

# МОДИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ ПРИ МАЛОДОЗНОМ ИОННОМ И НЕТЕРМИЧЕСКОМ ФОТОННОМ ОБЛУЧЕНИЯХ: ДВЕ РАЗНОВИДНОСТИ ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ

Д.И.Тетельбаум, А.Ю.Азов, П.И.Голяков

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им.Н.И.Лобачевского, 603600, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23/3, e-mail: Tetelbaum@phys.unn.runnet.ru

В работе проведена аналогия между малодозным эффектом дальнего действия (МЭД) в металлах при облучении ионами средних энергий и недавно обнаруженным эффектом фотомеханической памяти металлов (ФПМ) при облучении светом на примере фольг пермаллоя. Показано, что решающую роль при ФПМ играют слои естественного окисла (ЕО). Как в случае МЭД, так и в случае ФПМ, наблюдается немонокотное изменение микротвердости ( $H$ ) фольг на стороне, противоположной облучаемой, при увеличении дозы. Положение максимума изменений  $H$  приблизительно одинаково в обоих случаях в координатах  $\Delta H/H_0 - J$ , где  $J$  – плотность энергии излучения на единицу площади. Обсуждаются некоторые аспекты механизма МЭД с учетом особенностей, установленных при исследовании ФПМ.

## Введение

Недавно было установлено, что облучение металлических фольг светом видимого или ближнего ИК-диапазонов (фотонное облучение) приводит к дальнедействующему изменению свойств металлических фольг, которое проявляется в увеличении микротвердости  $H$ , регистрируемой не только на облучаемой, но и на противоположной сторонах фольги [1-3]. При этом толщина фольги на несколько порядков величины превосходит глубину поглощения света. Эффект не связан с повышением температуры фольги во время облучения, а энергия квантов существенно меньше той, при которой отмечались изменения структуры в случае облучения вакуумным ультрафиолетом [4]. Данный эффект был назван фотомеханической памятью металлов (ФПМ), так как изменения  $H$  сохраняются в течение достаточно большого промежутка времени после облучения.

Ранее нами был установлен другой эффект, заключающийся в изменении микротвердости металлических фольг на стороне, противоположной облучаемой, при ионном облучении – малодозный эффект дальнего действия (МЭД) [5]. Этот эффект обладает рядом интригующих особенностей, которые трудно объяснить в рамках привычных представлений ионной имплантации и даже в рамках представлений, выработанных при изучении других видов эффекта дальнего действия. К числу таких особенностей относятся: наличие пороговой энергии для дальнего действия  $E_{пор}$ ; универсальность значения  $E_{пор}$  (~30 кэВ); немонотонность изменения  $H$  с дозой и наличие практически универсальной дозы, соответствующей максимальному изменению  $H$  (~ $10^{15}$  см<sup>-2</sup>); изменение  $H$  фольг, экранированных другими фольгами.

После установления эффекта ФПМ стало ясно, что между ФПМ и МЭД много общего и естественно возник вопрос, нельзя ли пролить свет на механизмы последнего, используя данные, полученные при изучении ФПМ. Цель настоящей работы состояла в том, чтобы хотя бы

частично попытаться дать ответ на этот вопрос. Поскольку эксперименты по ФПМ производятся на воздухе, это облегчает проведение различных проверочных опытов.

## Основная часть

В качестве материала использовались фольги пермаллоя-79 толщиной 20 мкм. Ионное облучение проводилось на установке ИЛУ-2 ионами  $Ar^+$  с энергией 40 кэВ. При облучении светом использовалась галогенная лампа с мощностью 300 Вт. Варьировались длительность облучения и поверхностная плотность светового потока (путем регулировки расстояния между источником и образцом). Микротвердость фольг измерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 20 г. В каждом случае величина  $H$  определялась путем усреднения по десяти отпечаткам при четырех измерениях диагоналей для одного отпечатка. Специальные исследования показали, что данный метод позволяет вполне надежно (с вероятностью более 0,95) фиксировать изменения  $H$  выше 4 % (в действительности метод оказался еще более чувствительным, когда речь идет не об абсолютных значениях  $H$ , а об их изменениях при внешних воздействиях). Хотя  $H$  измерялась с обеих сторон фольги, в дальнейшем речь идет об изменениях микротвердости на стороне, противоположной облучаемой («тыльной» стороне), что представляет в нашем случае наибольший интерес.

Установлены следующие наиболее важные особенности ФПМ.

1). За изменения  $H$  при засветке ответственны процессы, происходящие в естественном окисле (ЕО): если облучение проводилось в условиях отсутствия или слишком малой толщины ЕО, то ФПМ не наблюдался. Это было установлено при облучении образцов, погруженных в  $HCl$  – травитель, удаляющий ЕО, но не действующий на сам металл. Оказалось также, что на образцах с удаленным ЕО изменения микротвердости происходят только в тех случаях, когда перед облучением образцы выдерживались достаточное время на воздухе

(табл.1). Кроме того, оказалось, что непрерывное облучение и облучение с достаточно длительным перерывом (при одной и той же суммарной экспозиционной выдержке) приводят к неодинаковым результатам (табл.2). Фольга облучалась на расстоянии  $R$  от источника света в течение времени  $t_1$ , и измерялось относительное изменение микротвердости  $\delta_1 = (\Delta H/H_0)_1$ . Образец "отдыхал" в течение времени  $\tau$  с момента окончания облучения, после чего фольга облучалась повторно в течение времени  $t_2$  затем измерялось отношение  $\delta_2 = (\Delta H/H_0)_2$ . Для сравнения в табл.2 указаны значения  $\delta_{\text{непр}}$  –  $\Delta H/H_0$  при непрерывном облучении в течение времени  $t_1+t_2$ . Видно, что при наличии длительного перерыва второе облучение не изменяет значений  $H$ , достигнутых в результате первого облучения.

Таблица 1

Относительные изменения микротвердости на тыльной стороне фольги при облучении светом в зависимости от времени выдержки фольги пермаллоя после стравливания естественного окисла ( $R=2,5$  см,  $t=4$  сек.).

Время выдержки, мин	$\Delta H/H_0$ , %
1	$0,3 \pm 1,6$
10	$4,3 \pm 1,2$
20	$3,7 \pm 1,2$
40	$6,4 \pm 1,1$
180	$8,4 \pm 1,0$

$H_0$  – микротвердость необлученной фольги.

Таблица 2

Изменение микротвердости тыльной стороны фольги пермаллоя-79 при прерывистых и непрерывном облучениях светом

$R$ , см	$t_1$ , сек	$\delta_1$ , %	$\tau$ , мин	$t_2$ , сек	$\delta_2$ , %	$\delta_{\text{непр}}$ , %
1,8	4	6÷7	3	4	0,8	1,6
	4		10		3,6	
	4		30		5,5	
	4		60		5,7	
	8	0	180	2	0	
2,5	4	7,4	180	4	6,0	1,6
4	2	0	180	6	1,8	9,5

Данные табл.2 свидетельствуют о влиянии на результаты повторного облучения процессов, которые протекают в ЕО во время перерыва.

2). Изменение  $H$  при облучении светом немонотонно зависит от поверхностной плотности энергии излучения  $J$  (дозы): с увеличением  $J$  величина относительного роста микротвердости ( $\Delta H/H_0$ ) сначала возрастает, а затем уменьшается до величин, сравнимых с погрешностью измерений. Примечательно, что положение максимума на шкале  $J$  практически не зависит от условий облучения и составляет  $\sim 10$  Дж/см<sup>2</sup>.

В случае ионного облучения при МЭД, как уже говорилось,  $\Delta H/H_0$  тоже немонотонно зависит от дозы. Мы перестроили эту зависимость в

координатах  $\Delta H/H_0 - J$ , где  $J$  – полная энергия, полученная единицей поверхности фольги от ионного пучка (рис.1). Хотя кривая построена для ионов  $Ag^+$  (с энергией  $E=40$  кэВ), она имеет такой же вид для любых ионов и не зависит от сорта мишени (по крайней мере, для исследованных

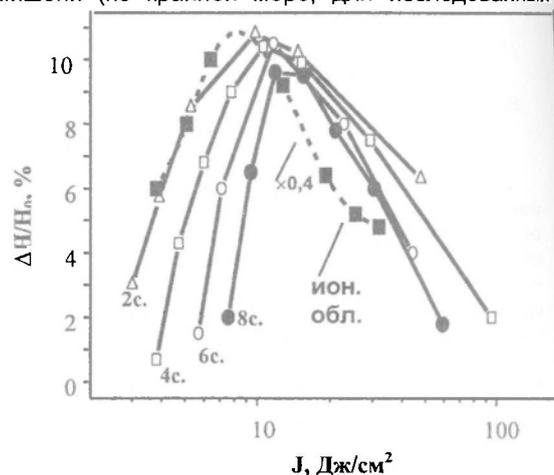


Рис.1. Зависимость относительного изменения микротвердости фольг пермаллоя-79 (тыльная сторона) от дозы облучения светом при различных длительностях и ионами  $Ag^+$  ( $E=40$  кэВ).

нами веществ – пермаллою,  $Cu$ ,  $Ta$ ,  $Al$ ,  $Fe-P-B$ ). Примечательно, что данная кривая практически совпадает с кривыми для случая облучения светом. Это с достаточно большой степенью вероятности свидетельствует о том, что в основе МЭД и ФПМ лежат сходные процессы. В случае ФПМ – это процессы в естественном окисле. Согласно предложенной нами модели [2,3], ФПМ обусловлен влиянием на дефектную систему металла деформационных волн, генерируемых в естественном окисле при захвате им фотоэлектронов. Возможность генерации таких волн была продемонстрирована методом молекулярной динамики. Естественно предположить, что и в случае МЭД процессы, ответственные за структурные перестройки, меняющие механические свойства на больших расстояниях от зоны облучения, инициируются в тонких неметаллических слоях, присутствующих во время облучения на поверхности фольг. Это могут быть как слои ЕО, так и слои адсорбированных молекул ( $H_2O$ ,  $O_2$  и др.). Если продолжить аналогию, то можно допустить, что в случае МЭД, основным процессом в металле, ответственным за эффект, является электронное торможение ионов. (Заметим, что МЭД имеет место и в случае облучения электронами с энергиями несколько десятков кэВ [5]). Как показывают оценки, средняя плотность поглощенной энергии, расходуемой на электронные процессы, в случае ионного и светового облучения, в большинстве случаев одного порядка при одних и тех же значениях  $J$ , что оправдывает указанное предположение о роли электронных процессов в МЭД.

При наличии сходства, МЭД и ФПМ имеют и заметные различия. Если в случае МЭД

изменения механических свойств сохраняются неопределенно долго (по крайней мере, в течение одного года), то в случае ФПМ они спадают в течение нескольких суток. Если считать, что в обоих случаях изменения свойств обусловлены воздействием деформационных волн на систему протяженных дефектов металла [5], то указанное различие можно истолковать следующим образом. При ионном облучении локальная плотность возбуждения (в треке ионов) на несколько порядков величин выше, чем в случае фотонного облучения. Поэтому деформационные волны имеют большую амплитуду и «забрасывают» систему в состояние, отделенное от исходного более высоким энергетическим барьером, но в то же время более долгоживущее состояние. Несмотря на эти различия, можно считать, что оба явления представляют собой два вида одного и того же эффекта дальнего действия.

### Заключение

Обнаружение ФПМ позволяет сделать некоторые заключения о механизме МЭД и промоделировать различные ситуации с целью выяснения причин, лежащих в основе данного эффекта. В частности, становится более понятной немонотонность зависимости изменения механических свойств в МЭД от дозы. Скорее всего, в основе этой немонотонности лежат изменения, происходящие с ростом дозы в тонком слое постороннего вещества, расположенном на поверхности металлического образца. Универсальный характер этой зависимости может быть обусловлен как близостью общих потерь на электронное

возбуждение (в расчете на единицу объема), так и химическим подобием компонентов поверхностных загрязнений, ответственных за генерацию деформационных волн в различных металлах. Аналогичные аргументы можно привести и для объяснения универсальности энергетического порога МЭД. Разумеется, ввиду чрезвычайной сложности и новизны указанных явлений, они нуждаются в более детальных исследованиях. Приведенные результаты показывают, что для выяснения фундаментальных процессов, лежащих в основе дальнего действия влияний внешних воздействий на поверхностные слои твердых тел целесообразно проводить комплексные исследования различных видов эффекта на одних и тех же объектах с учетом как общих, так и специфических факторов.

### Список литературы

1. Тетельбаум Д.И., Трофимов А.А., Азов А.Ю., Курильчик Е.В., Доценко Е.Е. // Письма в ЖТФ - 1998. - Т.24. - В.23. - С.9.
2. Тетельбаум Д.И., Трофимов А.А., Курильчик Е.В., Азов А.Ю., Доценко Е.Е. // Вестник Нижегородского государственного университета им.Н.И.Лобачевского. Сер.Физика твердого тела. - 1998. - В.2. - С.157.
3. Tetelbaum D.I., Semin Yu.A., Khabibulov V.V., Azov A.Yu., Trofimov A.A. // Proceedings of SPIE. - 1999. - V.3687. - P.264.
4. Козьма А.С., Малыгин С.В., Соболев О.В. и др. // ФММ. - 1991. - № 7. - С.168.
5. Tetelbaum D.I., Kurilchik E.V., Latisheva N.D. // Nucl. Instrum. and Meth. In Phys. Res. - В.1997. - 127/128. - P.153.

## THE MODIFICATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF METALS AT ION AND ATHERMIC PHOTON IRRADIATIONS: TWO KINDS OF THE LONG-RANGE EFFECT

D.I.Tetelbaum, A.Yu.Azov, P.I.Golyakov

Physico-technical research institute of Niznii Novgorod state university, Gagarin prosp.23/3, 603600, Niznii Novgorod, e-mail: Tetelbaum@phys.unn.runnet.ru

It was revealed recently that the irradiation of metal foil with the light of visible or near-infrared regions results in the far-penetrating changes of the microhardness ( $H$ ). The effect was called "photomechanical memory of metals" (PMM). Another phenomenon that was established for metal foil of several metals is the low-dose long-range effect (LDLRE) at ion irradiation. The latter effect has some unusual features such as the existence of the universal energy threshold, the universal dose dependence of the effect magnitude, e.g. In the present work, the similarity between PMM and LDLRE are discussed. The foils of permalloy-79 are taken as the example. It is shown that the dependence of the relative  $H$  change ( $\Delta H/H_0$ ) the incident surface density of the light energy (dose) is a non-monotonous one. Very important feature of the PMM is that it disappears for the conditions when the native oxide (NE) on the top foil surface is taken off before irradiation. It is suggested that NE traps the photoelectrons from metal and thus, the excitation of the strain waves (SW) occurs. The SW penetrate through the foil and interact with its defect system. Because of the similarity between dose dependencies of  $\Delta H/H_0$  for PMM and LDLRE, it is assumed that the mechanisms of this phenomena are two kind of one and the same effect.