

### Заключение

Установлено, что при взаимодействии ударной волны с потоком газа с пульсациями продольной компоненты скорости происходит усиление возмущений плотности. Поведение коэффициента усиления зависит от модели турбулентности. Для возмущения продольной компоненты скорости в виде пакета импульсов со случайными амплитудами коэффициент усиления возрастает с увеличением интенсивности ударной волны, слабо убывает с ростом амплитуды возмущений при малых амплитудах и возрастает при возмущениях умеренной интенсивности. Исследованы стохастические характеристики поля плотности перед ударной волной и после ее прохождения через турбулентное течение. Вычислены коэффициенты корреляции и спектральные функции. Установлено, что в результате взаимодействия турбулентной области с ударной волной среднее волновое число увеличивается.

Экспериментально определено, что значения коэф-

фициента усиления турбулентных пульсаций после прохождения ударной волны лежат в диапазоне  $1 \div 3$  для чисел Маха  $= 1,35 \div 1,6$ . Масштаб турбулентности за ударной волной уменьшается. Экспериментальные результаты согласуются с теоретическими.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 94-01-01638).

### Литература

1. Hesselink L., Sturtevant B. // J. Fluid Mech. 1988. 196. P. 513.
2. Wintrich H., Merzkirch W. // Proc. 19th Int. Symp. on Shock Waves. 1995. 4. P. 319.
3. Самсонов А.В., Штеменко Л.С., Шугаев Ф.В., Яницкий В.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 6. С. 33 (Moscow University Phys. Bull. 1995. No.6. P. 29).
4. Азарова О.А., Братинкова Е.А., Самсонов А.В. и др. // Там же. 1996. № 5. С. 46 (Moscow University Phys. Bull. 1996. No.5).
5. Weiner M.M. // Appl. Opt. 1967. 6, No.11. P. 1984.

Поступила в редакцию  
15.01.97

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 669.017.3:533.77

### СТАДИЙНОСТЬ ПРОЦЕССА $\beta \rightarrow \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ В СИСТЕМЕ Pd-H

А. А. Кацнельсон, М. А. Князева, А. И. Олемской, Г. П. Ревкевич

(кафедра физики твердого тела)

**Показано, что стадийный характер процесса дегазации в системе Pd-H обусловлен поэтапным развитием дефектной структуры. Для массивных образцов переход от одного этапа к другому, связанный с зарождением новой дислокационной структуры, сопровождается остановкой  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения.**

### Введение

Как известно, образующаяся в системе Pd-H в процессе  $\alpha \rightarrow \beta$  превращения  $\beta$ -фаза при комнатных условиях не является равновесной [1] и ее распад происходит в процессе последующего  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения. Четко выявлено [2–5], что процесс  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения имеет стадийный характер. На первой стадии (инкубационный период) начальное содержание  $\beta$ -фазы практически не меняется, на второй (стадия скоростной дегазации) количество  $\beta$ -фазы уменьшается со временем в соответствии с одним из установленных законов [4–7]. На третьей стадии наступает существенное замедление процесса  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения (стадия стабилизации), при котором содержание гидридной фазы в течение довольно длительного времени остается практически неизменным [3–5, 7]. Поиск объяснения характерных черт эволюции процесса дегазации, в том числе и стадийности процесса  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения, начался с первых публикаций [3–5], и здесь он будет продолжен.

Протекание фазовых превращений в системе Pd-H

сопровождается значительной дилатацией решетки, что приводит к образованию многочисленных дефектов [8]. В работах [5–7, 9] показано, что при достижении критических концентраций одиночные дефекты образуют иерархические комплексы: вакансии коагулируют и появляются дислокационные петли; дислокации выстраиваются в малоугловые стенки и т.д. Возникновение иерархической дефектной структуры приводит к тому, что потенциальный барьер, преодолеваемый межфазной границей в ходе дегазации, приобретает фрактальную структуру, вызывающую замедление движения межфазной границы [5]. При этом зависимости содержания  $\beta$ -фазы от времени (на второй стадии) описываются уже не экспоненциальным законом, а степенным и логарифмическим [5, 6].

Дефектная структура формируется в открытой системе Pd-H; возвращение системы в состояние равновесия происходит в процессе дегазации, частью которого является  $\beta \rightarrow \alpha$  превращение. Структурные изменения можно рассматривать как процессы самоорганизации дефектной структуры с возникновением диссипативных

структур на промежуточных этапах. В работе [10] выявлены этапы развития дефектной структуры в системе Pd-H, соответствующие возникновению характерной дислокационной субструктуры в определенной фазе. В работах [11–16] проведен анализ данных в рамках современных представлений о деформируемом кристалле как о синергетической системе.

Учитывая, что состояние дефектной структуры в системе Pd-H является определяющим фактором для кинетики  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения и развитие дефектной структуры носит поэтапный характер [10], уместно предположить, что именно с этим связана стадийность процесса обратного фазового превращения. Настоящая работа посвящена выяснению данного вопроса.

### Результаты и обсуждение

В данной работе использованы экспериментальные данные, полученные ранее [4, 5, 7, 9], анализ которых будет проведен в рамках схемы развития дефектной структуры в Pd-H, предложенной в работе [10].

Исследования проводились на двух литых образцах, один из которых был продеформирован шлифовкой и полировкой; другой отжигался при температуре  $700^\circ\text{C}$  в течение 2 ч, затем остывал вместе с печью.

Деформированный образец подвергался однократному насыщению при плотности тока  $40\text{ мА/см}^2$  в течение 15 мин. Начальное содержание  $\beta$ -фазы составило 80%. На рис. 1, приведена зависимость объемного содержания  $\beta$ -фазы  $p$  от времени хранения  $t$  этого образца.

В первые 5 ч содержание  $\beta$ -фазы фактически не меняется. В последующие 40 ч ее содержание уменьшается до 20%; затем вплоть до 170 ч хранения величина  $p$  не меняется. Таким образом, процесс  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения действительно состоит из трех стадий: инкубационный период (I стадия), собственно процесс  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения (II стадия) и стабилизация  $\beta$ -фазы (III стадия).

Обратимся к дефектной структуре. Наиболее интересные данные, коррелирующие с переходом от одной стадии к другой, были получены для изменения размеров областей когерентного рассеяния (ОКР)  $D$  при хранении образца (рис. 1). Исходный их размер был равен  $1,5 \cdot 10^{-5}$  см. В результате насыщения водородом размер ОКР  $\alpha$ -фазы уменьшился до  $4 \cdot 10^{-6}$  см. При дальнейшей дегазации параметр  $D$  оставался неизменным. Этот факт свидетельствует о том, что изменение дефектной структуры  $\alpha$ -фазы, соответствующее образованию ячеек субструктуры [10], произошло непосредственно в процессе насыщения.

ОКР  $\beta$ -фазы в результате насыщения достигли размеров исходной  $\alpha$ -фазы. При дегазации изменение размеров указанных областей наблюдается только в  $\beta$ -фазе. За 25 ч хранения размеры областей уменьшаются до  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$  см, т.е. образуются ячейки субструктуры. При последующем хранении изменение субструктуры носит совершенно иной характер. Наблюдается рост размеров ОКР  $\beta$ -фазы: за время хранения в течение примерно 150 ч параметр  $D$  увеличивается до  $6 \cdot 10^{-6}$  см.

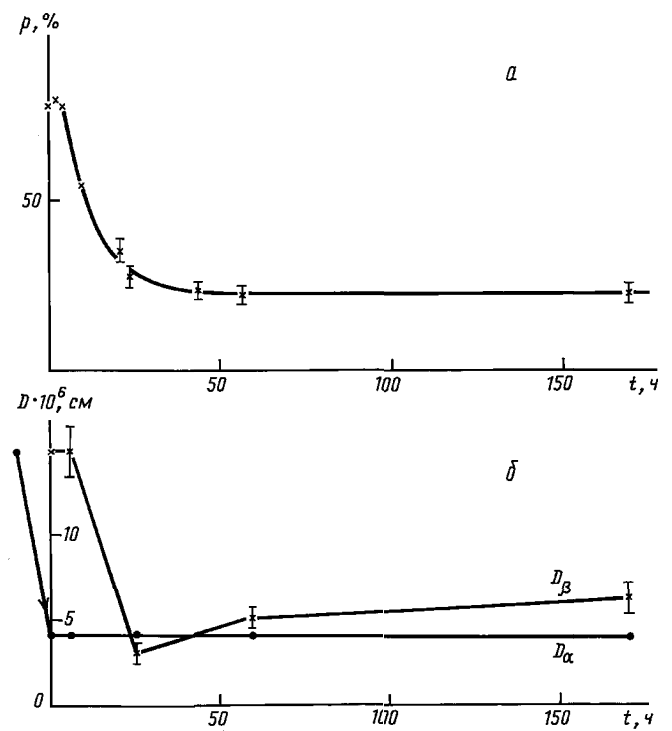


Рис. 1. Зависимость объемного содержания  $\beta$ -фазы  $p$  (а) и размера ОКР (б) от времени хранения  $t$  для деформированного образца

Учитывая приведенные экспериментальные данные, можно считать, что уже в процессе насыщения образца пройден I этап развития дефектной структуры, так как за это время образовалась ячеистая субструктура в  $\alpha$ -фазе. Непосредственно после насыщения в  $\beta$ -фазе существует блочная структура. После формирования ячеистой субструктуры образующиеся в ней в результате  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения хаотические дислокации согласно [10] перетекают в  $\beta$ -фазу, ограничивая дальнейшее развитие дефектной структуры в  $\alpha$ -фазе. Последующее выстраивание хаотических дислокаций в стенки приводит к образованию ячеистой субструктуры в  $\beta$ -фазе, т.е. реализуется II этап в рамках предложенной в работе [10] схемы. Причем, как видно из рис. 1, длительность данного этапа сравнима с продолжительностью стадии скоростной дегазации, описываемой степенным законом. Определить точно временные границы в процессе дегазации каждого из этапов развития дефектной структуры достаточно сложно. Это связано с тем, что зарождение новой субструктуры происходит в объеме прежней субструктуры [11], и какое-то время два типа сосуществуют одновременно до тех пор, пока новая субструктура не станет преобладающей. Для данного образца можно считать, что зарождение и развитие ячеистой субструктуры в  $\beta$ -фазе происходит в основном в пределах стадии скоростной дегазации.

При последующем хранении в  $\beta$ -фазе наблюдается рост размеров ОКР, т.е. начинается процесс образования блочной субструктуры. Это происходит, вероятнее всего, за счет ухода дислокаций и стенок в границы. Как видно из рис. 1, начало этого процесса в  $\beta$ -фазе относится к интервалу 25–60 ч. При этом рост

ОКР продолжается и в последующие часы хранения. Можно считать, что образование блоков происходит в основном на стадии стабилизации  $\beta$ -фазы, начинающейся приблизительно через 40–50 ч хранения образца (рис. 1).

Отметим, что в процессе роста размеры ОКР увеличиваются примерно в два раза, не достигая при этом размеров ОКР, образовавшихся непосредственно в процессе насыщения водородом. Экспериментально фиксируемая величина  $D$  является усредненной по всем ОКР. В действительности реально должно существовать распределение ОКР по размерам, по-видимому, от минимального, соответствующего размеру ОКР в исходной ячеистой субструктуре, до максимального, соответствующего уже размеру блоков в последующей блочной субструктуре.

В работе [17] показано, что в ходе деформации кристалла в возникающей ячеистой субструктуре существует распределение по размерам ячеек до тех пор, пока продолжается процесс образования новых дислокационных границ. Процесс деления ячеек имеет место до тех пор, пока не будет достигнут некоторый средний размер, близкий к равновесному. Причем доля объема материала, не занятого ячеистой субструктурой, уменьшается экспоненциально с ростом деформации.

В нашем случае образующиеся блоки занимают незначительную часть в существующей ячеистой субструктуре. Поэтому на III стадии дегазации формирование блочной субструктуры нельзя считать законченным. Активная перестройка дефектной структуры, в ходе которой зарождается новый тип субструктуры, сопровождается остановкой процесса  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения.

**Циклированный образец** (этот образец предварительно отжигался) подвергался девяти циклам «насыщение–дегазация». Непосредственно после последнего насыщения содержание  $\beta$ -фазы в ОКР(100) составило 80%. На рис. 2, представлена зависимость  $p(t)$  для этого образца.

В течение первых  $4 \cdot 10^3$  ч фазовое превращение в образце не идет, наблюдается I стадия, представляющая собой инкубационный период. Затем начинается процесс дегазации (II стадия), после  $\sim 5,0 \cdot 10^4$  ч наблюдается стабилизация  $\beta$ -фазы (III стадия).

Итак, стадия стабилизации гидридной фазы в процессе  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения обнаруживается для литых образцов с различным исходным состоянием, насыщавшихся при разных условиях. Это явление наблюдалось для ОКР разных кристаллографических ориентировок [8].

Рассмотрим изменение параметров субструктуры при  $\beta \rightarrow \alpha$  превращении, отметив, что изначально размер ОКР(100) составлял  $3 \cdot 10^{-5}$  см [6].

Изменения размеров ОКР после последнего насыщения представлены на рис.2,б. В первые  $50 \cdot 10^3$  ч изменение субструктуры наиболее интенсивно идет в  $\beta$ -фазе. При этом  $D$  увеличивается в 3,5 раза. Последующее хранение приводит к такому же интенсивному росту ОКР (в 3,5 раза) в  $\alpha$ -фазе.

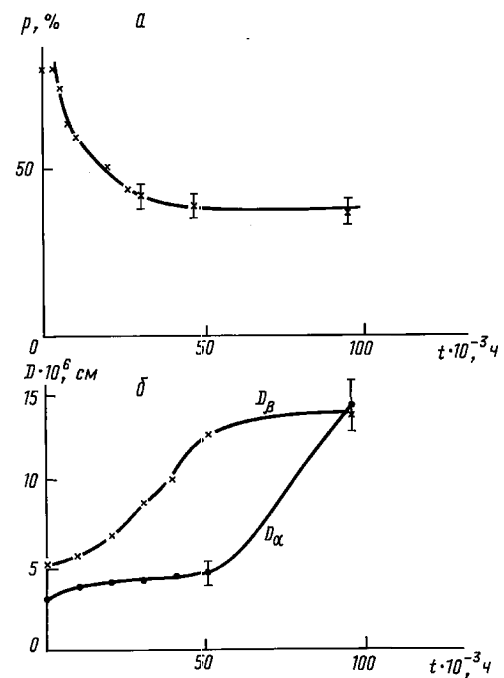


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для циклированного образца

Многочисленное циклирование отожженного образца привело к более существенным изменениям субструктуры, чем в деформированном образце. Из данных, представленных в работе [6], следует, что первые два этапа развития иерархической дефектной структуры (образование ячеистой субструктуры в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах) пройдены во время циклирования. К окончанию процесса циклирования формирование ячеистой субструктуры в обеих фазах можно считать завершенным. При хранении образца блоки появляются сначала в  $\beta$ -фазе, а затем в  $\alpha$ -фазе. Причем образование блочной субструктуры в  $\beta$ -фазе происходит на стадии скоростной дегазации, так как к моменту времени  $t \sim 50 \cdot 10^3$  ч размеры большинства ОКР  $\beta$ -блоков достигают исходных:  $13 \cdot 10^3$  см. После  $50 \cdot 10^3$  ч хранения (на стадии стабилизации  $\beta$ -фазы) активизируется процесс роста ОКР в  $\alpha$ -фазе — образуются блоки. Поскольку за время наблюдения размеры ОКР не достигают исходных, можно предположить, что образование блочной субструктуры в  $\alpha$ -фазе не завершилось.

Можно считать, что на стадии скоростной дегазации циклированного образца происходит в основном формирование блочной субструктуры в  $\beta$ -фазе; а на стадии стабилизации  $\beta$ -фазы — зарождение блочной субструктуры в  $\alpha$ -фазе.

Итак, эволюция возникающей в пределах одного этапа изменения субструктуры определяет характер кинетики  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения на соответствующей стадии. Как только эволюция подобной субструктуры закончилась, зарождается новая субструктура, что означает переход к следующему этапу развития иерархической дефектной структуры. Этот переход для массивных образцов сопровождается остановкой  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения в процессе дегазации. Процесс формирования блочной

субструктуры связан с активным движением дислокационных стенок, что может служить препятствием для движения межфазной границы.

По мере увеличения объема, занимаемого новым типом субструктуры, ее роль становится определяющей — реализуется следующий этап. Скорее всего, соответствующая ему стадия будет описываться законом более медленного спадания, поскольку усиление иерархической соподчиненности в дефектном ансамбле по мере его развития приводит к торможению движения межфазной границы при  $\beta \rightarrow \alpha$  превращении.

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-02-17263) и программой «Университеты России» (грант 20-96-ф).

#### Литература

1. Водород в металлах. / Ред. Г.И. Алефельд, И. Фелькль. Т. 1. М., 1981.
2. Ревкевич Г.П., Христов В.М., Кацнельсон А.А. Деп. ВИНТИ № 936-В87. М., 1987.
3. Ревкевич Г.П., Свешников С.В., Кацнельсон А.А. // Изв. вузов, Физика. 1988. № 5. С. 102.
4. Ревкевич Г.П., Кацнельсон А.А., Христов В.М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ.Астрон. 1988. № 3. С.72 (Moscow University Phys. Bull. 1988. No.3. P. 74).
5. Ревкевич Г.П., Олемской А.И., Кацнельсон А.А., Христов В.М. // Металлофизика. 1990. 12, № 3. С. 71.
6. Ревкевич Г.П., Олемской А.И., Князева М.А., Кацнельсон А.А. // ФММ. 1993. 76, № 1. С. 101.
7. Ревкевич Г.П., Олемской А.И., Князева М.А., Кацнельсон А.А. // ФММ. 1995. 79, № 2. С. 87.
8. Jamieson H.C., Weatherly G.C., Manchester F.D. // J. Less-Common Met. 1976. 50, No.1. P. 85.
9. Ревкевич Г.П., Князева М.А., Олемской А.И., Кацнельсон А.А. // ФММ. 1992. № 9. С. 43.
10. Кацнельсон А.А., Князева М.А., Олемской А.И., Ревкевич Г.П. // ФТТ. 1997. 39, № 7. С. 1275.
11. Панин В.Е., Григяев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушение. Новосибирск, 1990.
12. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М., 1986.
13. Панин В.Е., Елсукова Т.Ф. // Синергетика и усталостное разрушение металлов. М., 1989. С. 113.
14. Елсукова Т.Ф., Панин В.Е. // Изв. РАН, Металлы. 1992. № 2. С. 73.
15. Конева Н.А., Козлов Э.В. // Изв. вузов, Физика. 1982. № 8. С. 3.
16. Олемской А.И., Скляр И. А. // УФН. 1992. 162, № 6. С. 29.
17. Малыгин Г.А. // ФММ. 1990. 68, № 5. С. 22.

Поступила в редакцию  
31.03.97