

При $j^2 < D^2(3 - \arctg D/\pi)$ интервал (12) находится в I или IV квадранте, следовательно, знак (11) положителен. Для D_{\min} первый член в сумме (9), для которого $\operatorname{Re} M_j < 0$, соответствует $j = 5$. Таким образом, условие на j практически не является ограничением, потому что сумма в (9) определяется небольшим числом первых слагаемых из-за быстрого убывания модуля коэффициента дифракционной связи ($|M_j| \sim \exp(-j^2)$). Физически это соответствует тому факту, что дифракционная связь значима для конечного числа соседних каналов. Неравенство (10), таким образом, выполняется.

Отметим, что результат (10) остается в силе и для цилиндрической решетки со связью «ближайших соседей» ($j = 1$), если $\operatorname{Re} M_1 > 0$, однако в этом случае абсолютная величина декрементов затухания $\operatorname{Re} \sigma_k$ падает и устойчивость синфазной генерации снижается.

Таким образом, дифракционная связь за счет эффекта Тальбо приводит к дальнедействующей поло-

жительной кооперативности [5] элементов цилиндрической лазерной решетки. Следствием этого является высокая степень устойчивости синфазного режима генерации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-17151).

Литература

1. Кандидов В.П., Левакова И.Г. // Квант. электроника. 1995. **22**. С. 93.
2. Кандидов В.П., Кондратьев А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 2. С. 66 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 2).
3. Кандидов В.П., Кондратьев А.В. // Квант. электроника. 1997. **24**. С. 240.
4. Лиханский В.В., Напартович А.П. // УФН. 1990. **160**. С. 101.
5. Белинцев Б.Н., Лившиц М.А., Волькенштейн М.В. // ДАН СССР. 1981. **257**. С. 487.

Поступила в редакцию
01.10.97

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 669.017.3:533.77

ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ МИКРОНАПРЯЖЕНИЙ В ДЕФОРМИРОВАННОМ СПЛАВЕ Pd–Er ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО НАСЫЩЕНИЯ ВОДОРОДОМ

В. М. Авдюхина, А. А. Кацнельсон, Н. А. Прокофьев, Г. П. Ревкевич

(кафедра физики твердого тела)

Измерены параметры решетки для деформированного образца сплава Pd–Er до насыщения его водородом и при последующей дегазации. Обнаружено, что ориентированные микронапряжения частично изменяются в процессе дегазации. Эти изменения носят немонотонный характер.

В работе [1] нами было впервые установлено, что ориентированные упругие микронапряжения, существующие вблизи поверхности в деформированных образцах палладия и сплавов на его основе (Pd–Pt, Pd–Cu, Pd–Hf, Pd–Sm), меняются не только по величине, но и по знаку после насыщения их водородом. Это означает, что при насыщении водородом межплоскостные расстояния (по нормали к поверхности), увеличенные при деформировании образца, уменьшаются после насыщения его водородом. Степень насыщения, необходимая для реализации этого эффекта, оказывается разной в сплавах с разными компонентами. Такое уменьшение межплоскостных расстояний при насыщении водородом деформированных сплавов невозможно объяснить, не предположив существования особого взаимодействия между водородом и дефектами, связанного с перераспределением электронов в возникающей системе палла-

дий–металл–водород–дефекты. Более того, поскольку величина обнаруженного эффекта согласно [1] зависит и от легирующего компонента, в указанном особом взаимодействии участвуют и атомы матрицы. Существенно отметить, что этот эффект возникает на фоне однородного расширения кубической решетки, определяемого согласно [2] только количеством вошедшего в решетку водорода.

В связи с этим становится особо интересным вопрос: сводится ли рассматриваемый эффект к изменению содержания водорода или он связан с возникновением при насыщении и последующей дегазации некоторых промежуточных структур, обогащенных атомами (ионами) водорода и дефектами?

В первом случае изменение величины микронапряжений должно происходить сразу же после появления в образце водорода, и величина эффекта должна быть тем больше, чем больше в системе водород-

да. Дегазация системы при хранении образца на воздухе должна приводить к уменьшению этого эффекта. Во втором случае временные зависимости изменения величины и знака микронапряжений не должны определяться только изменением концентрации водорода.

Целью настоящей работы является решение данного вопроса. Для этого были проведены рентгенокинетические исследования параметров решетки сплава Pd-Er при дегазации этой системы после насыщения его водородом.

Объектом исследования служил деформированный образец сплава Pd-8 ат.% Er, который электролитически насыщался водородом при плотности тока 80 мА/см² в течение 60 мин. После насыщения образец хранился на воздухе при комнатной температуре. Все измерения проводились на автоматизированном рентгеновском дифрактометре ДРОН-УМ2 (сопряженном с IBM PC-486) с использованием CuK_{α} излучения.

Для анализа экспериментально найденных величин a_{exp} использовалось выражение [3]:

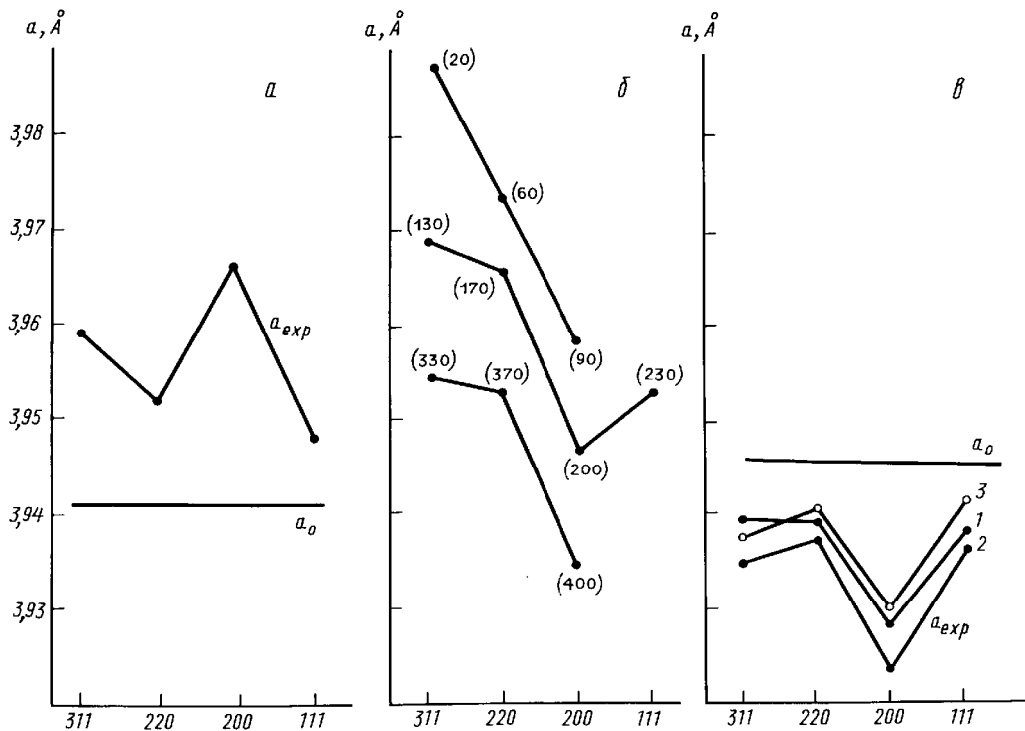
$$a_{\text{exp}} = a_0 + a_0 \sigma K_{hkl}, \quad (1)$$

где a_0 — параметр кубической решетки, $a_0 \sigma K_{hkl}$ — изменение параметра решетки, обусловленное наличием ориентированных микронапряжений σ , направленных вдоль нормали к поверхности образца;

K_{hkl} — коэффициент, зависящий от постоянных упругой податливости и индексов данного кристаллографического направления. Поскольку K_{hkl} — величина отрицательная, то при отрицательной величине σ решетка будет расширяться, а при положительной — уменьшаться. Рассмотренные эффекты максимальны вдоль направления [100], минимальны вдоль [111]. Представление a_{hkl} в графическом виде дает ломаную линию. Параметры a_0 и σ предполагаются независимыми, поскольку первый из них зависит только от количества водорода, вошедшего в решетку [2], а второй может зависеть еще и от особенностей взаимодействия водорода с дефектными структурами.

Полученные данные о рассчитанных по положению дифракционных максимумов значениях a_{hkl} в исходном состоянии, а также на разных стадиях процесса дегазации представлены на рисунке. В исходном состоянии (рисунок, а) соотношение величин a_{hkl} соответствует отрицательному знаку микронапряжений σ . Расчет показал, что в этом случае $\sigma = -110 \pm 10$ кг/мм², $a_0 = 3,941 \pm 0,001$ Å.

Ломаная линия, представляющая значения a_{hkl} в релаксирующем после насыщения водородом образце, оказалась уже через сутки перевернутой (ср. a_{exp} на рисунках а и б), т.е. микронапряжения изменили знак. Расчет по (1) показал, что через сутки $\sigma = 60$ кг/мм², $a_0 = 3,946$ Å (величина a_0 также приведена на рисунке, в).



Значения a для разных состояний образца: исходное (а); в первые часы после насыщения водородом (б) (цифры в скобках показывают время в минутах, прошедшее после насыщения) и через несколько суток после насыщения (в) (через 1 (1), 2 (2) и 10 (3) сут)

Еще через сутки (48 ч) ломаная линия опустилась ниже (2 на рисунке, б), а через 10 сут вновь поднялась вверх (3 на рисунке, б). Поскольку для этих трех состояний величины a_0 в пределах ошибок измерений совпадают, то подобные изменения положения ломаных означают, что величина микронапряжений σ спустя 2 сут после насыщения проходит через максимум. Расчет подтвердил это качественное заключение: после 2 сут хранения образца $\sigma = 90 \text{ кг/мм}^2$, а через 10 сут $\sigma = 70 \text{ кг/мм}^2$.

Сравнение величин a_0 для исходного состояния и для состояний через 1, 2 и 10 сут показывает, что за последние 9 сут количество водорода практически не изменилось: отношение числа атомов водорода к числу атомов палладия $n_{\text{H}}/n_{\text{Pd}} = 0,02 \div 0,025$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что насыщение водородом деформированного образца и последующее его хранение на воздухе вызывают сжатие решетки. Принципиально новыми по сравнению с [1] оказались два обстоятельства: 1) заметные изменения $\sigma(t)$ происходят на фоне резко замедлившейся дегазации, 2) величина $\sigma(t)$ проходит через максимум. Оба этих обстоятельства означают, что появление в деформированном сплаве водорода вызывает формирование дефектных образований, вероятно, с повышенным содержанием водорода, релаксационные характеристики которых отличаются от релаксационных характеристик матрицы. Только этим, нам представляется, можно объяснить отсутствие синхронности изменений $n_{\text{H}}/n_{\text{Pd}}(t)$ и $\sigma(t)$.

Рассмотрим теперь, какую дополнительную качественную информацию можно извлечь из данных, полученных в ходе первых часов релаксации образца (рисунок, б). На средней ломаной a_{111} ($t = 230$ мин) больше, чем a_{200} ($t = 200$ мин). Это можно объяснить лишь тем, что величина σ стала положительной. Таким образом, процесс изменения σ происходит менее чем за 200 мин хранения образца. К тому же a_{200} при $t = 90$ мин меньше, чем a_{200} для исходного состояния; и это может быть связано только с тем, что заметные изменения σ происходят в первые 2 ч хранения образца.

Совокупность имеющихся данных показывает, что наблюдаемое изменение σ происходит в процессе дегазации. При этом в течение по крайней мере первых суток σ растет, что приводит к постепенному сжатию решетки вдоль нормали к поверхности образца. Поэтому, хотя еще не известно, происходят ли какие-либо изменения σ в процессе насыщения, несомненно то, что по крайней мере частично изменения σ происходят на стадии дегазации.

Итак, в работе получено, что в процессе релаксации после насыщения водородом в неравновесной системе Pd–Er–H происходит формирование насыщенных водородом промежуточных структур, релаксационные характеристики которых заметно отличаются от релаксационных характеристик матрицы. Поскольку появившиеся структуры явно обусловлены особенностями поведения неравновесных систем, эти структуры являются диссипативными. Таким образом, изменения в рассматриваемой системе связаны с диффузионными перестройками структуры, которые, несомненно, не сводятся к диффузионным перемещениям одних лишь атомов водорода. В первые часы дегазации возникают комплексы, содержащие помимо атомов матрицы водород и дефекты структуры, трансформация которых определяет характер временной зависимости ориентированных микронапряжений в деформированных сплавах Pd–Er–H.

Работа частично финансировалась Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-02-17263) и программой «Университеты России» (20-96ф).

Литература

1. Ревкевич Г.П., Миткова М.К., Кацельсон А.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1993. № 6. С. 70 (Moscow University Phys. Bull. 1993. No. 6. P. 63).
2. Водород в металлах / Под ред. Г. Альфельда, М. Фелькля. М., 1981.
3. Chatter S.K., Halder S.K., Sen Gupta S.P. // J. Appl. Phys. 1976, 47, No. 2. P. 411.

Поступила в редакцию
02.07.97