

СТРУКТУРА,
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 669.234:533.15

МЕМБРАННЫЙ СПЛАВ Pd–7.70 мас. % Lu
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДОРОДА

© 2021 г. Н. Б. Кольчугина^{а, *}, С. В. Горбунов^а, Н. Р. Рошан^а, Г. С. Бурханов^а, Т. П. Каминская^б,
Н. А. Дормидонтов^а, А. С. Бакулина^а, Д. А. Русинов^а

^аИМЕТ РАН, Ленинский просп., 49, Москва, 119334 Россия

^бМосковский государственный университет, Физический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: nkolchugina@imet.ac.ru

Поступила в редакцию 12.08.2020 г.

После доработки 08.09.2020 г.

Принята к публикации 22.09.2020 г.

Чистота водорода, альтернативного энергоносителя в источниках энергии систем распределенной энергетики, и, в частности, исходного сырья для топливных элементов, должна быть не ниже 99.9999 об. %. Получение водорода высокой степени чистоты возможно только путем его отделения в результате селективной диффузии через металлические мембраны из специальных мембранных сплавов на основе палладия, получаемых в виде тонких фольг. В работе сочетанием режимов деформации и отжига получена фольга сплава Pd–7.70 мас. % Lu толщиной 50 мкм, и исследована ее удельная водородопроницаемость при циклическом нагреве и охлаждении в атмосфере водорода в интервале температур 300–500°C. Показана высокая и стабильная водородопроницаемость мембраны Pd–7.70 мас. % Lu. Методом атомно-силовой микроскопии в режиме отображения фазового контраста показана эволюция структуры поверхности мембраны при ее работе в атмосфере водорода.

Ключевые слова: сплавы палладия, редкоземельные металлы, фольга, мембраны, водородопроницаемость, атомно-силовая микроскопия

DOI: 10.31857/S0015323021010071

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия водород рассматривается как альтернативный энергоноситель, который может обеспечить переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, что, в свою очередь связано с поиском и исследованием новых материалов-аккумуляторов водорода [1, 2] и разработкой технологий водородной энергетики, в том числе, для развития систем распределенной энергетики. Среди данных систем электрохимические генераторы на топливных элементах [3] имеют громадный потенциальный рынок: от источников питания для портативных компьютеров и средств связи до судовых двигателей и генерирующих станций. Чистота водорода, являющегося исходным сырьем для топливных элементов и пригодного для таких источников энергии систем распределенной энергетики, должна быть не ниже 99.9999 об. %.

Получение водорода такой степени чистоты возможно только путем его отделения в результате селективной диффузии через металлические мембраны из специальных мембранных сплавов на основе палладия, получаемых в виде тонких фольг [4]. Такие сплавы должны обладать целым

комплексом свойств, среди которых основными являются высокая удельная водородопроницаемость и достаточные пластичность и прочность при эксплуатации в диапазоне температур 300–700°C, поскольку надежность работы мембранных сплавов напрямую зависит от структурных изменений, развивающихся в мембране при ее эксплуатации.

Поиски оптимальных составов мембранных сплавов привели к систематическому исследованию структуры, водородопроницаемости и механических свойств сплавов палладия с редкоземельными металлами (РЗМ) [5, 6]. Известны результаты работ по исследованию сплавов Pd–Y, демонстрирующих максимальную водородопроницаемость [7–14].

Сплавы палладия с другими редкоземельными металлами представляют несомненный практический интерес в связи с их перспективой применения в качестве мембран для диффузионной очистки водорода [14]. Растворимость большинства редкоземельных металлов в палладии anomalно высокая, исходя из большой разницы атомных размеров (критерий Юм-Розери) и электроотрицательностей палладия и РЗМ [5]. Рас-

ширение решетки палладия, обеспечиваемое добавками РЗМ, намного больше, чем при использовании сопоставимой доли других элементов (например, серебра) в твердом растворе [15]. В связи с этим твердые растворы РЗМ в палладии демонстрируют значительное упрочнение и возможность создания прочных мембран в виде фольг толщиной 50 мкм.

При растворении РЗМ в палладии образуются твердые растворы замещения со структурой типа Cu. При формировании твердого раствора изменение параметра решетки палладия на единицу эффективной концентрации валентных электронов $\Delta a/\Delta(e/a)$ при добавлении лютетия составляет 1.8×10^{-2} нм, что меньше чем в случае твердых растворов иттрия в палладии (2.2×10^{-2} нм), демонстрирующих максимальную водородопроницаемость [6]. Различия в расширении решетки палладия $\Delta a/\Delta X_{\text{РЗМ}}$ при формировании твердых растворов иттрия и лютетия в палладии с равными атомными содержаниями этих металлов составляет 1×10^{-2} нм [6]. Таким образом, при формировании твердого раствора величина расширения решетки палладия при добавлении редкоземельных элементов и упрочнение палладия обусловлены величиной радиуса РЗМ и его содержанием.

Оцененный критический состав ($C_{\text{кр}}$) для исчезновения двухфазной области сосуществования гидридных фаз α и β примерно одинаков для всех твердых растворов — Pd ~ 8 ат. % РЗМ; сплавы палладия с содержанием РЗМ ~ 8 ат. % являются изоэлектронными (в том числе для состава Pd–23 ат. % Ag), для которых отношение числа электронов к числу атомов составляет $e/a = 0.24$ [6]. При этом изменение водородопроницаемости при легировании РЗМ неоднозначно и прямо не зависит от изменения параметров решетки палладия [6].

Согласно фазовой диаграмме Pd–Lu [16, 17] растворимость лютетия в палладии — ~18 ат. % при 1330°C и — менее 10 ат. % при комнатной температуре (температура прокатки при получении фольги). Твердый раствор лютетия в палладии находится в равновесии с упорядоченной фазой Pd₇Lu (содержание Lu ~ 12.5 ат. %). При содержании лютетия в палладии вблизи этого состава свойства фольги, как механические, так и водородопроницаемость будут определяться также присутствием упорядоченной фазы Pd₇Lu.

Цель настоящей работы — исследование водородопроницаемости мембранного сплава Pd–7.70 мас. % Lu в процессе циклической работы мембраны в виде фольги толщиной 50 мкм в интервале температур 300–500°C. Лютетий является наиболее коррозионноустойчивым металлом из всех РЗМ, кроме того, растворимость лютетия в палладии самая высокая среди других РЗМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходный слиток сплава Pd–7.70 мас. % Lu (заготовка под прокатку) был получен методом дуговой плавки (в электродуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медном водоохлаждаемом подду) в атмосфере высокоочищенного гелия с использованием палладия чистотой не менее 99.95 мас. % и дистиллированного лютетия [16] с контролируемым содержанием газообразующих примесей. Состав сплава соответствует твердому раствору лютетия в палладии.

Поскольку сплавы палладия с РЗМ склонны к внутреннему окислению и образованию сложных примесных включений, для получения качественных сплавов и, следовательно, качественных фольг, большое значение имеет как химическая чистота исходных компонентов, особенно РЗМ, так и возможность сохранения этой чистоты в конечном продукте, что зависит от способа его изготовления.

Технология получения фольги из слитка включает пластическую деформацию заготовки, включающую свободную ковку до толщины 4–5 мм, холодную прокатку на стане ДУО до толщины 1 мм и холодную прокатку с использованием стана Кварто до толщины 0.05 мм. После каждой операции пластической деформации проводился отжиг в вакууме при 900–950°C для снятия напряжений. В соответствии с данной технологией получена вакуумноплотная фольга сплава Pd–7.70 мас. % Lu толщиной 50 мкм.

Водородопроницаемость сплава Pd–7.70 мас. % Lu измеряли методом заполнения калиброванного объема с использованием экспериментального стенда, основным элементом которого является высокотемпературная рабочая ячейка. Диаметр рабочей поверхности мембраны — 20 мм, диапазон рабочих температур 20–500°C. Диапазон рабочих давлений над мембраной варьировали от 0.1 до 1.0 МПа.

По результатам измерений при каждой температуре рассчитывали удельную водородопроницаемость для толщины мембраны 1 мм.

$$Q = \frac{\Delta P V_k T_0 s}{T_1 p_0 F \tau (\sqrt{p_{\text{вх}}} - \sqrt{p_{\text{вых}}})}; \left[\frac{\text{нм}^3 \text{мм}}{\text{м}^2 \text{ч МПа}^{0.5}} \right], \quad (1)$$

где V_k (м³) — калиброванный объем, Δp (МПа) — перепад давления в калиброванном объеме при заполнении водородом, $T_0 = 273$ К, s (мм) — толщина мембраны, T_1 (К) — температура окружающей среды, $p_0 = 0.1$ МПа, F (м²) — площадь рабочей поверхности мембраны, τ (ч) — время заполнения калиброванного объема, $p_{\text{вх}}$ (МПа) — давление над мембраной и $p_{\text{вых}}$ (МПа) — давление под мембраной.

Исследование водородопроницаемости сплава проводили по следующему режиму: разогрев мембраны в вакууме ($p_{\text{ост}} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ МПа) до 300°C со

скоростью 10°C/мин → подача водорода → выход на стационарный режим (стабилизация $p_{вх}$ и $p_{вых}$ в течение 10–15 мин) → измерение водородопроницаемости в диапазоне температур от 300 до 500°C с шагом 50°C → измерение водородопроницаемости в диапазоне температур от 500 до 300°C с шагом 50°C → охлаждение мембраны с 300°C до комнатной температуры в вакууме. Измерение повторяли не менее пяти раз при каждой температуре. После окончания 8-часового цикла работ (смены), ячейку с мембраной вакуумировали до $p_{ост} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ МПа, охлаждали от 300°C до комнатной температуры вместе с печью. Визуально в процессе работы мембраны в водороде наблюдается очищение (осветление) поверхности.

Исследование поверхности мембран после водородной обработки было выполнено методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа SMENA-A, платформа “Solver” компании НТ–МДТ (г. Зеленоград, Россия) в полуконтактном режиме при комнатной температуре. Изображения поверхности фольги были получены в режимах амплитудного и фазового контраста. Изображение в режиме отображения фазового контраста дает дополнительную информацию о свойствах образца, например, распределение областей с разной жесткостью по поверхности материалов.

Регистрация и отображение фазового сдвига в процессе сканирования при АСМ широко используется в исследованиях наноструктурированных и неоднородных материалов, поскольку АСМ-изображения с поверхности исследуемых образцов, полученные этим методом, позволяют воспроизводить трехмерную структуру поверхности с более высоким разрешением. 3D-профили сечения позволяют оценить особенности поверхности мембраны. Полученные АСМ изображения поверхностей обрабатывали программными средствами визуализации и анализа Nova_1443. Осью Z в трехмерном изображении фазового контраста является угол сдвига фазы [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование водородопроницаемости мембран из сплава Pd–7.70 мас. % Lu

Результаты измерения удельной водородопроницаемости мембран из сплава Pd–7.70 мас. % Lu в интервале температур 300–500°C приведены на рис. 1. Показаны вариации удельной водородопроницаемости при повышении температуры для двух мембран. Водородопроницаемость мембраны 1 исследовали в течение первого цикла (1–8 ч); водородопроницаемость мембраны 2 исследовали в течение пяти циклов (1–40 ч). На рис. 1 приведены вариации водородопроницаемости в пер-

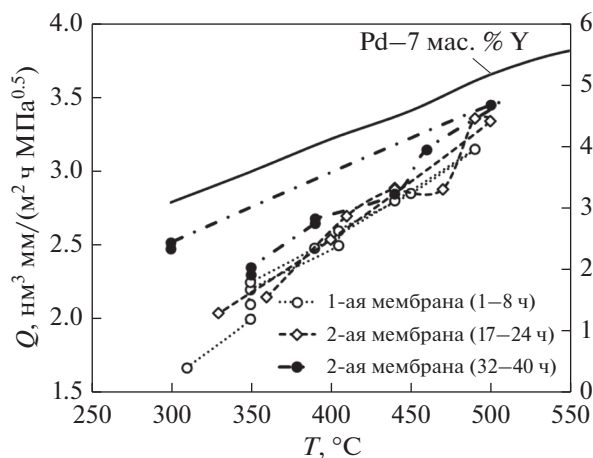


Рис. 1. Температурные зависимости удельной водородопроницаемости мембран из сплава Pd–7.70 мас. % Lu измеренные при циклической работе в водороде; для сравнения приведены данные по удельной водородопроницаемости мембраны из сплава Pd–7.00 мас. % Y (правая шкала).

вом цикле (1–8 ч) (мембрана 1) и третьем (17–24 ч работы) и пятом (32–40 ч работы) циклах (мембрана 2). Для сравнения приведена температурная зависимость удельной водородопроницаемости для мембраны состава Pd–7.00 мас. % Y, которая демонстрирует максимальную водородопроницаемость [6]. В процессе первого цикла работы (1–8 ч, мембрана 1) наблюдается линейная зависимость удельной водородопроницаемости при повышении температуры до 500°C. При этом водородопроницаемость увеличивается с 1.6 до 3.2 нм³ мм / (м² ч МПа⁰.⁵) в интервале температур 300–500°C соответственно. В процессе пятого цикла (мембрана 2) удельная водородопроницаемость при 500°C приближается к 3.5 нм³ мм / (м² ч МПа⁰.⁵). В ходе циклической работы мембраны в водороде при нагреве и последующем охлаждении наблюдается постепенное повышение удельной водородопроницаемости, особенно заметное при высоких температурах (при приближении к 500°C). Начиная с третьего цикла (17–24 ч), в области температуры 450°C наблюдается снижение удельной водородопроницаемости, затем регулярно повторяющееся в каждом цикле с некоторым сдвигом по температуре, до 430°C при работе во время нагрева в ходе 5-ого цикла (32–40 ч). Вариации водородопроницаемости в данной области температур связаны с наличием упорядоченной фазы Pd₇Lu, которая исчезает (происходит разупорядочение) при нагреве [17]. Известно [14], что появление упорядоченной фазы способствует повышению скорости диффузии водорода в сплаве, и, следовательно, ее исчезновение может приводить к снижению водородопроницаемости, что и наблюдается в данном эксперименте. При этом

наблюдаемое повышение водородопроницаемости с увеличением времени работы мембраны в водороде при нагреве объясняется увеличением содержания упорядоченной фазы в процессе отжига (работы при повышенных температурах).

Согласно данным, приведенным на рис. 1, удельная водородопроницаемость мембраны из сплава Pd–7.00 мас. % Y (Pd–8.26 ат. % Y) при температуре 500°C на 25% выше, чем водородопроницаемость исследуемой мембраны из сплава Pd–7.70 мас. % Lu (Pd–4.83 ат. % Lu). При этом следует отметить, что содержание лутеция (4.83 ат. %) существенно ниже содержания иттрия (8.26 ат. %). Тем не менее, сплав с лутецием демонстрирует высокую и стабильную водородопроницаемость, что может свидетельствовать в пользу перспективности системы Pd–Lu для применений в мембранной технологии получения и очистки водорода. Более высокая водородопроницаемость сплава Pd–Y согласуется с данными по изменению параметров решетки твердого раствора Pd при легировании его иттрием и лутецием [6].

Как было отмечено выше, величина расширения решетки палладия на единичную эффективную концентрацию валентных электронов при добавлении легирующего элемента $\Delta a_{т.р.}/\Delta(e/a)$ выше для иттрия, и существует линейная корреляция между этим параметром и радиусом атома элемента [6]. Параметр решетки наводороженного сплава палладия критического состава (состава, соответствующего исчезновению двухфазной области существования α - и β -гидридных фаз) зависит от величины расширения решетки исходного сплава без водорода. Чем больше расширение решетки сплава палладия без водорода, тем больше параметр решетки наводороженного сплава при исчезновении двухфазной области. Большее расширение решетки более благоприятно для диффузии водорода. Поскольку сплав Pd–7.70 мас. % Lu (4.83 ат. % Lu) по содержанию лутеция отличается от составов (8 ат. % РЗМ), соответствующих исчезновению двухфазной области [17], были выполнены исследования поверхности мембран после их работы в водороде.

Исследование поверхности мембран методом атомно-силовой микроскопии

Методом атомно-силовой микроскопии была исследована поверхность мембран из сплава Pd–7.70 мас. % Lu со стороны входа и выхода водорода после измерения водородопроницаемости в течение 8 (1 цикл, мембрана 1) и 40 ч (5 циклов, мембрана 2). В процессе сканирования одновременно регистрировалась топография поверхности и фазовый контраст, который, как известно, в первую очередь обусловлен микронеоднородностью упругих свойств исследуемых поверхностей. В большинстве случаев при исследовании по-

верхности наблюдается корреляция между изображениями топографии поверхности (изображение в режиме амплитудного контраста) и фазового контраста (когда неоднородность поверхности вызывает определенный сдвиг фазы осциллирующего зонда). Наиболее мелкие элементы и особенности структуры не имеют топографического проявления в случае амплитудного контраста и выявляются только на изображении фазового контраста, что в ряде случаев позволяет сделать предположение о природе микромеханической неоднородности поверхностей.

На рис. 2а и 2б представлены 3D-изображения (полученные в режиме фазового контраста) поверхности мембраны после 1 цикла работы в водороде со стороны входа водорода в мембрану и его выхода соответственно. На рис. 2в и 2г представлены 3D-изображения (полученные в режиме фазового контраста) поверхности мембраны после 5-ого цикла работы в водороде со стороны входа водорода в мембрану и его выхода соответственно.

Сравнение представленных изображений, а также изображений, полученных в режиме амплитудного контраста (в работе не приведены), позволяет выделить ряд отличий в морфологии поверхностей мембран и заметить очевидную эволюцию структуры поверхностей в процессе прохождения водорода через мембрану. Следует отметить, что структура мембраны со стороны входа водорода, как после работы в течение 8 ч, так и после 40 ч. работы более рыхлая по сравнению со структурой поверхности мембраны со стороны выхода водорода. При этом более рыхлая структура мембраны на выходе водорода наблюдается после ее работы в течение 40 ч.

Поскольку фазовый сдвиг, регистрируемый в режиме фазового контраста, зависит от характеристик материала образца, распределение фазового сдвига по поверхности будет отражать различие характеристик материала, в первую очередь микромеханических, по исследуемой поверхности. На рис. 2в наблюдается явно выраженная микронеоднородность поверхности мембраны на входе водорода после ее работы в течение 40 ч. Данное наблюдение позволяет предположить локальные вариации жесткости поверхности, обусловленные вариациями химического состава сплава по поверхности из-за перераспределения компонентов сплава при его взаимодействии с водородом. Жесткость материала характеризуется модулем упругости, связанным с вторичными, производными механическими характеристиками, например, твердостью, которая показывает сильную зависимость от состава для сплавов палладий–РЗМ [19]. Таким образом, различия в содержании лутеция в локальных областях кос-

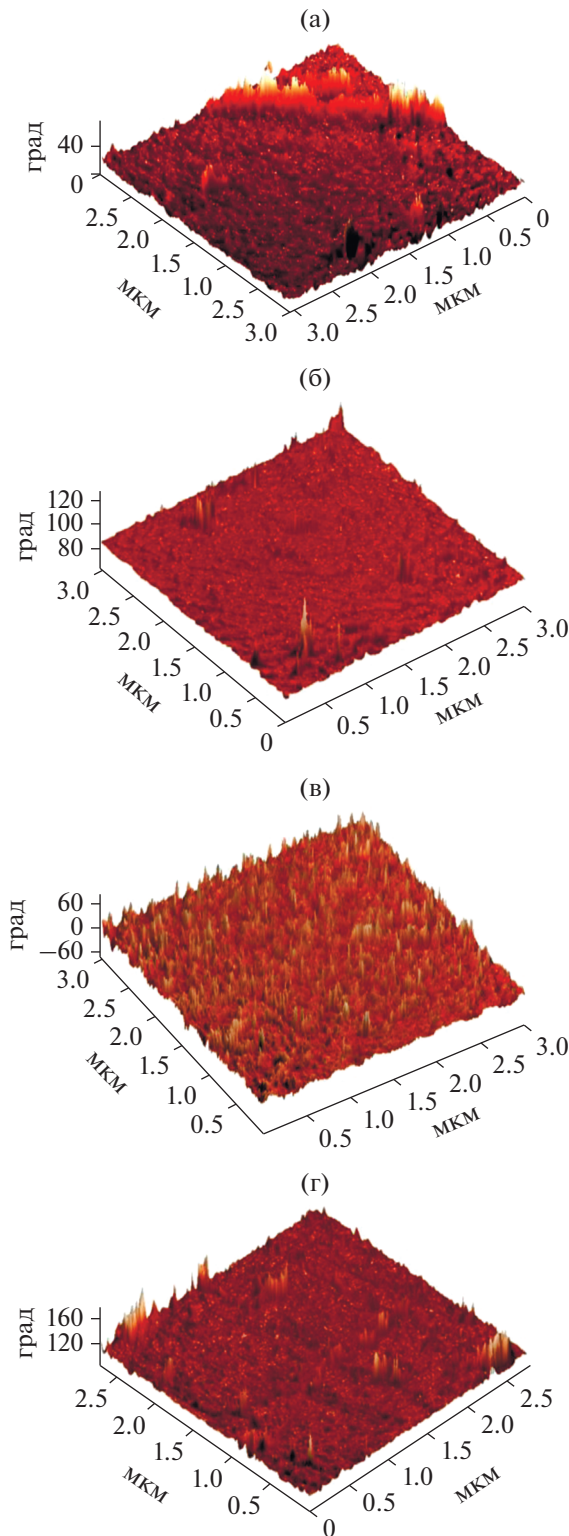


Рис. 2. 3D АСМ-изображения (режим отображения фазового контраста) поверхности мембран (а, б) 1 и (в, г) 2 из сплава Pd–7.70 мас. % Lu после работы в водороде в течение 8 (одного цикла) и 40 ч (пяти циклов) соответственно; (а, в) изображения со стороны входа водорода в мембрану и (б, г) изображения со стороны выхода водорода из мембраны.

венно идентифицируются на АСМ изображении в режиме фазового контраста.

При сравнении структуры поверхностей одной и той же мембраны со стороны входа и выхода водорода большая микронеоднородность наблюдается со стороны входа водорода, а при сравнении поверхностей разных мембран на выходе водорода большая неоднородность (но менее выраженная, чем в случае стороны входа водорода в мембрану) поверхности имеет место для мембраны после более продолжительной работы в водороде (рис. 2г).

Образование двух фаз, отличающихся параметром решетки, в сплаве Pd–РЗМ при его взаимодействии с водородом наблюдалось в работе [20]. Методом рентгеновского анализа гидрированного сплава Pd₉₄Y₆ после длительной релаксации в процессе обратимого легирования водородом показано формирование субмикроскопических неоднородностей. При этом для поверхности вторично гидрированного после релаксации сплава Pd₉₄Y₆ методами сканирующей электронной микроскопии наблюдалась структура двух типов [20]. Эти данные подтверждают возможность образования микроскопических неоднородностей по составу и в сплаве Pd–7.70 мас. % Lu при его продолжительной работе в водороде при температурах 300–500°С. Такие неоднородности наблюдали в настоящей работе методом АСМ в режиме отображения фазового контраста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сочетанием режимов деформации и отжига, получена фольга сплава Pd–7.70 мас.% Lu толщиной 50 мкм, и исследована его удельная водородопроницаемость при циклическом нагреве и охлаждении мембраны из данного сплава в атмосфере водорода в интервале температур 300–500°С в условиях диффузии водорода через мембрану.

Показано, что сплав состава Pd–7.70 мас. % Lu демонстрирует высокую и стабильную удельную водородопроницаемость при 500°С, которая достигает ~3.5 нм³ мм / (м² ч МПа^{0.5}) в процессе 5-го цикла работы мембраны. Наблюдаемые вариации удельной водородопроницаемости в интервале температур 400–470°С связаны с упорядочением твердого раствора лютетия в палладии с образованием соединения PdLu₇.

Исследования морфологии поверхностей мембран методом атомно-силовой микроскопии в режиме отображения фазового контраста и полученные при этом 3D-пространственные изображения позволили выявить микронеоднородности структуры, которые связываются с наличием областей, обедненных и обогащенных лутецием, образующихся в результате обратимого насыщения сплава водородом. Несмотря на структурные изменения,

происходящие в мембране в процессе диффузии водорода, показана высокая удельная водородопроницаемость сплава состава Pd–7.70 мас. % Lu, что свидетельствует в пользу перспективности системы Pd–Lu для применений в мембранной технологии выделения водорода из смесей и его очистки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 05.604.21.0244, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60419X0244.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солонинин А.В., Скрипов А.В., Бабанова О.А., Медведев Е.Ю., Алексашин Б.А., Уймин М.А., Гавико В.С. Влияние механического измельчения на подвижность водорода в стабилизированной водородом системе ZrTi₂–H: данные ЯМР // ФММ. 2010. Т. 110. С. 255–263.
2. Солонинин А.В., Скрипов А.В., Буздуков А.Л., Алексашин Б.А., Медведев Е.Ю. Водород в интерметаллическом соединении Ti₃Al: исследование методом ЯМР // ФММ. 2017. Т. 118. № 2. С. 193–199.
3. Edwards P.P., Kuznetsov V.L., David W.I.F., Brandon N.P. Hydrogen and fuel cells: Towards a sustainable energy future // Energy Policy. 2008. V. 36. № 12. P. 4356–4362.
4. Burkhanov G.S., Gorina N.B., Kolchugina N.B., Roshan N.R., Slovetsky D.I., Chistov E.M. 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.
5. Chen F.L., Furukawa M., Sakamoto Y. X-ray investigations of the α - β miscibility gaps in hydrogenated palladium-rare earth alloys // J. Less-Com. Met. 1989. V. 155. P. 173.
6. Sakamoto Y., Chen F.L., Furukawa M., Mine K. X-ray studies of the absorption of hydrogen by palladium-rich Pd–(Tb, Tm, Lu) alloys // J. Less-Com. Met. 1990. V. 159. P. 191–198.
7. Sakamoto Y., Kajihara K., Fukusaki Y., Flanagan T.B. Hydrogen solubility in palladium-yttrium alloys // Z. Phys. Chem. N. F. 1988. V. 159. P. 61.
8. Hughes D.T., Harris I.R. A comparative study of hydrogen permeabilities and solubilities in some palladium solid solution alloys // J. Less-Common Met. 1978. V. 61. № 2. P. 9–21.
9. Hughes D.T., Evans J., Harris I.R. The influence of order on hydrogen diffusion in the solid solution alloys Pd–5.75 at. % Ce and Pd–8 at. % Y // J. Less-Common Met. 1980. V. 74. P. 255–262.
10. Knapp A.G. Palladium alloys for hydrogen diffusion membranes: A review of high permeability materials // Platinum Metals Rev. 1977. V. 21. № 2. P. 44–50.
11. Бурханов Г.С., Горина Н.Б., Кольчугина Н.Б., Кореньковский Н.Л., Рошан Н.Р., Словецкий Д.И., Чистов Е.М. Сплавы палладия с редкоземельными металлами – перспективные материалы для водородной энергетики // Тяжелое машиностроение. 2007. № 11. С. 17–20.
12. Акимова О.В., Велигжанин А.А., Светогоров Р.Д., Горбунов С.В., Рошан Н.Р., Бурханов Г.С. Кинетика поглощения водорода из газовой фазы диффузионными фильтрами-мембранами системы Pd–Y // ФММ. 2020. Т. 121. № 2. С. 172–178.
13. Акимова О.В., Велигжанин А.А. Влияние отжига на структурное состояние металлических диффузионных фильтров-мембран на основе палладия // ФММ. 2019. Т. 120. № 10. С. 1050–1057.
14. Акимова О.В., Велигжанин А.А. Рентгенографические исследования металлических фольг-фильтров на основе палладия с использованием синхротронного излучения // ФММ. 2018. Т. 119. № 9. С. 888–892.
15. Ning Y. Alloying and strengthening effects of rare earths in palladium // Platinum Metals Rev. 2002. V. 46. № 3. P. 108–115.
16. Бурханов Г.С., Илюшин А.С., Кольчугина Н.Б. Фазовая диаграмма системы Lu–Pd в области 0–25 ат. % Lu // Металлы. 1999. № 6. С. 111–114.
17. Okamoto H. Lu–Pd (Lutetium–Palladium) // J. Phase Equil. Diffusion. 2009. V. 30. № 1. P. 121–122.
18. Horcas I., Fernández R., Gómez-Rodríguez J.M., Colchero J., Gómez-Herrero J., Baro A.M. WSXM: A software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology // Review of Scientific Instruments. 2007. V. 78. № 1. P. 013705.
19. McNicholl R.-A., Lewis F.A. The hydride phase miscibility gap in palladium-rare earth alloy. X-ray and equilibrium hydrogen pressure studies // Platinum Metals Rev. 1990. V. 34. № 2. P. 81–84.
20. Акимова О.В., Велигжанин А.А., Светогоров Р.Д., Горбунов С.В., Рошан Н.Р., Бурханов Г.С. Деформационные искажения кристаллической решетки гидрированного сплава на основе палладия // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 6. С. 21–27.