла и ее трансформацией. Разница со случаем полупроводников [6] состоит в том, что вместо квазисферических кластеров дефектов основную роль в случае металлов играют дефектно-примесные скопления, локализованные вблизи протяженных дефектов типа дислокаций (атмосферы Котрелла). В пользу участия ДВ свидетельствует то, что H изменяется не только в самой облучаемой фольге, но и в фольге, которая подкладывалась под нее (как и в случае МЭД [5]). Конечно, предлагаемая модель не объясняет всех особенностей рассматриваемого сложного, во многом необычного, явления и служит лишь в качестве „затравки“ для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Вопрос о причинах немонотонности дозовой зависимости $\Delta H/H$ будет обсуждаться отдельно — при изложении данных более подробных исследований, выполненных

нами позднее, а также результатов по исследованию пострадиационной релаксации. В дальнейшем необходимо более детально изучить роль поверхностных пленок, влияние спектрального света, а также привлечь другие методы и распространить исследования на другие металлы.

Работа поддержана программой Минобразования РФ „Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники“, подпрограмма 205.

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., Трофимов А.А., Курильчик Е.В.* и др. // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Сер. Физика твердого тела. 1998. Т. 2. С. 157–161.
- [3] *Tetelbaum D.I., Semin Yu.A., Khabibulov V.V.* et al. // Proceedings of SPIE. 1999. V. 368. P. 264–267.
- [4] *Тетельбаум Д.И., Пантелеев В.А., Азов А.Ю., Гуткин М.В.* // Поверхность. 2000. № 5. С. 87–89.
- [5] *Tetelbaum D.I., Kurilchic E.V., Latisheva N.D.* // Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. 1997. B127/128. P. 153–156.
- [6] *Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д.* и др. // ФТП. 1986. Т. 20. С. 503–507.
- [7] *Лазарев В.Б., Соболев В.В., Шапльгин И.С.* Химические и физические свойства простых окислов. М.: Наука, 1983. 239 с.