

СТРУКТУРА,
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 669.234'794:621.039.341.22

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДИФФУЗИОННЫХ ФИЛЬТРОВ-МЕМБРАН
НА ОСНОВЕ ПАЛЛАДИЯ

© 2019 г. О. В. Акимова^{а, *}, А. А. Велигжанин^б

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

^бНИЦ “Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

*e-mail: akimova@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 29.01.2019 г.

После доработки 12.03.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

Проведены рентгеноструктурные исследования металлических диффузионных фильтров системы палладий-иттрий. Целью исследований является выявление влияния высокотемпературного воздействия на фазовые преобразования в сплавах на основе палладия. Выявлены обусловленные дополнительным отжигом одной из мембран преобразования фазового состава и различия подсистем дефектов в сплаве. Установлено уменьшение микроскажений по изменению размытия дифракционных отражений вследствие отжига. Отмечено формирование доменов с увеличенным параметром элементарной ячейки по сравнению с параметром решетки матричной структуры и установлено влияние высокотемпературного отжига на структурное состояние этих доменов.

Ключевые слова: рентгеновская дифракция, рентгеноструктурные исследования, синхротронное излучение, металлические диффузионные фильтры на основе палладия

DOI: 10.1134/S0015323019080023

ВВЕДЕНИЕ

Востребованность диффузионных методов получения водорода с применением металлических фильтров-мембран на основе палладия возрастает год от года [1–4]. Сепарация водорода с использованием криогенных, химических, диффузионных с использованием полимерных мембран технологий не может обеспечить столь высокую степень очистки от примесей [1, 2].

При диффузионном способе получения водорода металлическим фильтрам-мембранам приходится работать в агрессивных газовых средах [5–8], что обуславливает значительные дилатации решетки [4, 9]. Механические же свойства металлических фильтров и их водородопроницаемость являются структурочувствительными характеристиками [6, 10].

Стабильность показателей прочности, пластичности и водородопроницаемости фильтров при вариациях температурных режимов и давления необходима для безопасности производства, хранения и транспортировки водорода [1–8]. Отсутствие целостной методики, позволяющей прогнозировать возможные изменения в металлах и сплавах при их гидрировании либо термообра-

ботке, делает необходимым накопление экспериментальных результатов изучения структурного состояния мембран при различных воздействиях. Рентгеновские методы являются экспрессными и информативными, особенно при использовании синхротронного излучения (СИ) для изучения структуры [12–14].

Задача настоящей работы состояла в рентгенографических исследованиях влияния высокотемпературного воздействия на структурное состояние металлических диффузионных фильтров на основе палладия, а именно сплава Pd–Y.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РАСЧЕТОВ

Диффузионные фильтры-фольги толщиной 50 мкм состава Pd–7 мас. % Y изготовлены в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) методом электродугового сплавления из металлов высокой степени чистоты (~99.95%). Для обеспечения однородности по составу каждый слиток при изготовлении мембран переплавляли 2–3 раза. Далее следовал холодный прокат заготовок на четырехвалковом прокатном

стане с промежуточными вакуумными отжигами при температуре 900°C. Подробное описание методики изготовления мембран приведено в работе [5]. С целью выяснения влияния температурной обработки на структурное состояние мембран к одной из фольг состава Pd–7 мас. % Y применен дополнительный отжиг при 900°C в течение 1.5 ч. Для удобства изложения материала далее: фольга 1 – отжиг дополнительный не применен, фольга 2 – мембрана прошла дополнительный отжиг и медленное остывание в печи до комнатной температуры.

Рентгенографическое исследование структуры мембран выполнено на оборудовании станции “Белок” Курчатовского источника синхротронного излучения [12]. Исследования проводили при длине волны излучения 0.800025 Å. На образец направляли пучок СИ, монохроматизированный с помощью двухкристального кремниевого монохроматора до $\Delta E/E \sim 10^{-4}$, основное отражение от плоскостей типа {111}. При помощи изгиба второго кристалла-монохроматора пучок фокусировали до размера 400 × 400 мкм². В процессе измерения образцы вращали вокруг горизонтальной оси перпендикулярно пучку СИ для усреднения по ориентациям кристаллитов. Дифракционную картину регистрировали в геометрии Дебая–Шеррера. Использовали двухкоординатный детектор MarCCD165, помещенный на расстоянии 80 мм от исследуемых образцов и наклоненный к падающему пучку СИ под углом 29.5° с целью расширения углового диапазона регистрируемой дифракционной картины. Калибровка угловой шкалы, проведенная по измерению стандарта LaB₆, показала, что инструментальное уширение пренебрежимо мало и на физическое уширение линий не влияло. Время экспозиции составило 10 мин. По двумерным картинам дифракции с использованием программного обеспечения “Dionis” [15] были получены зависимости интенсивности дифрагированного пучка (I) от двойного угла дифракции (2θ).

С помощью программного пакета “Fityk” [16] проведен анализ формы и углового положения (θ_{hkl}) дифракционных максимумов, физического уширения (β_{hkl}) и интегральной интенсивности ($I_{\text{эксп } hkl}$) согласно методике, изложенной в [17].

Аппроксимация интерференционных отражений несколькими пиками трактовалась как гетерогенный фазовый состав областей когерентного рассеяния (ОКР) с индексами интерференции (hkl). В этом случае долю (δ_i) каждой фазы считывали как

$$\delta_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}; \quad (1)$$

где A_i – интегральная интенсивность дифракционного пика, соответствующего определенной фазе в образце, n – число аппроксимирующих дифракционных отражений пиков.

Средневзвешенное значение параметра решетки (a_0) находили при использовании функции ($\text{tg } \theta$) в качестве весовой:

$$a_0 = \frac{\sum (a_{HKL} \text{tg } \theta_{HKL})}{\sum \text{tg } \theta_{HKL}}. \quad (2)$$

Все экспериментально установленные интенсивности дифракционных максимумов нормировали на теоретически рассчитанную величину (2) для получения значений приведенной (нормированной) интенсивности

$$I_{HKL} = n^2 f^2 K(\theta_{HKL}) e^{-2M_{HKL}} P_{hkl}, \quad (3)$$

n – число элементарных ячеек в единице объема, f – атомный фактор, $e^{-2M_{HKL}}$ – температурный фактор, $K(\theta_{HKL})$ – поляризационный множитель, P_{hkl} – фактор повторяемости [17].

Концентрацию одиночных вакансий в фазах оценивали согласно [4]

$$n_{hkl} = \frac{3\Delta a_{hkl}}{a_{hkl} \times 0.22}; \quad (4)$$

Δa_{hkl} – изменение периода решетки за счет изменения количества вакансий, 0.22 – относительное изменение объема ячейки при образовании одной вакансии, a_{hkl} – параметры фаз, определяемые по угловым положениям интерференционных максимумов. Оценка содержания легирующего компонента выполнена согласно правилу Вегарда [18].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интенсивные структурные максимумы

На дифрактограммах, снятых с обеих мембран (рис. 1), в области углов $2\theta = (20^\circ - 54^\circ)$ видны интенсивные структурные отражения, сформированные матричной структурой, и пики низкой интенсивности, показанные на врезке в малоугловой области $2^\circ - 12^\circ$. Последние свидетельствуют о наличии в сплаве доменов с параметром решетки, существенно отличным от параметра матричной фазы.

Для обеих мембран интенсивным интерференционным максимумам характерна асимметрия профиля при возрастании угла дифракции, более выраженная для дальних порядков отражений, где разрешение рентгенограмм выше. Результаты аппроксимации, устанавливающие, что матричной структуре обеих фольг соответствует наличие трех фаз с частично когерентными границами, приведены на врезке в рис. 1 для дальних

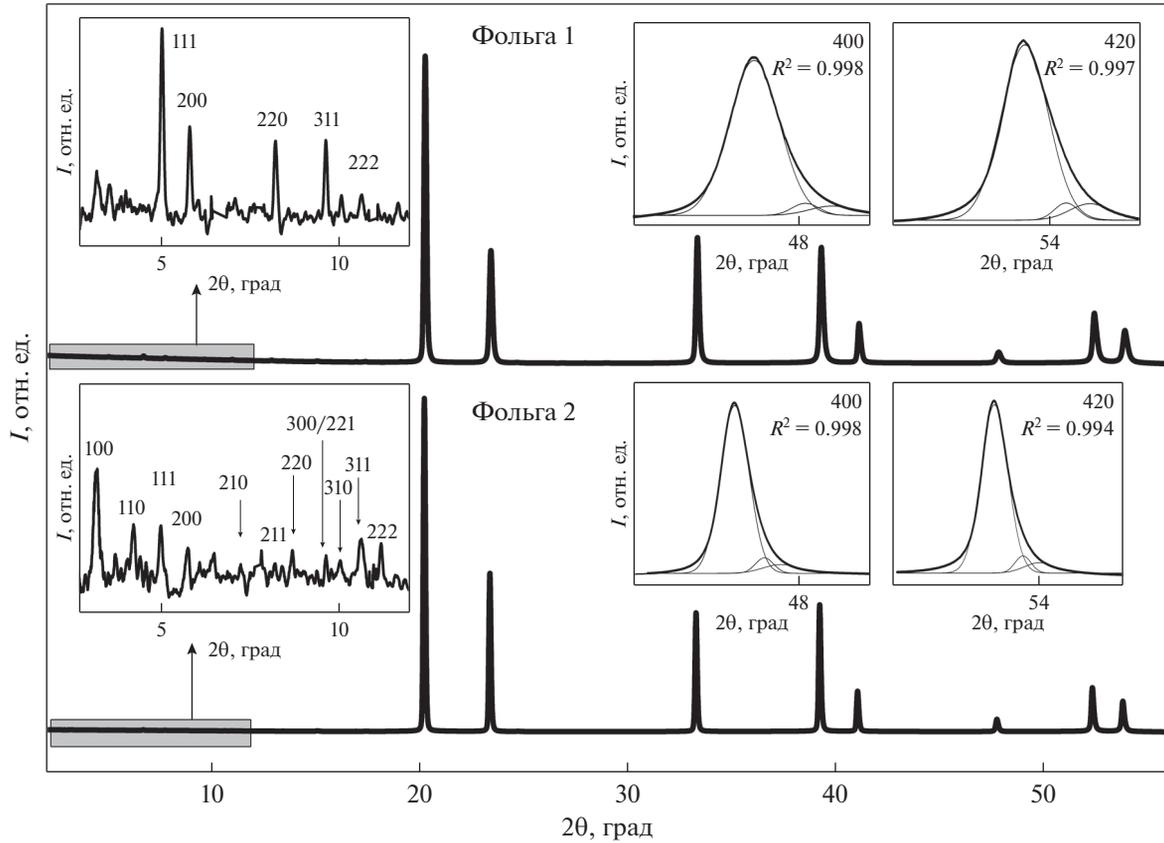


Рис. 1. Дифракционные спектры фольг.

порядков отражений от областей когерентного рассеяния (ОКР) с индексами Миллера 100 и 210, далее ОКР(100) и ОКР(210). Показано, что для структурных отражений характерны особенности: интенсивный максимум, соответствующий основной фазе, и два дополнительных к нему при возрастании угла дифракции, свидетельствующие о наличии фаз меньшей доли и отличном от свойственного для основной фазы содержании иттрия. На этих же дифрактограммах приведены факторы достоверности R^2 , являющиеся мерой согласованности модели и экспериментального массива рентгенографических данных.

Изменение параметров решетки (a_{hkl}) фаз, формирующих интенсивные структурные отражения

Таблица 1. Содержание иттрия в фазах фольг

	C_Y (ат. %), фольга 1	C_Y (ат. %), фольга 2
Основная фаза	8.49 ± 0.03	9.08 ± 0.17
Фаза 1	6.1 ± 0.1	7.8 ± 0.1
Фаза 2	4.8 ± 0.2	7.1 ± 0.8

обеих мембран, показано на рис. 2 в зависимости от индексов интерференции. Следует отметить меньшие изменения параметров (a_{hkl}) основной фазы фольг. Погрешность в определении этих параметров соизмерима с размерами символов.

Анализ угловых положений дифракционных интенсивных пиков показал: основная фаза фольги 1 имеет кубическую гранецентрированную (ГЦК) элементарную ячейку с параметром $3.9496 \pm 0.0002 \text{ \AA}$. Для фольги 2 основная фаза имеет ГЦК ячейку с параметром $3.9536 \pm 0.0007 \text{ \AA}$. Соответствующие фазам концентрации иттрия приведены в табл. 1.

Кристаллическим решеткам фаз, обедненным иттрием, соответствуют ГЦК-ячейки с параметрами $3.9328 \pm 0.0010 \text{ \AA}$; $3.9239 \pm 0.0015 \text{ \AA}$ для фольги 1 и $3.9447 \pm 0.0004 \text{ \AA}$; $3.9396 \pm 0.0015 \text{ \AA}$ для фольги 2. Обозначим эти фазы: фаза 1 и фаза 2. Фаза 1 – большее содержание иттрия в сравнении с фазой 2 (см. табл. 1).

Для обедненных иттрием фаз фольги 1 параметры элементарной ячейки по [111] немного превышают аналогичные параметры по [100] (рис. 2а), что может свидетельствовать о дефектных комплексах в структуре [11, 19] и большей концентрации вакансий в ОКР(100).

Для фольги 2 эта тенденция больших величин параметров решетки по [111] сохранилась и после отжига, но разность ($\Delta(a_{222} - a_{400})$) уменьшилась для фазы 1 от 0.0066 до 0.0024 Å и для фазы 2 от 0.011 до 0.0033 Å.

На рис. 2б показано изменение предельной, т.е. в предположении отсутствия влияния других факторов, концентрации вакансий, которая могла обеспечить такие изменения параметров решеток фаз. При активации отжигом диффузионных процессов в сплаве вакансии могли начать переходить из решетки матрицы в дефектные комплексы, перемещаться в границы зерен, что повысило период решетки [11, 19]. Атомы иттрия, в свою очередь, за счет увеличения их подвижности при переходе вакансий, переместились из обедненных в обогащенную иттрием фазу с большим параметром решетки. В [20] аналогичные процессы показаны для гидрированного сплава Pd–Sm. Следует отметить, что атомы иттрия и самария имеют близкие размеры – 178 и 181 пм, превосходящие размеры атомов палладия – 137 пм.

Видно (см. рис. 2), что отжиг более повлиял на фазы, обедненные иттрием, причем большие изменения параметра ячейки свойственны для фазы 2.

Фазам 1 и 2, обедненным иттрием в обеих мембранах, характерны небольшие доли содержания во всех ОКР(hkl) по сравнению с основной фазой (рис. 3). Следует обратить внимание на характерность большей доли образования дополнительных фаз для ОКР(111) и ОКР(331).

Отжиг привел к уменьшению проявления этой закономерности, но не устранил полностью. Ранее подобное преимущественное формирование фаз с концентрацией атомов легирования, отличной от основной по сплаву, отмечено было для ОКР(111) твердого раствора на основе палладия системы Pd–In–Ru [21].

В результате отжига не только содержание фазы 2 уменьшилось для всех ОКР(hkl), но и флуктуации изменения ее содержания сократились от 0.08 для фольги 1 до 0.04 для фольги 2 (см. рис. 3). Для основной фазы уменьшение флуктуаций содержания составило от 0.11 для фольги 1 до 0.04 для фольги 2 (см. рис. 3). Для фазы 1 изменения незначительные.

Далее следует привести сравнение изменений дифракционного размытия отражений (рис. 4а, 4б), произошедших в результате отжига.

Для мембраны, не проходившей отжиг, дифракционные отражения как для основной, так и для дополнительных фаз показали большее физическое уширение (β_{hkl}), чем для прошедшей отжиг. Изменения в размытии (β_{hkl}) дифракцион-

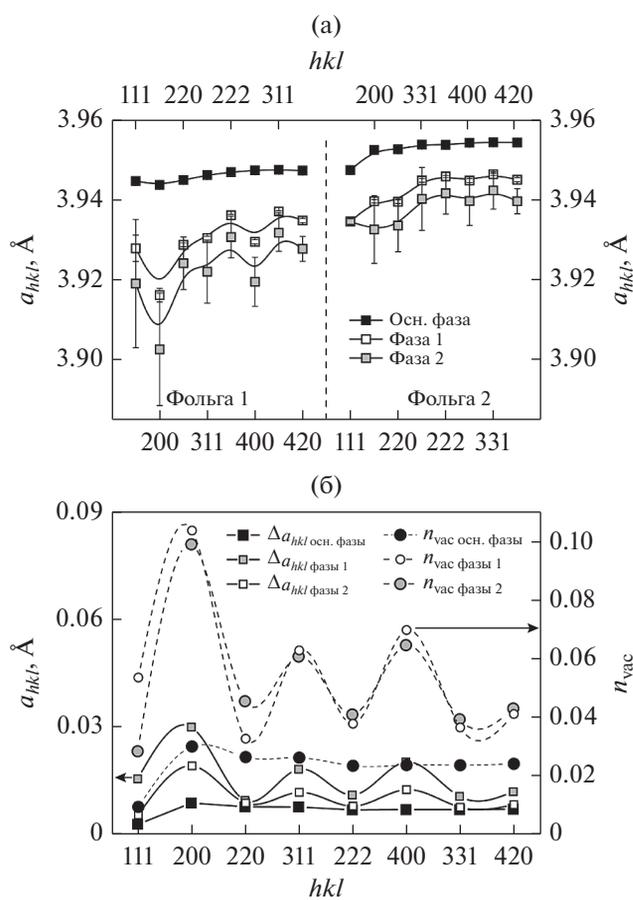


Рис. 2. Зависимость параметров решетки (a_{hkl}) фаз, составляющих матрицу исследуемого сплава Pd–7 мас. % Y, от индексов интерференции (а); изменение параметров фаз и концентрации вакансий в результате отжига (б).

ных отражений показано на рис. 4 в координатах $(\beta_{hkl})^2(\cos^2\theta_{hkl})$ от $\sin^2\theta_{hkl}$.

Видно, что дифракционные рефлексы с индексами Миллера $\{h00\}$ значительно более уширены по сравнению с рефлексами с индексами $\{hhh\}$. Подобное значительное расхождение физического уширения линий типа $\{h00\}$ и $\{hhh\}$ наблюдается, согласно [19], для хаотически распределенных в кристаллитах винтовых дислокациях.

Интервал изменения величин $(\beta_{hkl})^2(\cos^2\theta_{hkl})$ для основной фазы фольги 2 выделен на рисунке (рис. 4а) серым фоном. Уменьшение физического размытия дифракционных максимумов в результате отжига для основной фазы фольг составило от 1.3 для дальних порядков отражений ОКР(111) до 1.76 для дальних порядков отражений ОКР(100) и от 1.07 (1.23) ОКР(111) до 1.86 (1.88) ОКР(100) для обедненных иттрием фаз: фазы 1 (фазы 2), соответственно (рис. 4б).

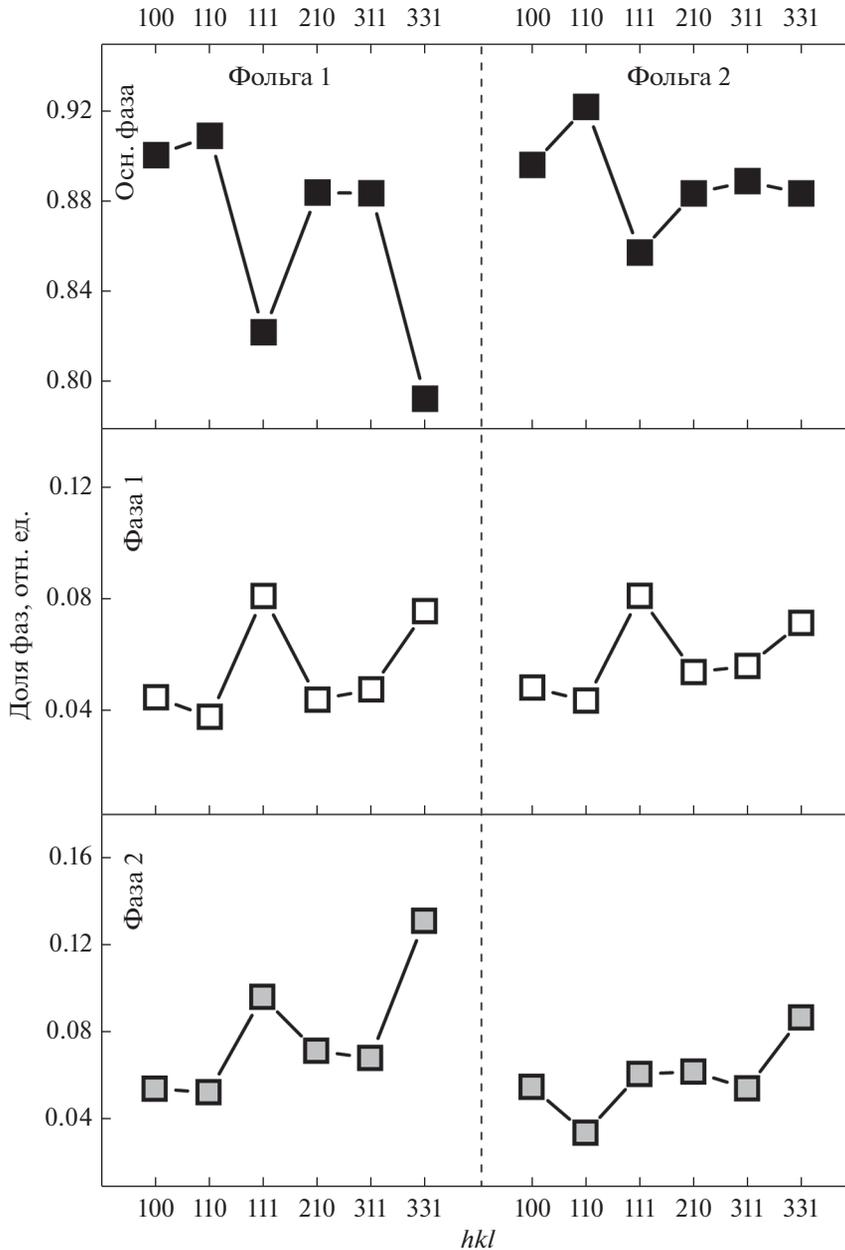


Рис. 3. Долевое содержание (доля) фаз, определяемое интенсивными интерференционными максимумами фольг.

Микронапряжения в ОКР(100) и ОКР(111) (рис. 4в) были определены методом Вильямсона—Холла [22]. При наличии двух порядков отражений этот метод позволяет разделять вклады в уширение дифракционных рефлексов от дисперсности структуры и микродеформаций в кристаллитах.

До отжига величина микродеформаций в ОКР(100) основной фазы фольги 1 в 5.4 раза больше, чем в ОКР(111). Для дополнительной фазы 1 фольги 1 характерно весьма малое различие величины микроискажений кристаллитов для

ОКР(100) и ОКР(111). А вот для фазы 2 наблюдаем выраженное влияние микродеформаций кристаллитов ОКР(100) на размытие дифракционных максимумов. Их величина превышает аналогичную для ОКР(111) в 4.2 раза.

После отжига для фольги 2 различие величин микродеформаций в ОКР(100) по сравнению с ОКР(111) уменьшилось в 2.2 раза для основной фазы и в 1.5 раза для наиболее обедненной иттрием фазы 2. Для фазы 1 отжиг привел к уменьшению микродеформации в ОКР(100) и ОКР(111), но при близких значениях изначальных величин

более изменена величина микродеформаций для ОКР(111).

Расчет эффективных размеров ОКР(100) и ОКР(111) показал их увеличение для основной фазы в 1.33 раза. Кристаллиты основной фазы и фазы 2 после отжига стали практически равноосными (рис. 4г) по этим двум кристаллографическим направлениям.

На рис. 4д показано изображение поверхности фольги 2, полученное на растровом электронном микроскопе (ускоряющее напряжение 10 кВ, масштаб на снимке). Видна дисперсность структуры. Наблюдаемый контраст представляет изображения ОКР(*hkl*). Их размер подтверждает результаты расчетов, приведенные на рис. 4г.

Отношения значений нормированных интенсивностей структурных максимумов ОКР(100) и ОКР(111), приведенные в табл. 2, свидетельствуют, что для фольг характерна небольшая степень текстуры по кристаллографическому направлению [111]. Отжиг не повлиял на этот показатель.

Отражения малой интенсивности в угловой области 2°–18°

Для обеих фольг профили малоинтенсивных пиков в угловой области 2°–18° наиболее точно аппроксимируются функцией Гаусса, как и интенсивные структурные максимумы.

Для фольги 1 угловые положения таких малоинтенсивных пиков определили гранцентрированную кубическую решетку с периодом $15.754 \pm 0.072 \text{ \AA}$, а для фольги 2 – структуру с примитивной кубической ячейкой с параметром $14.62 \pm 0.33 \text{ \AA}$ (см. рис. 1). Высокая погрешность в определении постоянной решетки объяснима низкой интенсивностью отражений в этой угловой области.

Таким образом, в системе Pd–Y до отжига (фольга 1) выявлено наличие доменов с почти четырехкратно увеличенным периодом решетки в сравнении с матричным. Отжиг привел к фазовым превращениям в структуре этих доменов, сохранив кубическую симметрию решетки. Согласно [19], упорядоченное размещение атомов соответствует меньшей внутренней энергии твердых растворов из разнородных атомов и при низких температурах является более равновесным. Возможно, именно состояние порядок–беспорядок обусловили наблюдаемые домены и фазовые преобразования в них. Переходы порядок–беспорядок часто сопровождаются кратным изменением одного или нескольких параметров ячейки при сохранении кубической симметрии [23].

Для системы Pd–Y определение подобных доменов и преобразования их структуры при высокотемпературном отжиге наблюдаются впервые.

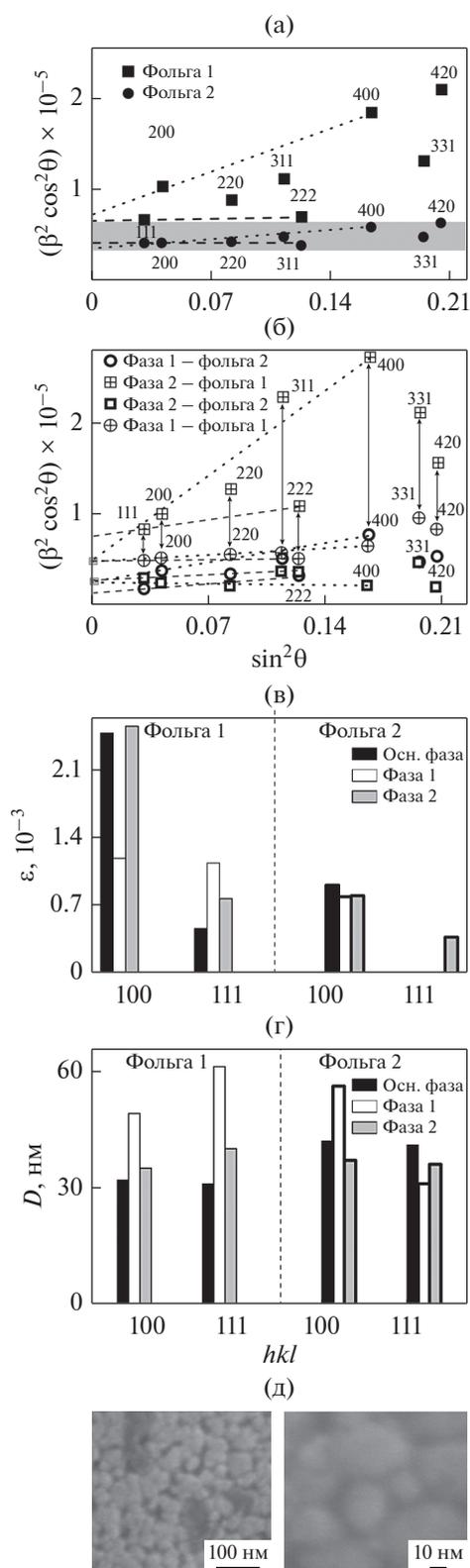


Рис. 4. Данные по изменению значений $(\beta_{hkl})^2(\cos^2\theta_{hkl})$ от $\sin^2\theta_{hkl}$ для основной фазы фольг (а); для дополнительных (б); значения микродеформаций в ОКР(100) и ОКР(111) (в); эффективные размеры ОКР(100) и ОКР(111) (г); микрофотографии поверхности фольги 2 (д).

Таблица 2. Нормированные интенсивности структурных максимумов ОКР(100) и ОКР(111) и их соотношение

HKL	Фольга 1		Фольга 2	
	$I_{\text{норм}}$	I_{hhh}/I_{h00}	$I_{\text{норм}}$	I_{hhh}/I_{h00}
1	2.8	1.4	2.6	1.4
200	2.0		1.8	
222	1.0	1.4	0.7	1.4
400	0.7		0.5	

Различия параметров решеток фаз матричной структуры и таких доменов могут значительно увеличивать деформационные напряжения в сплаве. Этот вопрос требует дальнейшего изучения, тем более в условиях воздействия водорода. В данной статье мы ограничиваемся констатацией факта выявления фазовых превращений при высокотемпературной обработке металла.

ВЫВОДЫ

Выявленные концентрационные неоднородности в неупорядоченном твердом растворе Pd–Y, фазовые превращения и преобразования подсистемы дефектов в процессах отжига мембран могут возникнуть в структуре при изготовлении диффузионных фильтров.

Значительное уменьшение размытия линий вследствие отжига, в большей степени определенное для отражений от ОКР(100), свидетельствует о существенных анизотропных изменениях подсистемы дефектов.

Определение доменов с увеличенным параметром решетки и преобразования их структурного состояния при высокотемпературном отжиге для системы Pd–Y получено впервые.

Авторы признательны научно-исследовательской группе ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова, предоставившей фольги для исследований.

Измерения рентгеновской дифракции проведены с использованием уникальной научной установки Курчатовский источник синхротронного излучения в НИЦ “Курчатовский институт” при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” по соглашению № 14.619.21.0007, проект RFMEFI61917X0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stiller C., Schmidt P., Michalski J.* Storage of Renewable Electricity through Hydrogen Production // World Renewable Energy Congress – 2011. Linköping University Electronic Press. 15. P. 4202–4208.
2. *Tereshchuk V.S.* Hydrogen Generator Based on Reduced Solid Fuel // Russian Engineering Research. 2011. V. 31. № 12. P. 1205–1212.
3. *Гусев А.В., Корнев Р.А., Суханов А.Ю.* Получение трихлорсилана плазмо-химическим гидрированием тетраоксида кремния // Неорг. материалы. 2006. Т. 42. № 9. С. 1123–1126.
4. *Алефельд Г., Фелькл И.* Водород в металлах. М.: Мир, 1981. Т. 1. 430 с.
5. *Бурханов Г.С., Горина Н.Б., Кольчугина Н.Б., Рошан Н.Р.* Сплавы палладия для водородной энергетики // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева. 2006. Т. 1. № 4. С. 36–40.
6. *Горбунов С.В., Канькин С.В., Пенкина Т.Н., Рошан Н.Р., Чистов Е.М., Бурханов Г.С.* Сплавы палладия со свинцом для очистки и выделения водорода из водородсодержащих газовых смесей // Металлы. 2017. № 1. С. 63–69.
7. *Бурханов Г.С., Кореновский Н.Л., Ключева Н.Е., Гусев А.В., Корнев Р.А.* Извлечение водорода из сбросовой смеси кремниевого производства с использованием металлических мембран из сплавов на основе палладия // Перспективные материалы. 2007. № 3. С. 62–67.
8. *Burkhanov G.S., Gorina N.B., Kolchugina N.B., Roshan N.R.* Palladium – Based Alloy Membranes for Separation of High Purity Hydrogen from Hydrogen-Containing Gas Mixtures // Platinum Metals Rev. 2011. V. 55. № 1. P. 3–12.
9. *Авдюхина В.М., Акимова О.В., Левин И.С., Ревкевич Г.П.* Особенности α - β превращения в системе Pd–In–Ru–H // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 1. С. 1–6.
10. *Диаграммы состояния металлических систем. Обзор исследований.* М.: Изд-во Наука, 1968. 323 с.
11. *Акимова О.В., Авдюхина В.М., Щетинин И.В.* Роль вакансий при релаксации фольги сплава Pd–5.3 ат. % In–0.5 ат. % Ru после десорбции водорода // ФММ. 2016. Т. 117. № 2. С. 1–5.
12. *Ковальчук М.В., Квардаков В.В., Корчуганов В.Н.* КИСИ вчера, сегодня, завтра // Природа. 2013. № 12. С. 25–36.
13. *Акимова О.В., Велигжанин А.А.* Рентгеноструктурные исследования систем Pd–In–Ru с использованием СИ / Тезисы Всероссийской конференции с международным участием “Химия твердого тела и функциональные материалы-2018”.
14. *Акимова О.В., Велигжанин А.А.* Структурная диагностика металлических твердых растворов – новые возможности при использовании синхротронного излучения // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 2. С. 29–33.

15. *Светогоров Р.Д.* Dionis – Diffraction Open Integration Software. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660965.
16. *Wojdyr M.* Fityk: a general-purpose peak fitting program // *J. Appl. Cryst.* 2010. V. 43. P. 1126–1128.
17. *Иверонова В.И., Ревкевич Г.П.* Теория рассеяния рентгеновских лучей. М.: Изд-во МГУ, 1978. 278 с.
18. *Вол А.Е., Каган И.К.* Строение и свойства двойных металлических систем. М.: Наука, 1976. Т. 3. 816 с.
19. *Кривоглаз М.А.* Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах. Киев: Наукова Думка. 1983. 407 с.
20. *Ревкевич Г.П., Кацнельсон А.А., Миткова М.К.* Явление восходящей диффузии в насыщаемых водородом сплавах палладий-самарий // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия.* 1997. № 2. С. 30–33.
21. *Акимова О.В., Авдюхина В.М., Левин И.С., Ревкевич Г.П.* Фазовые превращения в фольгах сплава палладий–индий–рутений под воздействием водорода // *Изв. РАН. Сер. физическая.* 2015. Т. 79. № 9. С. 1246–1250.
22. *Williamson G.K., Hall W.H.* X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram // *Acta Metallurgica.* 1953. V. 1. P. 22–31.
23. *Кривоглаз М.А., Смирнов А.А.* Теория упорядочивающихся сплавов. М.: Физматгиз, 1958. 388 с.