

УДК 538.9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛОТНЫХ МЕМБРАННЫХ ФИЛЬТРОВ СОСТАВОВ $\text{Pd}_{95}\text{Pb}_5$ И $\text{Pd}_{93.5}\text{In}_{6.0}\text{Ru}_{0.5}$

© 2024 г. О. В. Акимова^{a,*}, Т. П. Каминская^{a,**}, С. В. Горбунов^{b,***}

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^bИнститут металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН,
Москва, 119334 Россия

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

**e-mail: ktp53@mail.ru

***e-mail: merciles@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2024 г.

После доработки 30.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

Методами атомно-силовой и растровой электронной микроскопии в настоящей работе изучены особенности морфологии поверхности плотных мембранных фильтров на основе палладия с элементным составом $\text{Pd}_{95}\text{Pb}_5$ и $\text{Pd}_{93.5}\text{In}_{6.0}\text{Ru}_{0.5}$ (числовые коэффициенты здесь и далее определяют состав в мас. %). Толщина плотных мембранных фильтров составляла 50 и 70 мкм соответственно. Изготовлены образцы из металлов высокой степени чистоты методами электродугового сплавления в защитной атмосфере и холодного проката с несколькими этапами промежуточного вакуумного отжига. В морфологии поверхности фильтров отмечены различия, обусловленные элементным составом сплавов. Установлены проявления кавитации в виде микроворонки при легировании палладия свинцом и отсутствие оных для сплава палладия с индием и рутением. Показаны различия шероховатости поверхности образцов. В режиме контраста латеральных сил методом атомно-силовой микроскопии установлено наличие участков поверхности различной твердости. Полученные результаты важны не только при проектировании элементного состава мембранных фильтров с целью оптимизации их эксплуатационных свойств при использовании в современных наукоемких технологических процессах, но и в индустрии контактов и микросхем с целью увеличения их износостойчивости.

Ключевые слова: плотные мембранные фильтры, сплавы на основе палладия, атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия, морфология поверхности.

DOI: 10.31857/S1028096024080111, **EDN:** ELCODL

ВВЕДЕНИЕ

Легирование палладия рядом химических элементов в первую очередь связано с задачей улучшения сорбционных и прочностных характеристик плотных мембранных диффузионных фильтров, задействованных в процессах сепарации водорода высокой степени чистоты [1–4]. Особого внимания в поиске способов повышения надежности работы мембран требует их поверхность, на которой при проникновении водорода в металл происходят сложные процессы диссоциации молекул водорода, его избирательной адсорбции, ионизации, диффузии, а при десорб-

ции к перечисленным воздействиям добавляется рекомбинация химических связей молекул водорода, формирующихся на выходе.

Работы, проводимые в области исследования свойств поверхности мембранных фильтров, представляют интерес и актуальны для современной науки и наукоемких технологий, нуждающихся в новых функциональных материалах с особыми свойствами [5–10]. Ранее нами методами растровой электронной, оптической и атомно-силовой микроскопии были исследованы и охарактеризованы некоторые особенности морфологии поверхности мембранных фильтров,

прошедших направленное гидрирование [11–13]. Настоящая работа является продолжением исследований в этой области, так как при внедрении в палладий различных легирующих элементов формирование различий в подсистемах дефектов вносит коррективы в свойства поверхности мембранных фильтров [5, 11–13].

Методы атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) являются мощными современными инструментами получения информации о морфологии поверхности функциональных материалов [4–9]. Оба метода обеспечивают визуализацию поверхности исследуемого объекта, что помогает углубленному пониманию кристаллической организации и адгезионных свойств поверхности металлических систем. Метод АСМ позволяет получить информацию о локальном окружении атомов в области размером в несколько десятков нанометров. В настоящей работе наряду с топографическим изображением проведено картирование фазы колебаний механического нанощупа (кантилевера). Получено изображение фазового сдвига (изображение в режиме контраста латеральных сил), которое отражает картину изменения механических свойств поверхности [8]. Для мембранных сплавов на основе палладия этот аспект особенно важен в вопросах учета и предотвращения деградации поверхности фильтров в рабочих процессах сепарации водорода высокой степени чистоты. Сведения по этому вопросу в литературе практически отсутствуют. Причина, вероятно, в сравнительно молодом методе наноразмерного разрешения особенностей поверхности материалов методом АСМ и резкого развития в последнее десятилетие разрешающей способности метода растровой микроскопии [14, 15].

Выявление особенностей поверхности плотных листовых мембран при легировании палладия свинцом, индием и рутением сформировало задачу настоящей работы. Были выбраны сплавы $\text{Pd}_{95}\text{Pb}_5$ и $\text{Pd}_{93.5}\text{In}_{6.0}\text{Ru}_{0.5}$, так как мембранные фильтры указанных составов показали стабильную работу при получении водорода высокой степени чистоты [1–3, 10, 16]. Кроме того, указанные концентрации легирующих элементов в сплавах, как и размеры атомов легирующих элементов — 1.66 Å (индий) и 1.75 Å (свинец) — близкие, что обеспечивает схожее деформационное воздействие на кристаллическую решетку палладия. Поставленная задача включает анализ шероховатости поверхности мембранных фильтров в зависимости от их элементного состава, что актуально для успешного решения задач водородной энергетики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы изготовлены в Институте металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова (ИМЕТ РАН). Тройной сплав с элементным составом $\text{Pd}_{93.5}\text{In}_{6.0}\text{Ru}_{0.5}$ имеет оптимальную комбинацию прочности, пластичности, водородопроницаемости и сопротивления коррозии [1].

Легирование палладия свинцом помимо увеличения водородопроницаемости мембранных фильтров позволило понизить температуру гидридного перехода α – β (где α — разбавленный раствор водорода в сплавах палладия, β — гидрид; содержание водорода в сплавах допустимо до 0.8 долей по отношению к атомам металлов [10]). Понижение температуры взаимнообратимого перехода α – β — значимый фактор снижения дилатации кристаллической решетки фильтров при взаимодействии металлов с водородом. Однако легирование свинцом палладия сформировало высокодисперсную структуру сплава и уменьшило пластичность листовых мембран в сравнении с фильтрами из нелегированного палладия [10].

Исследования методом АСМ проведены на сканирующем зондовом микроскопе Smena-A (платформа Solver производства ЗАО “НТ-МДТ”, Россия) с применением стандартных кремниевых кантилеверов HA_NC ETALON длиной 80–110 мкм с резонансными частотами 130–250 кГц и радиусом закругления острия менее 10 нм. Информация о топографических особенностях поверхности образцов получена в полуконтактном режиме с целью лучшего травмирования как поверхности, так и кантилевера. Обработка АСМ-изображений поверхности выполнена программными средствами визуализации и анализа. При оценке шероховатости поверхности мембран усредняли результаты измерений при 10 случайных положениях кантилевера, определяя абсолютное значение среднего арифметического параметра отклонения профиля от базовой длины. Суммарная площадь сканирования поверхности каждого из образцов составила не менее 17400 мкм².

Исследования методом РЭМ проведены с помощью растрового электронного микроскопа Supra 40-30-87. Ускоряющее напряжение для электронов составило 10 кВ. Изображения поверхности получены в режимах детектирования как вторичных, так и отраженных электронов. Информацию об особенностях поверхности с разрешением от 100 мкм до 200 нм анализировали с участков площадью от 1.5 мм².

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мембрана Pd₉₅Pb₅

На рис. 1 приведены АСМ-изображения поверхности мембранного фильтра элементного состава Pd₉₅Pb₅. Как видно, на поверхности мембраны легированного свинцом палладия присутствует тройной стык зерен (рис. 1а). Видны микрополости вдоль границ зерен (обозначены светлыми стрелками) от 0.5 до 2 мкм в диаметре и кавитационные воронки в теле зерен (темные стрелки).

Топографическое изображение образца (рис. 1а) выявило наличие относительно крупных, от 2.5 до 7 мкм в диаметре (рис. 1б), холмообразных выступов в окружении воронок кавитации диаметром от 1 до 3 мкм. На трехмерном изображении поверхности мембраны (рис. 1в) видно, что крупные деформационные выступы сформированы преимущественно по границам зерен.

Сечение одного из таких участков поверхности (с выступом) плоскостью (на рис. 1а плоскость сечения отмечена горизонтальной белой линией) показало, что выступы возвышаются над плоско-равнинной областью мембраны на 400 нм и окружены кавитационными воронками, максимально уходящими в матрицу сплава на 100 нм (рис. 1б).

Изображение в режиме контраста латеральных сил (рис. 1г) указывает на участки периодического изменения твердости поверхности, также и выступы существенно различаются по контрасту с матричной областью, что свидетельствует о наличии участков поверхности повышенной твердости. На рис. 1а и 1г рамкой выделен участок плоской области образца, о чем свидетельствует отсутствие существенного изменения его окраса по шкале соответствия цвета высоте рельефа (рис. 1а). На рис. 1г этот участок показан в увеличении в выноске. Как видно из увеличенного изображения поверхности, на участке наблюдаем укладку ламелей в среднем с периодом в 2 мкм. Контраст границ ламелей выше, чем внутренней их области, что можно объяснить периодически вариациями твердости материала на поверхности либо сил адгезии. Такое объяснение полагаем при выявлении ламельной укладки обоснованным формированием границ и их деформациями.

В области отсутствия на поверхности мембраны существенного количества микрополостей кавитации и холмообразных выступов сечение плоскостью (вертикальная белая линия на рис. 1а) показало (рис. 1б), что шероховатость поверхности в среднем не превышает 170 нм на площади в 900 мкм² и присутствуют области плотной ла-

мельной укладки с периодом от 2 до 3 мкм. Эту особенность сплавов системы палладий–свинец, а именно формирование кристаллической структуры ламелей в нанобластях и их плотную укладку, мы отмечали ранее для других мембран по результатам оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии поверхности [12, 16].

Представленные на рис. 2 изображения поверхности получены в настоящей работе в режиме детектирования вторичных электронов.

РЭМ-изображение на рис. 2а показывает бимодальное распределение размеров и формы зерен сплава: размеры зерна 1 превышают размеры зерен 2 и 3 практически в 3 раза, а зерна 4 — в 9 раз. На вставке в левом углу изображения показан расчет вероятности распределения зерен по размерам для площади поверхности 52749 мкм². Размеры крупных зерен превышают размеры малых зерен от 3 до 8 раз. На графике выделена область, на которой видно, что зерна малого размера составляют 40% от общего числа. Подобное бимодальное распределение объясняет высокие показатели прочности сплава (табл. 1).

В последние десятилетия внимание к взаимосвязи бимодального распределения размеров зерен и высоких прочностных характеристик существенно возросло [17, 18], так как большинство сплавов, содержащих нанокристаллиты, при повышении твердости проявляют низкую пластичность [19, 20] и бимодальное распределение зерен по размерам рассматривается как один из возможных способов оптимизации свойств прочности и пластичности [19–21].

На рис. 2б приведена воронка кавитации в теле зерна, также виден выход на поверхность плоскостей скольжения. Интересный результат получен по своеобразному формированию деформационных выступов на поверхности мембраны, которые сопровождаются возникновением воронок в основании (рис. 2в).

Мембрана Pd_{93.5}In_{6.0}Ru_{0.5}

Для мембраны Pd_{93.5}In_{6.0}Ru_{0.5} ясно выраженных границ зерен, как в случае сплава Pd₉₅Pb₅ (рис. 1), на АСМ-изображении поверхности не наблюдали (рис. 3). Сплав подтвердил свои особенности, отмеченные ранее для мембран аналогичного состава [11] — малоугловые границы зерен, нанодисперсность структуры, отсутствие процессов декогезии и слабо выраженная кавитация на поверхности.

Шероховатость поверхности сплава составила 200 нм на площади в 1000 мкм², что вдвое ниже шероховатости поверхности сплава палладий–

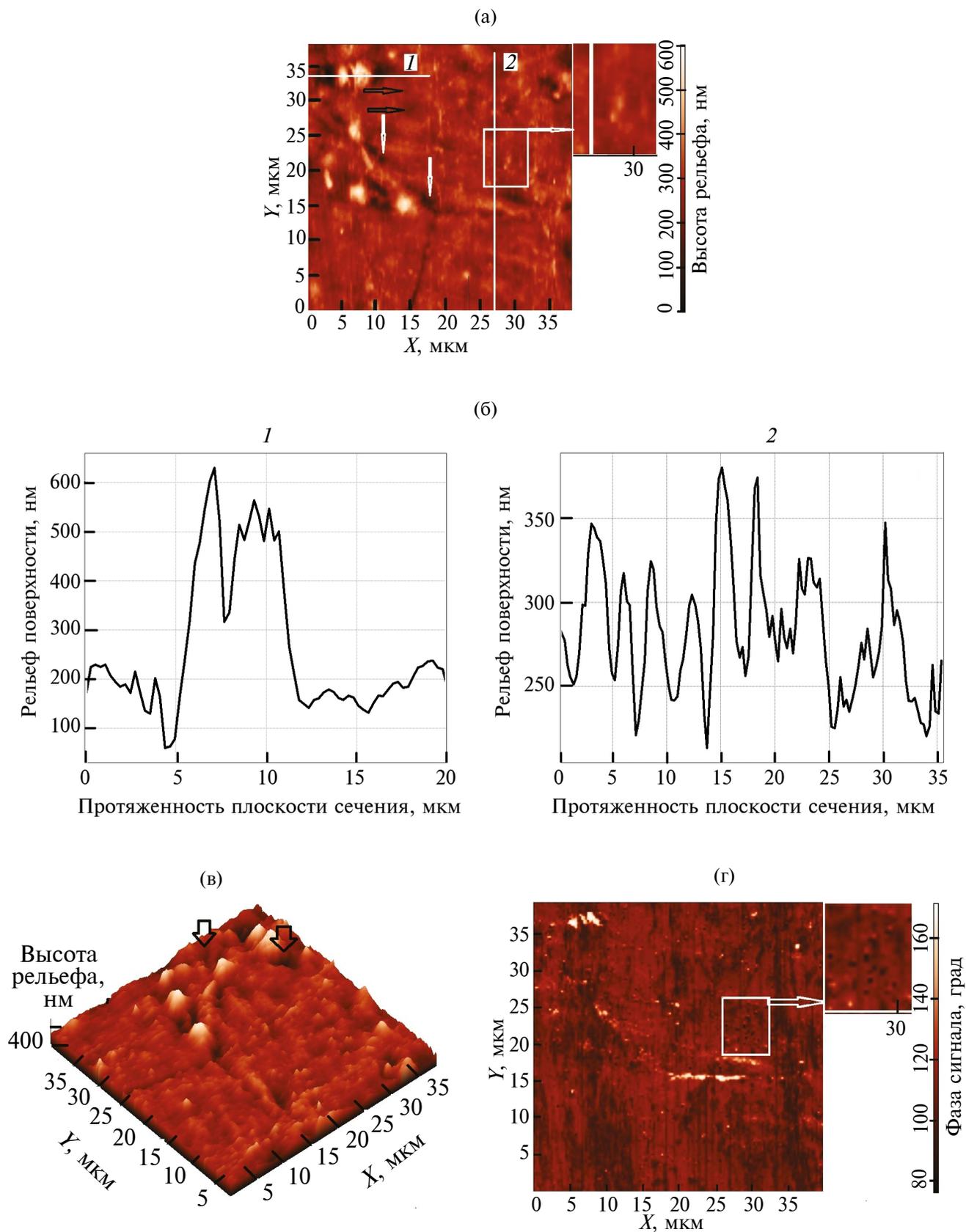


Рис. 1. Амплитудное (а), трехмерное (в) и фазовое (г) АСМ-изображения поверхности образца состава $\text{Pd}_{95}\text{Pb}_5$ и профили рельефа выделенных на рис. 1а участков 1 и 2 (б).

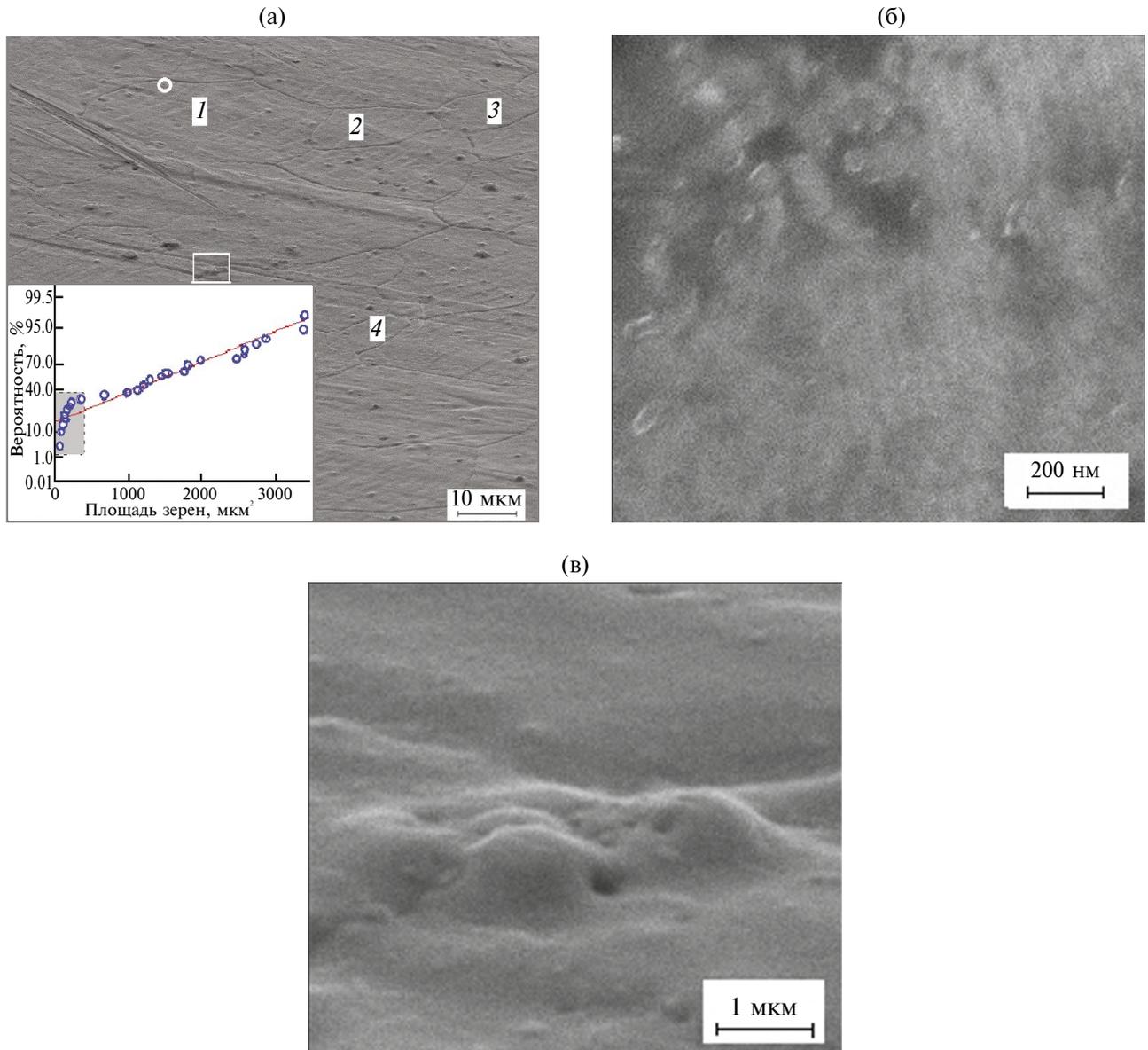


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности сплава Pd₉₅Pb₅, полученные в режиме детектирования вторичных электронов: а — бимодальное распределение зерен сплава по размерам; снимок выполнен под углом 72° к поверхности для отображения деформационных выступов; б — воронка в теле зерна с выявленной столбчатой укладкой кристаллитов; в-конгломерация колоколообразных выступов на границе зерен в области, выделенной квадратной рамкой на рис. 2а. На вставке рис 2а показан результат расчета (точки) вероятности распределения зерен по размерам на поверхности площадью 52749 мкм², сплошной показано нормальное распределение.

Таблица 1. Функциональные характеристики мембранных сплавов: $\langle D \rangle$ — средний размер областей когерентного рассеяния, $\Delta V/V_{Pd}$ — относительное изменение объема элементарной ячейки палладия при внедрении в кристаллическую решетку легирующего элемента, δ -пластичность сплавов; a — период кристаллической решетки основной фазы

Элементный состав сплава, мас. %	a , нм [5, 16]	Твердость H_V , кг/мм ² [1, 10]	$\Delta V/V_{Pd}$, %	$\langle D \rangle$, нм	δ , % [1, 10]	Водородопроницаемость по отношению к показателю водородопроницаемости палладия при 673 К [1, 10]
Pd ₉₅ Pb ₅	0.39054 ± 0.00008	65	1.2	43.5	12	1.6
Pd _{93.5} In _{6.0} Ru _{0.5}	0.39077 ± 0.00007	114	1.4	35.7	26	1.2

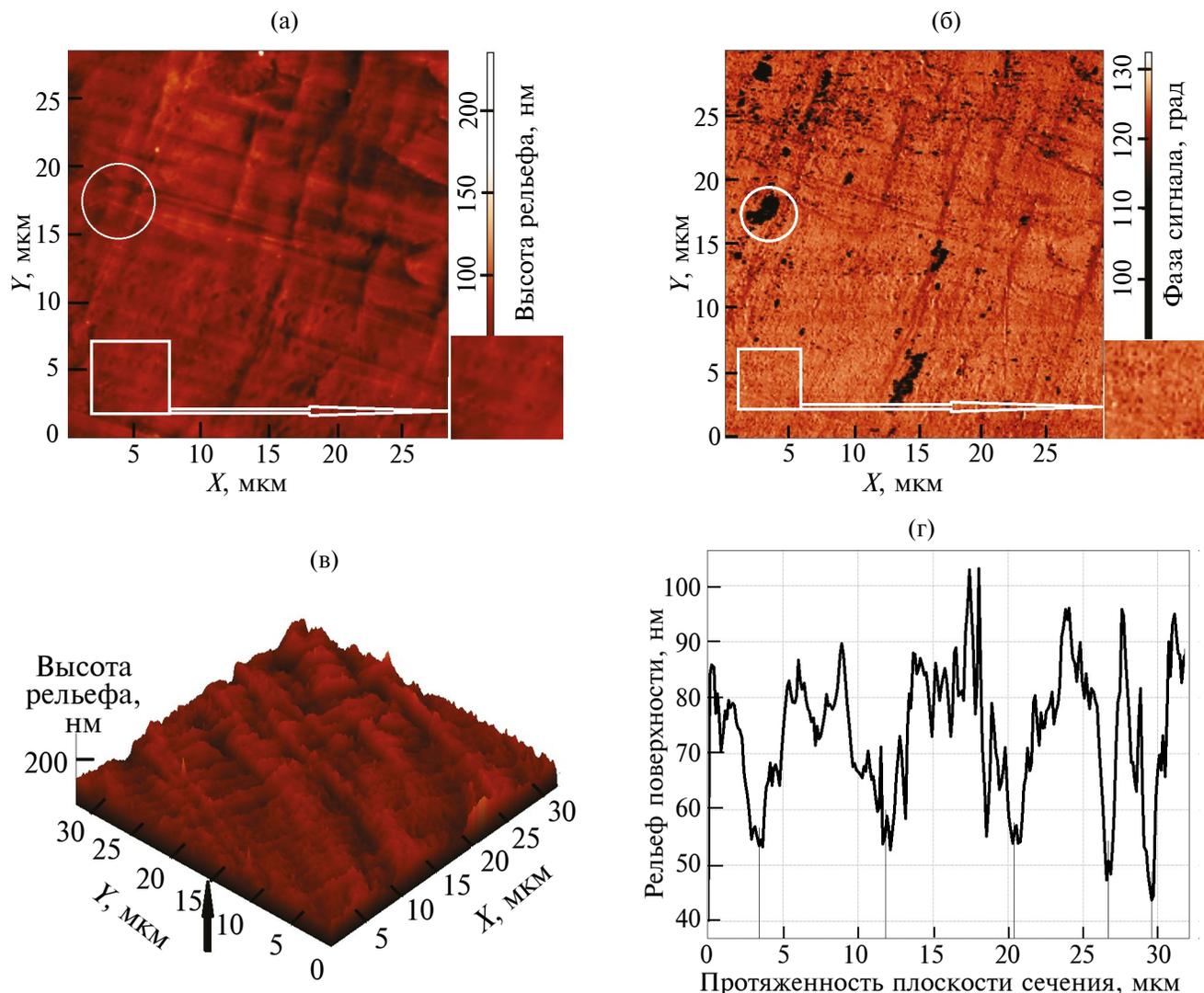


Рис. 3. Амплитудное (а), трехмерное (б) и фазовое (в) АСМ-изображения поверхности образца состава $\text{Pd}_{93.5}\text{In}_{6.0}\text{Ru}_{0.5}$ и профиль сечения мембраны плоскостью (г), указанной стрелкой на рис. 3б.

свинец, если не рассматривать высоты холмообразных выступов на поверхности образца состава $\text{Pd}_{95}\text{Pb}_5$. Если сравнение проводить с учетом холмообразных формирований, то шероховатость поверхности мембраны $\text{Pd}_{93.5}\text{In}_{6.0}\text{Ru}_{0.5}$ в три раза ниже шероховатости поверхности мембраны состава $\text{Pd}_{95}\text{Pb}_5$. Заинтересованность исследователей в уменьшении шероховатости мембранных фильтров [22] обусловлена не только отсутствием загрязнения их поверхности углеродом и повышением периода работоспособности, но и с востребованностью сплавов на основе палладия в электронной промышленности при проектировании разъемов и контактов микросхем [23].

На АСМ-изображениях поверхности мембраны (рис. 3а, 3б) этого сплава нами отмечены области выраженной дендритной структуры

(увеличенное изображение выделенной области). Дендритность поверхности заметна и на рис. 3в: крупные деформационные ступеньки расположены с периодом от 3 до 9.5 мкм. Их максимальная высота до 50 нм. Ступеньки изрезаны дендритной укладкой lamelley высотой от 5 до 15 нм с периодом 0.5 мкм, отражено в профиле сечения (рис. 3г). В работе [11] была получена схожая дендритная структура поверхности сплава, которую объяснили наличием “фазы порядка”. В этом случае квазиоднородное распределение атомов сплава испытывает пространственно-периодическую модуляцию, что формирует флуктуации деформаций.

На АСМ-изображении, выполненном методом латеральных сил, заметны вариации контраста, что показывает высокую чувствительность от-

клика сигнала по фазе к локальным вариациям твердости поверхности исследуемого образца (рис. 3б — выделено белой окружностью). Полагаем, что причиной изменения латеральной силы полагаем флуктуации элементного состава на разных участках поверхности. На рис. 3а топологическую область формирования пониженной твердости поверхности мы выделили в аналогичной окружности. По всей видимости, обнаружение подобных участков свидетельствует о наличии фазы, обедненной легирующими элементами, которые при добавлении к палладию увеличивают твердость поверхности мембран [1, 3].

На рис. 4 приведены изображения поверхности мембраны, полученные в режиме детектирования вторичных электронов. РЭМ-изображение на рис. 4а показывает редкие деформационные выступы на поверхности мембраны. В отличие от сплава $Pd_{95}Pb_5$ деформации не сопровождаются формированием воронок в основании. Микровыступы являются сторонами кратеров (рис. 4б), сформированными редкими углублениями сдвиговой деформации. Форма этих углублений эллипсоидная, соотношение диаметров от 1.3 до 1.6 (рис. 4б). Крупное сдвиговое углубление, показанное в увеличении на рис. 4в имеет разме-

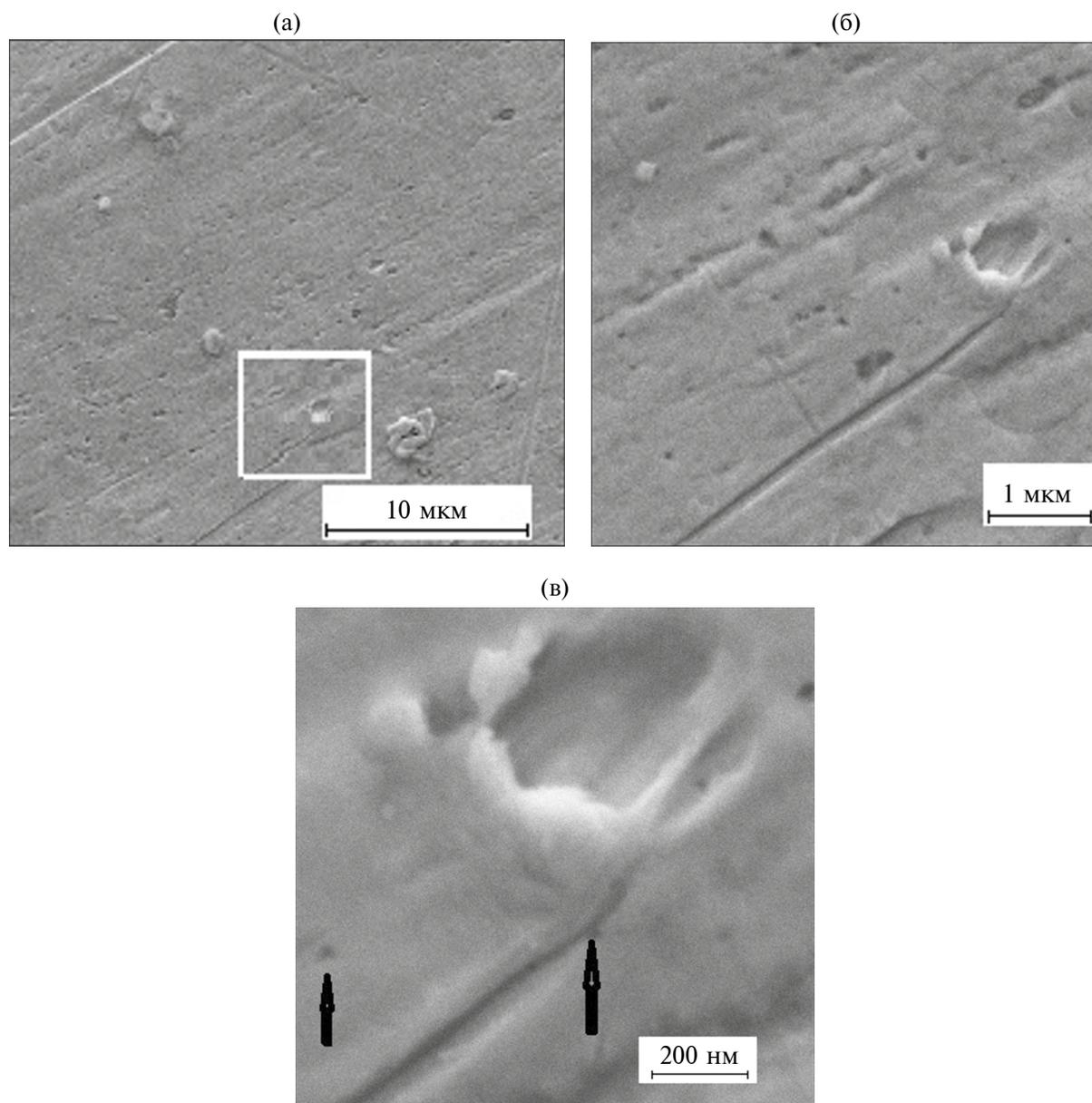


Рис. 4. РЭМ-изображения поверхности сплава $Pd_{93.5}In_{6.0}Ru_{0.5}$, полученные в режиме детектирования вторичных электронов: а — поверхность сплава с выделенной областью деформации поверхности; б — увеличенное изображение области в 3б мкм²; в — увеличенное изображение области сдвиговой деформации материала на поверхности.

ры 651×860 нм. По краям сдвиговой “воронки” расположен пластический отгесненный материал, просматриваются полосы сдвиговой деформации.

Форму правильной окружности на поверхности сплава имеют малые полости (указаны черными стрелками на рис. 4в). Минимальный размер диаметра таких полостей 22 нм, максимальный 112 нм. Эти полости, полагаем, могут быть обусловлены коагуляцией вакансий в приповерхностном слое материала.

В табл. 1 приведены важные функциональные характеристики исследуемых сплавов и период кристаллической решетки основной фазы, установленные методом рентгеновской дифракции с использованием синхротронного излучения на станции рентгеноструктурного анализа Научно-исследовательского центра “Курчатовский институт” [16, 24]. Как видно из табл. 1, однозначный ответ на причины формирования различий в морфологии поверхности фильтров в настоящий момент не сформирован, идет поиск основных причин и закономерностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами АСМ и РЭМ проведен сравнительный анализ морфологии поверхностей плотных мембранных фильтров палладиевых сплавов $\text{Pd}_{95}\text{Pb}_5$ и $\text{Pd}_{93.5}\text{In}_{6.0}\text{Ru}_{0.5}$. В работе экспериментально подтверждено влияние элементов легирования палладия на формирование рельефа поверхности плотных мембранных фильтров.

На АСМ-изображениях, полученных методом контраста латеральных сил, на поверхности образцов выявлено распределение участков различной твердости. Различия в фазовых АСМ-изображениях поверхности указывают на влияние температуры плавления компонентов сплавов и процессов упорядочения атомов в процессах формирования фазового состава поверхности.

Полученные экспериментальные результаты важны для понимания и учета причин деградиационных изменений поверхности мембранных фильтров в технологических процессах водородной энергетики и могут быть рассмотрены для металлических систем, контактирующих с водородом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Мембраны были изготовлены по гос. заданию № 075-01176-23-00. Авторы выражают благодарность Н.Р. Рошан за интерес к их работе и полезные замечания.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы настоящей работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burkhanov G.S., Gorina N.B., Kolchugina N.B., Roshan N.R.* // *Plat. Metals Rev.* 2011. V. 55. P. 3.
2. *Al-Mufachi N.A., Rees N.V., Steinberger-Wilkens R.* // *Ren. Sustain. Energy Rev.* 2015. V. 47. P. 540. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.026>
3. *Бурханов Г.С., Кольчугина Н.Б., Рошан Н.Р., Словецкий Д.И.* // Тяжелое машиностроение 2007. № 11. С. 17.
4. *Alqaheem Y., Alomair A.A.* // *Membranes.* 2020. V. 10. P. 33. <https://doi.org/10.3390/membranes10020033>
5. *Akimova O.V., Tereshina I.S., and Kaminskaya T.P.* // *Mater. Sci.Forum.* 2021. V. 1037. P. 626. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.626>
6. *Creuzet F., Ryschenkow G., Arribart H.* // *J. Adhesion.* 1992. V. 40. P. 15.
7. *Ломов А.А., Захаров Д.М., Тарасов М.А., Чекушкин А.М., Татаринцев А.А., Киселев Д.А., Ильина Т.С., Селезнев А.Е.* // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. Вып. 7. С. 897. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.07.55743.83-23>
8. *Суханова Т.Е., Светличный В.М., Кузнецов Д.А., Вылегжанин М.Э., Ваганов Г.В., Лебедев Н.В.* // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. Вып. 10. С. 1491. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.10.51361.88-21>
9. *Sharma B., Kim J.S.* // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2017. V. 42. P. 25446. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.142>
10. *Gorbunov S.V., Kannykin S.V., Penkina T.N., Roshan N.R., Chustov E.M., Burkhanov G.S.* // *Russian Metallurgy (Metally).* 2017. V. 1. P. 54. <https://doi.org/10.1134/S0036029517010050>
11. *Акимова О.В., Терешина И.С., Каминская Т.П.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 10. С. 64. <https://doi.org/10.31857/S1028096021100022>
12. *Акимова О.В., Каминская Т.П., Попов В.В., Горбунов С.В.* Морфология поверхности плотных мембранных фильтров на основе палладия с различными легирующими элементами // Материалы международной конференции “Живучесть и конструкционное материаловедение”. Москва. 9–11 ноября 2022 г. С. 7. ISBN 978-5-904282-17-2
13. *Akimova O.V., Tereshina I.S., Kaminskaya T.P.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2021. V. 2103. P. 012228. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012228>
14. *Wang Y., Zhang X., Xu J., Sun X., Zhao X., Li H., Liu Y., Tian J., Hao X., Kong X., Wang Zh., Yang J., Su Y.* // *Front. Chem.* 2022. V. 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.931169>

15. *Borrajo-Pelaez R., Hedström P.* // Solid State Mater. Sci. 2018. V. 43. Iss. 6. P. 455.
<https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1370576>
16. *Akimova O.V., Svetogorov R.D., Ovcharov A.V., Roshan N.R.* // Membranes. 2022. V. 12. P. 1132.
<https://doi.org/10.3390/membranes12111132>
17. *Szabó P.J., Field D.P., Jóni B., Horky J., Ungár T.* // Metallurgical Mater. Trans. A. 2015. V. 46. P. 1948.
<https://doi.org/10.1007/s11661-015-2783-x>
18. *Zha M., Zhang H.-M., Yu Zh.-Y., Zhang X.-H., Meng X.-T., Wang H.-Y., Jiang Q.-Ch.* // J. Mater. Sci. Technol. 2018. V. 34. Iss. 2. P. 257.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.11.018>
19. *Wang Y., Chen M., Zhou F., Ma E.* // Nature. 2002. V. 419. Is. 6910. P. 912.
<https://doi.org/10.1038/nature01133>
20. *Mahesh B.V., Singh Raman R.K., Koch C.C.* // J. Mater. Sci. 2012. V. 47. Iss. 22. P. 7735.
<https://doi.org/10.1007/s10853-012-6686-6>
21. *An X.H., Han W.Z., Huang C.X., Zhang P., Yang G., Wu S.D., Zhang Z.F.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 201915.
<https://doi.org/10.1063/1.2936306>
22. *Agnolin S., Melendez J., Di Felice L., Gallucci F.* // Int. J. Hydr. Energy. 2022. V. 47. P. 28505.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.164>
23. *Antler M.* // Platinum Metals Rev. 1982. V. 26. P. 106.
<https://doi.org/10.1595/003214082X263106117>
24. *Akimova O.V., Svetogorov R.D.* // Materials Today: Proc. 2021. V. 38. P. 1416.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.117>

Comparative Analysis of the Surface Morphology of Dense Membrane Filters Pd₉₅Pb₅ and Pd_{93.5}In_{6.0}Ru_{0.5}

O. V. Akimova^{1,*}, T. P. Kaminskaya^{1,**}, S. V. Gorbunov^{2,***}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Moscow 119334 Russia

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

**e-mail: ktp53@mail.ru

***e-mail: merciles@mail.ru

Features of the dense palladium-based membrane filters surface morphology are studied in this work using atomic force microscopy and scanning electron microscopy methods. Element compositions of the filters are Pd₉₅Pb₅ and Pd_{93.5}In_{6.0}Ru_{0.5} (hereafter numerical coefficients determine the composition in wt.%). The thickness of dense membrane filters is 50 and 70 μm, respectively. Samples from metals of high purity were made by methods of electric arc fusion in a protective atmosphere and cold rolled with intermediate vacuum annealing. Morphology of the filter surface shows differences due to the element composition of the alloys. Manifestations of cavitation in the form of micron-sized funnels were found in palladium doping with lead and the absence of such funnels for palladium alloy with indium and ruthenium. Differences in the surface roughness of the samples are shown. In the mode of contrast of lateral forces, the atomic force microscopy method determined the presence of surface areas of different hardness. The obtained results are important for the choice of material for the manufacture of membrane filters with improved performance characteristics and for the development of the elemental composition of membrane filters in order to optimize their operation in high-tech modern technological processes.

Keywords: dense membrane filters, palladium-based alloys, atomic force microscopy, scanning electron microscopy, surface morphology.