

СТРУКТУРА И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ ФОЛЬГИ ТВЁРДОГО РАСТВОРА Pd-Cu И НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

©2016 Е. К. Белоногов^{1,2}, А. И. Донцов¹, В. М. Иевлев^{1,3}, О. С. Копейкина¹,
А. А. Максименко¹, Д. Б. Омороков⁴, Е. Р. Прокушева¹

¹Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394018 Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, Московский проспект, 14, 394026 Воронеж, Россия

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, 119991 Москва, Россия

⁴АО «Концерн «Созвездие», ул. Плехановская, 14, 394018 Воронеж, Россия

Поступила в редакцию: 10.11.2016 г.

Аннотация. Методами РЭМ и ПЭМ с электронно-зондовым микроанализом исследованы структура и элементный состав «cross-section» образцов диффузионного соединения мембранной фольги твердого раствора Pd-Cu и стального корпуса X18H10. Исследованы два варианта гетеросистем: сталь X18H10 — двухслойное модифицирующее покрытие Ni/Pd-Cu — мембранная фольга; сталь X18H10 — однослойное модифицирующее покрытие Pd-Cu — мембранная фольга. После термической обработки под давлением 0.8 МПа при 870 К в течение 1 часа в вакууме $\sim 10^{-2}$ Па выявлены изменения элементного состава в зоне диффузионного соединения. Показано удовлетворительное качество соединения: на межфазных границах имеются только локализованные нанопоры размером, не превышающим 100 нм, что не нарушает герметичность соединения фольги с корпусом мембранного элемента.

Ключевые слова: сплавы палладия, диффузионное соединение, межфазные границы, просвечивающая электронная микроскопия, растровая электронная микроскопия.

ВВЕДЕНИЕ

Фольга твёрдого раствора Pd-Cu удовлетворяет требованиям, предъявляемым к селективным мембранам глубокой очистки водорода [1—7]. Ранее нами была показана [8, 9] возможность получения методом магнетронного распыления мембранной фольги твёрдого раствора Pd-Cu с упорядоченной структурой (β -фаза) [10] и ее высокая водородопроницаемость по сравнению с неупорядоченным твердым раствором (α -фаза).

Технология изготовления мембранного элемента глубокой очистки водорода включает процесс создания герметичного соединения мембранной фольги и корпуса мембранного элемента, не изменяющий селективность и высокую удельную водородопроницаемость. Авторы [11] показали возможность создания вакуумно-плотного соединения нержавеющей стали и фольги (толщиной 50 мкм) сплава Pd-6 мас.% Ru методом диффузионной сварки в течение 45 мин при 1250 К и давлении 15 МПа на соединяемые через никелевую фольгу

поверхности. Столь высокое давление не приемлемо для фольги твердого раствора Pd-Cu толщиной 5 мкм из-за возможности большой деформации и разрушения в зоне соединения.

Поскольку одно из условий обеспечения высокой производительности мембранного элемента — упорядоченная структура фольги твёрдого раствора Pd-Cu, энергия активации диффузии водорода в которой (0.035 эВ) существенно меньше, чем в неупорядоченном твердом растворе (α -фаза; 0.325 эВ) [12] и в палладии (0.23 эВ) [12], что подтверждается молекулярно-динамическим экспериментом [13], то необходимо исследование воспроизводимости β -фазы после выдержки фольги при температуре процесса диффузионного соединения.

Цель данной работы — обоснование режима процесса диффузионного соединения, не приводящего к изменению проницаемости мембранной фольги, т. е. сохранение ее элементного и фазового состава.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы твердого раствора фольги Pd-Cu толщиной 4—7 мкм состава 45 ат.% Pd — 55 ат.% Cu получали методом магнетронного распыления мишени соответствующего состава (исходный вакуум в рабочей камере 10^{-3} Па, давление рабочего газа (Ar) — $1.6 \cdot 10^{-1}$ Па, температура подложки 300 К, скорость конденсации $\sim 1 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$) на поверхности оксидированных монокристаллических пластин кремния (SiO_2/Si). Вследствие слабого межфазного взаимодействия фольгу от подложки отделяли механически.

Поверхность корпуса мембранного элемента из нержавеющей стали X18H10 готовили электрохимическим травлением, отмывали в ультразвуковой ванне, затем методом магнетронного распыления наносили модифицирующее покрытие: двухслойное Ni/Pd-Cu (вариант 1) и однослойное Pd-Cu (вариант 2).

Диффузионное соединение фольги и корпуса под нагрузкой 0.8 МПа осуществляли в вакууме $\sim 10^{-2}$ Па (безмасляные средства откачки) при 870 К в течение 1 часа.

Структуру и распределение элементов в зоне соединения исследовали на «cross-section» образцах в растровом (Qvanta 3D) и просвечивающем (Titan-300) электронных микроскопах с применением электронно-зондового микроанализа.

Оценку взаимной диффузии атомов в области диффузионного соединения проводили в предположении диффузионного механизма процесса [14]. Возможность восстановления упорядоченной структуры фольги после продолжительной выдержки при температуре, обеспечивающей диффузионное соединение, исследовали по изменению удельного сопротивления в цикле: нагрев до 1100 К — выдержка при этой температуре в течение 3.5 ч — охлаждение до комнатной температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура и элементный состав в зоне диффузионного соединения

На рис. 1 приведены РЭМ изображения, характеризующие зёрненную структуру в зоне диффузионного соединения и межфазные границы в варианте 1.

Из них следует, что в зоне соединения формируется субмикронная зеренная структура. В зоне межфазных границ выявлены закрытые (линзовидные) нанопоры размером ~ 15 нм. Судя по таким

размерам, они не могут нарушать герметичность контакта фольги и корпуса протяженностью около 2 мм. Зеренная структура модифицирующего слоя Pd-Cu анизотропная, отражает нормальную одноосную текстуру ростового происхождения и последующей собирательной рекристаллизации. Латеральные размеры кристаллитов находятся в интервале 150—500 нм, т. е. соизмеримы с толщиной слоя. Субмикронная зеренная структура модифицирующего слоя Ni характеризуется относительно высокой дисперсностью с размером зерен в интервале 25—100 нм. Для мембранной фольги характерна изотропная малодефектная зеренная структура, отсутствие микродвойников (свойственное β -фазе), в зоне соединения средний размер зерен ~ 0.5 мкм, а у свободной поверхности ~ 1.0 мкм. Большая дисперсность зёрненной структуры в зоне контакта обусловлена диффузией атомов Fe и Cr (по данным электронно-зондового микроанализа) из стали при изотермическом отжиге в режиме процесса диффузионного соединения и сегрегацией их на границах зерен, что тормозит процесс рекристаллизации.

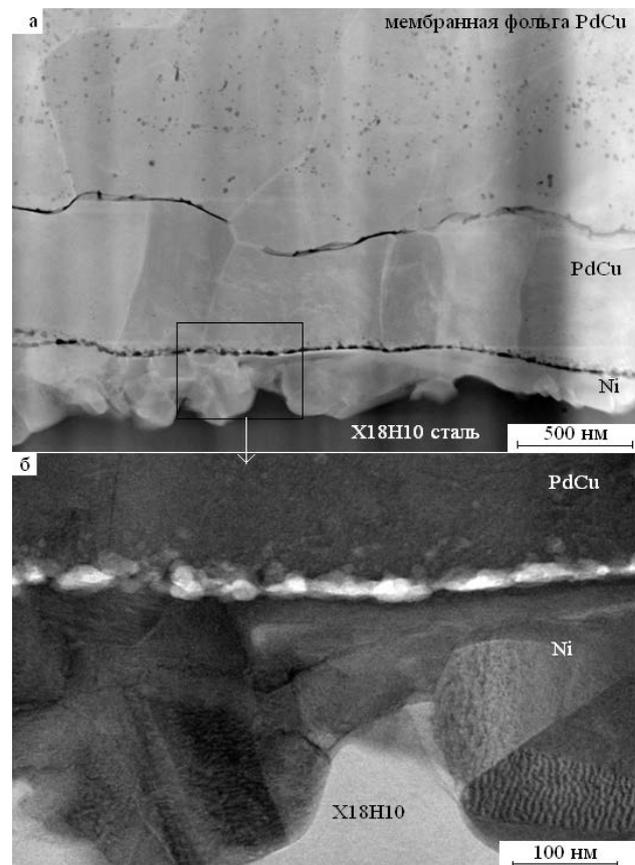


Рис. 1. РЭМ изображение «cross-section» образца гетеросистемы сталь — модифицирующее покрытие Ni/Pd-Cu — фольга Pd-Cu

На рис. 2 приведены РЭМ изображения, характеризующие зёрненную структуру в зоне диффузионного соединения и межфазные границы в варианте 2.

Зёрненная структура фольги менее дисперсная. Закрытые нанопоры и области сегрегации Fe и Cr в виде совокупности нанозерен выявляются в меньшем количестве по сравнению с вариантом 1.

В обоих вариантах хорошо выявляются области бездефектного взаимодействия стали, модифицирующего покрытия и мембранной фольги. Сегрегация в виде нанозерен компонентов нержавеющей стали локализована в слое толщиной ~10 нм (см. рис. 1 и 2). В зоне межфазной границы зеренная структура более высокой дисперсности, чем в объеме фольги и нержавеющей стали.

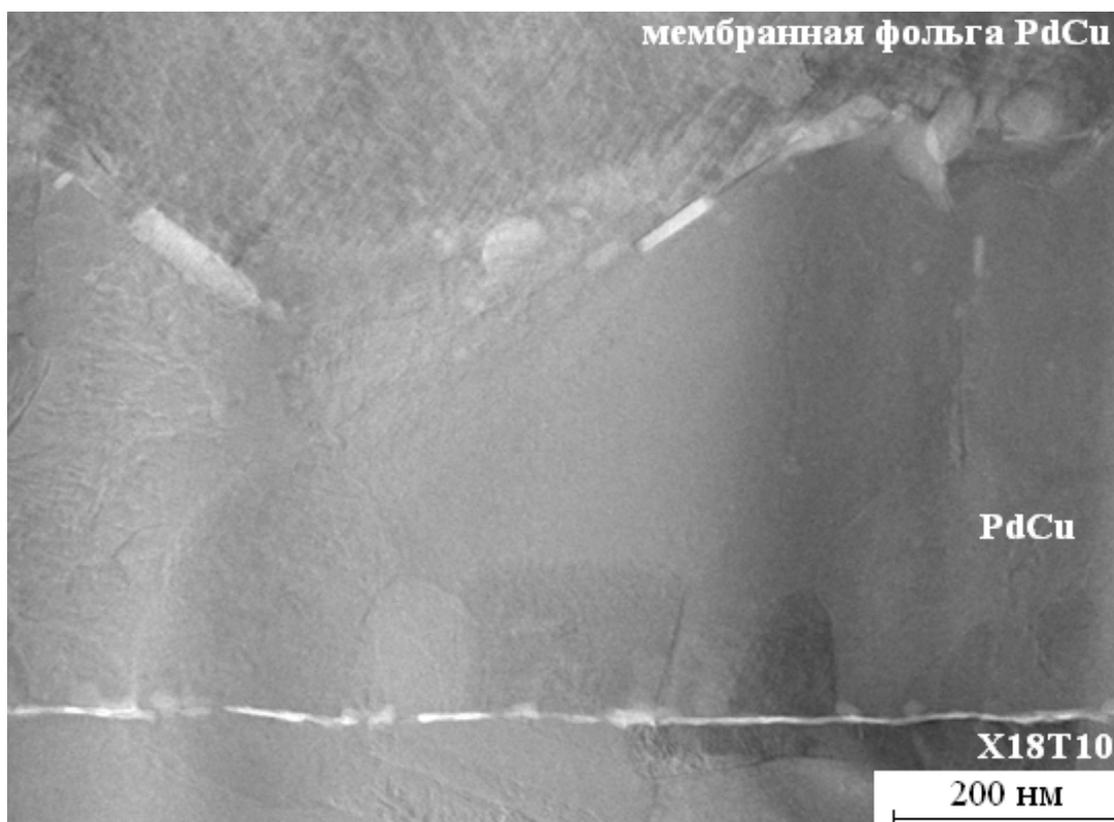


Рис. 2. РЭМ изображение «cross-section» образца гетеросистемы сталь — модифицирующее покрытие Pd-Cu — фольга Pd-Cu

На рис. 3 приведены ПЭМ изображение «cross-section» образца и фрагменты электронограмм соответствующих областей диффузионного соединения корпуса и мембранной фольги Pd-Cu.

Как следует из рис. 3 область контакта фольги и модифицирующего покрытия в зоне диффузионного соединения имеет однофазный состав (β -фаза). Модифицирующее покрытие характеризуется большей дисперсностью зеренной структуры (рис. 3з); средний размер зёрен ~0.2 мкм. Средний размер зерен увеличивается, и их форма становится изотропной по мере удаления от области контакта со стальным корпусом. Высокая дисперсность зеренной структуры может быть следствием наличия в границах зерен атомов элементов, продиффундировавших из стали.

Из анализа электронограмм, представленных на рис. 3, можно сделать следующие выводы: в процессе диффузионного соединения формируется зеренная структура фольги, характеризующаяся максимальной дисперсностью у межфазной границы со стальным корпусом; фазовый состав мембранной фольги и модифицирующего покрытия по всей толщине поперечного среза соответствует упорядоченному твердому раствору Pd-Cu. В зоне диффузии компонентов нержавеющей стали тормозится процесс рекристаллизации.

На рис. 4 представлены РЭМ изображения поверхности «cross-section» образца и концентрационные профили, характеризующие изменения элементного состава в области диффузионного соединения.

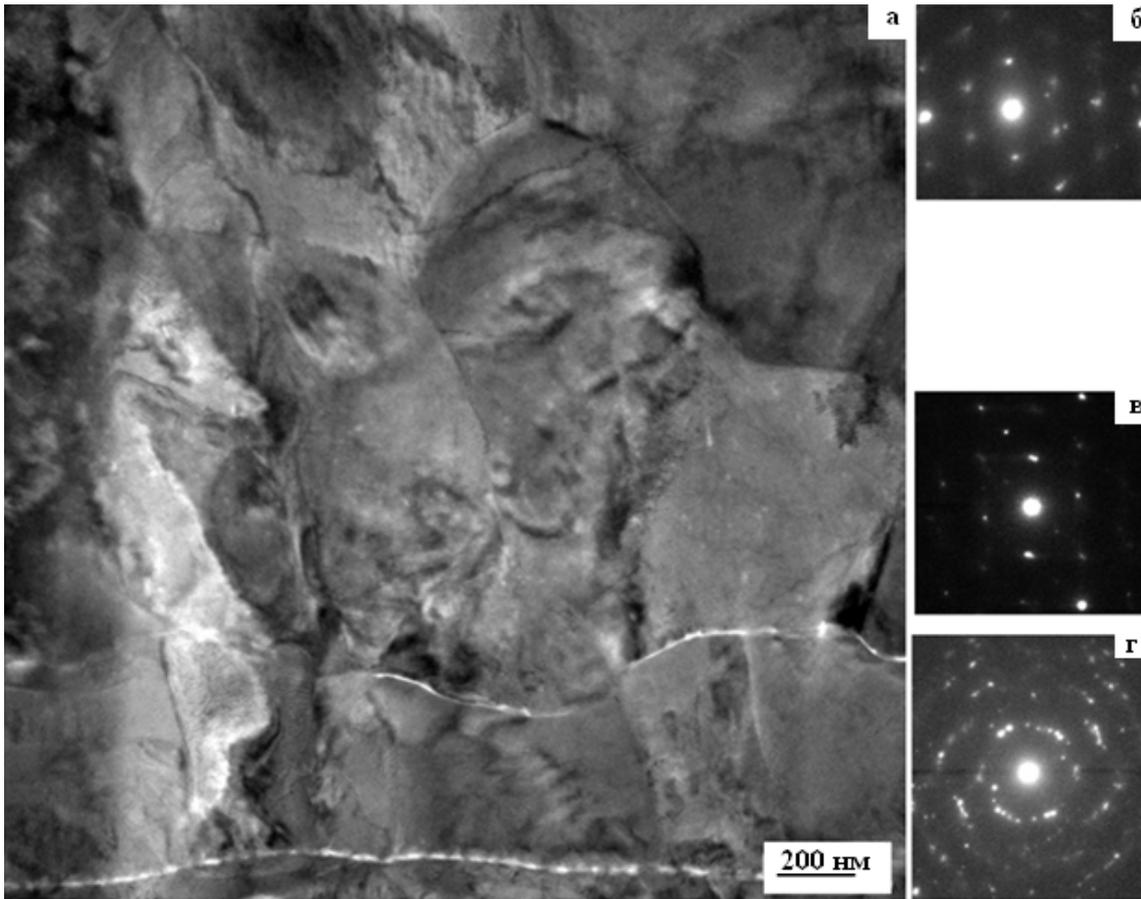


Рис. 3. ПЭМ изображение (а) «cross-section» образца гетеросистемы сталь — модифицирующее покрытие Pd-Cu — фольга Pd-Cu и фрагменты электронограмм соответствующих областей фольги (б, в) и модифицирующего покрытия (з)

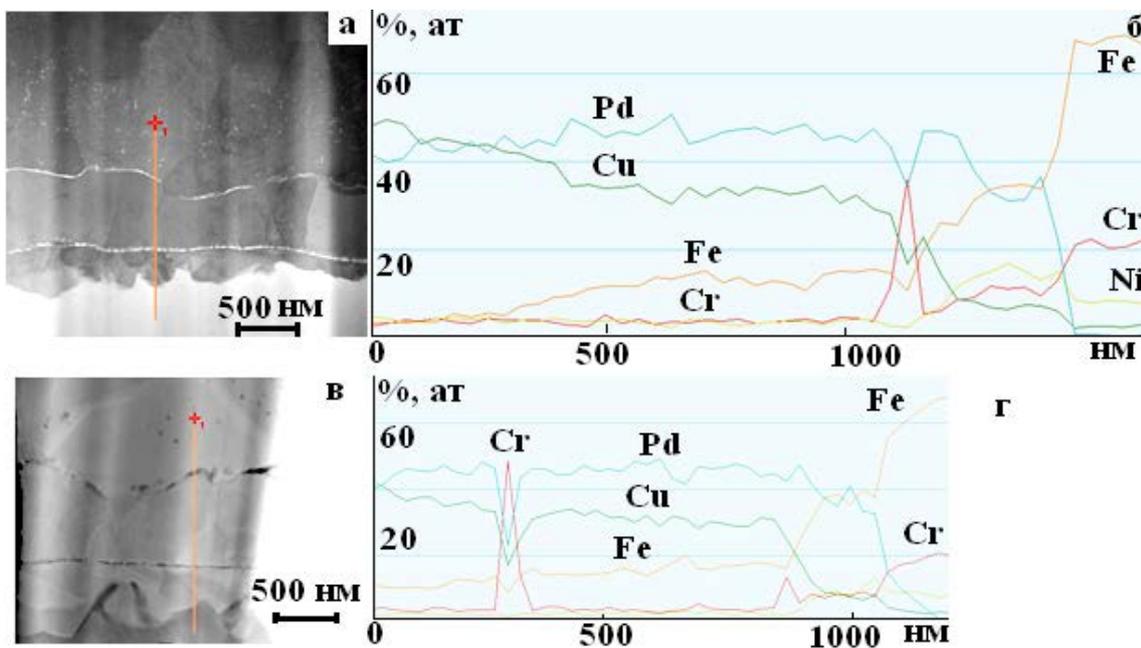


Рис. 4. РЭМ изображения поверхности «cross-section» образцов (а, в) и концентрационные профили (б, з) в области диффузионного соединения вариантов 1 (а, б) и 2 (в, з)

Для обоих вариантов установлено, что процесс диффузионного соединения сопровождается взаимной диффузией атомов элементов гетеросистем.

Из анализа концентрационных профилей следует, что из стального корпуса поступает поток атомов железа и хрома; содержание хрома достигает экстремальных значений на границе стальной корпус/модифицирующее покрытие в варианте 1 и на границе модифицирующее покрытие/мембранная фольга вариант 2. Очевидно, что наличие никеля в модифицирующем покрытии ограничивает диффузию хрома из стального корпуса в фольгу. Диффузионный поток атомов железа и хрома проходит на всю толщину (более 500 нм) модифицирующего покрытия и, в меньшей доле, проникает в мембранную фольгу. Поток атомов Pd и Cu проникает в корпус на глубину не более 100 нм.

Обратимость фазового состава

К обоснованию выбора температурных режимов диффузионного соединения и работы мембранного элемента проведена оценка обратимости $\beta \rightleftharpoons \alpha$ фазового превращения после длительной выдержки в разупорядоченном состоянии. Рис. 5 характеризует удельное сопротивление образца фольги упорядоченного твердого раствора Pd-Cu (β -фаза) при нагревании до 1200 К (участок 1), выдержке при этой температуре (участок 2) и охлаждении до комнатной температуры (участок 3). Значение удельного электросопротивления в интервалах 0.08—1.5, 1.5—4.0 и более 4.0 мкОм·м отвечает полностью упорядоченному (β -фаза), двухфазному состоянию ($\alpha+\beta$) и полностью разупорядоченному (α -фаза) состояниям соответственно. Установленная зависимость свидетельствует о полном возврате упорядоченного состояния твердого раствора Pd-Cu после отжига при 1200 К в течение 3.5 часов. Следовательно, для мембранного элемента на основе фольги из упорядоченно-

го твердого раствора Pd-Cu (β -фаза) допустимы температуры диффузионного соединения и эксплуатации вплоть до 1200 К.

Оценка количества атомов и глубины диффузии при заданной температуре диффузионного соединения для палладия и меди в железе (основной компонент стали) показала, что стационарное состояние наступает через несколько минут, т. е. много меньше времени изотермического отжига при диффузионном соединении. Установлено, что предельная глубина диффузии атомов (за время 1 час при $T=670$ К) не превышает 20 нм, при $T=870$ К предельная глубина определена в интервале 100—500 нм, причем максимальная величина — глубина проникновения в фольгу атомов хрома и железа, а минимальная — палладия и меди в стальной корпус. При температуре 1070 К расчеты дают величину предельной глубины диффузии хрома в фольгу до 3.5 мкм, доля атомов хрома в контактирующем монослое мембранной фольги составит ~28 %, а железа ~ 20 %.

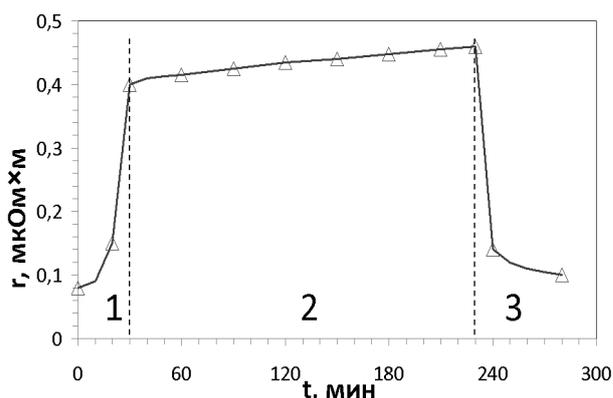


Рис. 5. Зависимость электросопротивления от времени выдержки при температуре 1200 К образцов фольги упорядоченного твердого раствора Pd-Cu (β -фаза): скорость нагревания ~20 град/мин, охлаждения ~30 град/мин

Таблица 1. Рассчитанные величины поверхностной плотности и доли диффундирующих атомов в монослое материала

Температура, К	Число диффундирующих атомов, см ⁻² (доля атомов в монослое, %)				
	Fe→PdCu	Cr→PdCu	Ni→PdCu	Pd→сталь	Cu→сталь
670	7.5·10 ¹¹ (0.6)	Нет данных	0	9.21·10 ¹¹ (0.74)	1.21·10 ¹¹ (0.1)
870	5.595·10 ¹³ (4.48)	2.795·10 ¹⁴ (22.36)	7.321·10 ¹³ (5.86)	5.56·10 ¹³ (4.46)	2.56·10 ¹³ (2.05)
1070	2.078·10 ¹⁴ (16.62)	Нет данных	1.569·10 ¹⁴ (12.5)	9.72·10 ¹³ (7.8)	3.48·10 ¹³ (2.8)

В табл. 1 представлены рассчитанные величины абсолютной численности атомов на единице площади поверхности и их доля в монослое материала, возникающие в процессе диффузии компонентов стального корпуса в фольгу и наоборот. Данные представлены для разных температур диффузионного соединения на глубине от зоны контакта (12 нм), которая выбрана так, чтобы число атомов наименее подвижного элемента была близка к нулю (диффузия никеля в Pd-Cu при 670 К).

Рассчитанные профили абсолютной численности атомов и их доля в монослое материала для диффундирующих компонентов стали в мембранную фольгу (область диффузионного соединения) представлены на рис. 6. Прямолинейный характер зависимости обусловлен тем, что профиль представлен для относительно тонкого слоя диффузионного соединения.

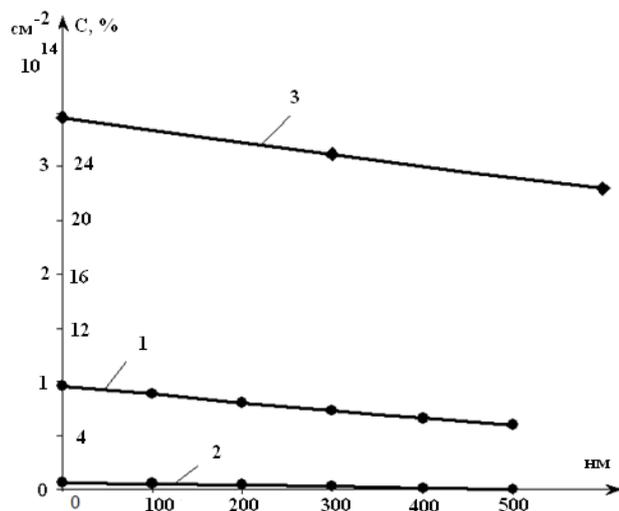


Рис. 6. Абсолютное число атомов Fe (1), Ni (2), Cr (3) и их доля в монослое фольги; диффузия из стали в фольгу твердого раствора Pd-Cu в процессе диффузионного соединения при $T = 870$ К, $t = 1$ ч

Наиболее подвижный металл — хром — существенно препятствует диффузии других компонентов стали X18H10. Число атомов диффундирующих элементов при заданной глубине проникновения в многокомпонентной системе ниже, чем в бинарной, поскольку атомы разных типов препятствуют диффузии друг друга. Поэтому данные, приведенные в табл. 1, являются максимальными величинами концентрации элементов, которые можно ожидать.

Если диффузانت — компонент сплава расчеты дают меньшую величину численности атомов по сравнению с однокомпонентным источником. По-

сле изотермического отжига в процессе диффузионного соединения (1 ч при температуре 870 К, см. рис. 6 и табл. 1) в области диффузионного соединения фольги расчеты дают долю атомов Cr, Fe и Ni порядка ~ 28, 10 и 2 % соответственно. При этом максимальная глубина проникновения Cr и Fe в фольгу ~ 0.5 и 0.15 мкм. Таким образом, несмотря на то, что доля железа выше, основным диффузантом из стали в фольгу выступает хром.

Оценка параметров диффузии компонентов фольги в стальной корпус

Рассчитанные профили абсолютной численности на единице площади поверхности и доли в монослое материала для атомов меди и палладия, диффундирующих из фольги в стальной корпус (область диффузионного соединения), представлены на рис. 7.

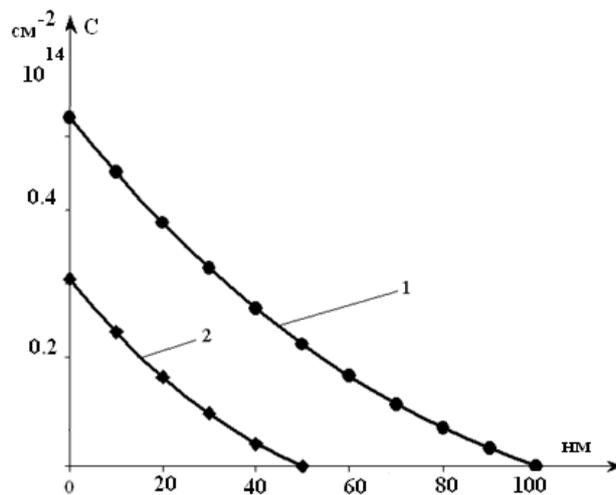


Рис. 7. Абсолютное число атомов Pd (1), Cu (2) и их доля в монослое стали; диффузия компонентов фольги Pd-Cu в стальной корпус в процессе диффузионного соединения при $T = 600$ °С, $t = 1$ ч

Палладий более активный по сравнению с медью диффузانت в сталь. Расчетная глубина диффузии для Pd и Cu при температуре 870 К за 1 час составила 0.1 и 0.05 мкм. Увеличение температуры изотермического отжига в процессе диффузионного соединения до 1070 К дает расчетную величину доли атомов Pd и Cu в приповерхностном слое (~10 нм) стали ~8 и 3 % соответственно.

Сравнение рассчитанных величин потока диффундирующих атомов из стального корпуса в фольгу и встречного потока следует, что поток из стали X18H10 в фольгу твердого раствора Pd-Cu превышает встречный почти в четыре раза.

Наблюдается ограниченная корреляция теоретических и экспериментальных данных; как и ожидалось, реализуется интенсивная диффузия хрома, но доля железа тоже велика. Из фольги в корпус потоки атомов Pd, Cu близки по величине и максимальная глубина их диффузии в стальной корпус ~100 нм, что практически совпадает с теоретическими данными. Рассчитанные и экспериментальные профили концентрации атомов Cr, Fe, Ni в фольге и Pd, Cu в стали совпадают по порядку величины.

Наиболее существенным фактом выступает неизменность элементного состава мембранной фольги, поскольку наблюдаемые профили элементного состава свидетельствуют о неизменном элементном составе фольги твердого раствора PdCu толщиной 4—7 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оба варианта модифицирующего покрытия обеспечивают герметичное диффузионное соединение. Выбранный температурный режим сохраняет стабильность элементного состава, воспроизводимость фазового состава, гарантирующие сохранение производительности и водородопроницаемости мембранной фольги.

Исследования выполнены в соответствии с планом работ по договору № 76/ФПК от 29.07.2015 в рамках договора № 02.G25.31.0159 с Министерством образования и науки Российской Федерации об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мищенко А. П., Сарылова М. Е., Грязнов В. М., Смирнов В. С., Рошан Н. Р., Полякова В. П., Савиц-

кий Е. М. // *Известия Академии наук СССР. Серия химическая*, 1977, № 7, с. 1620.

2. Westerwaal R. J., Bouman E. A., Haije W. G., Schreuders H., Dutta S., Wu M. Y., Boelsma C., Ngene P., Basak S., Dam B. // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, № 10, pp. 3932—3943.

3. Basile A., Iulianelli A., Long T., Liguori S., De Falco M. // *Membrane Reactors for Hydrogen Production Processes*, 2011, pp. 21—55.

4. Howard B. H., Killmeyer R. P., Rothenberger K. S., Cugini A. V., Morreale B. D., Enick R. M., Bustamante F. // *J. of Membrane Science*, 2004, т. 241, № 2, с. 207—218.

5. Гапонцев А. В., Кондратьев В. В. // *УФН*, 2003, т. 173, № 10, с. 1107—1129.

6. Бурханов Г. С., Горина Н. Б., Кольчугина Н. Б., Рошан Н. Р. // *Российский химический журнал*, 2006, т. 50, с. 36—40.

7. Соловецкий Д. И., Чистов Е. М., Рошан Н. Р. // *Альтернативная энергетика и экология*, 2004, № 1, с. 54—57.

8. Иевлев В. М., Бурханов Г. С., Рошан Н. Р., Белоногов Е. К., Максименко А. А., Донцов А. И., Рудаков К. Е. // *Металлы*, 2012, № 6, с. 92—100.

9. Иевлев В. М., Солнцев К. А., Максименко А. А., Белоногов Е. К., Канныкин С. В., Синельников А. А., Синецкая Д. А. // *Доклады Академии наук*, 2015, т. 460, № 4, с. 422—426.

10. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: в 3 томах* / Под общей редакцией академика РАН Е. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997, т. 2, 1024 с.

11. *Способ диффузионной сварки*. Патент РФ № 2579413 / Г. С. Бурханов, А. В. Люшинский, А. Е. Люшинская, Н. Р. Рошан, К. А. Солнцев, Е. С. Федорова, Е. М. Чистов.

12. *Водород в металлах* / Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. М.: Мир, 1981, т. 1, 385 с.

13. Евтеев А. В., Иевлев В. М., Косилов А. Т., Прижимов А. С. // *Физика металлов и металловедение*, 2005, т. 100, № 2, с. 91—93

14. *Физическая химия* / А. А. Жуховицкий, Л. А. Шварцман. М.: Металлургия, 1976, 544 с.

THE STRUCTURE AND ELEMENTAL COMPOSITION OF THE CONNECTION ZONE OF THE FOIL OF Pd-Cu SOLID SOLUTION AND STAINLESS STEEL

©2016 Е. К. Belonogov^{1,2}, А. И. Dontsov¹, V. M. Ievlev^{1,3}, О. S. Kopeykina¹, А. А. Maksimenko¹, D. B. Omorokov⁴, E. R. Prokusheva¹

¹Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394018 Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Moskovskiy pr., 14, 394026 Voronezh, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991 Moscow, Russia

⁴JSC «Concern «Sozvezdie», 14 Plekhanovskaya St., 394018 Voronezh, Russia

Received 10.11.2016

Abstract. For substantiation of the technological process of diffusion connection between thin membrane foil with the ordered Pd-Cu solid solution (β -phase) and the body of the membrane element of stainless steel X18H10, ensuring preservation of elemental and phase composition and hydrogen permeability of the foil, by the methods of scanning electron microscopy and transition electron microscopy «cross-section» samples of heterosystems «steel X18H10 –double–layer modifying coating Ni/Pd-Cu — membrane foil» and «steel X18H10 — modifying coating single-layer Pd-Cu — membrane foil» have been investigated.

Pd-Cu foil of composition 45 at.% Pd — 55 at.% Cu with a thickness of 4—7 μm were obtained by the magnetron sputtering method of targets of the corresponding composition. The surface of the steel case treated by electrochemical etching. After the ultrasonic cleaning the modifying coverage of two versions: Ni/Pd-Cu or Pd-Cu was applied using the magnetron sputtering process. Diffusion connection of foil and the case under load of 0.8 MPa was carried out in a vacuum $\sim 10^{-2}$ Pa at 870 K during one hour.

The changes of the elemental composition in the zone of diffusion connection was identified. The satisfactory quality of connection took place: there is only a localized nanopores at interphases with a size not exceeding 100 nm, which does not violate the integrity of the connection of the foil with the membrane element case.

It is established that the flux of the diffusing atoms from the steel case to the foil exceeds the counter. The chromium content reaches maximum values on the boundary of the case/coating in the first variant and on the coating/foil in the second. The diffusion flux of Cr and Fe atoms pass through the entire thickness (500 nm) of modifying coating, in a smaller proportion — to the membrane foil; Pd and Cu atoms diffuse into the case to a depth of not more than 100 nm.

Keywords: solid solutions of Pd, diffusion connection, interphase boundaries, transition electron microscopy, scanning electron microscopy.

REFERENCES

- Mischenko A. P., Sarylova M. E., Gryaznov V. M., Smirnov V. S., Roshan N. R., Polyakova V. P., Savitskiy E. M. *Izvestiya Akademii Nauk USSR, Seriya Khimicheskaya*, 1977, no. 7, pp. 1620.
- Westerwaal R. J., Bouman E. A., Haije W. G., Schreuders H., Dutta S., Wu M. Y., Boelsma C., Ngene P., Basak S., Dam B. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, no. 10, pp. 3932—3943. DOI 10.1016/j.ijhydene.2015.01.124
- Basile A., Iulianelli A., Long T., Liguori S., De Falco M. *Membrane Reactors for Hydrogen Production Processes*, 2011, pp. 21—55. DOI 10.1007/978-0-85729-151-6
- Howard B. H., Killmeyer R. P., Rothenberger K. S., Cugini A. V., Morreale B. D., Enick R. M., Bustamante F. *J. of Membrane Science*, 2004, vol. 241, no. 2, pp. 207—218. DOI 10.1016/j.memsci.2004.04.031
- Gapontsev A. V., Kondrat'ev V.V. *UFN [Physics-Usppekhi]*, 2003, vol. 46, no. 10, pp. 1077—1099 DOI 10.1070/PU2003v046n10ABEH001660
- Burhanov G. S., Gorina N. B., Kol'chugina N.B., Roshan N. R. *Rossiiskij himicheskij zhurnal*, 2006, vol. 50, pp. 36—40.
- Soloveckij D. I., Chistov E. M., Roshan N. R. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, no. 1, pp. 54—57.
- Ievlev V. M., Belonogov E. K., Maksimenko A. A., Dontsov A. I., Rudakov K. E., Burkhanov G. S., Roshan N. R. *Metally [Russian Metallurgy]*, 2012, vol. 2012, no. 11, pp. 994—1001. DOI: 10.1134/S0036029512110080
- Ievlev V. M., Maksimenko A. A., Belonogov E. K., Kannykin S. V., Sinelnikov A. A., Sinetskaya D. A., Solntsev K. A. *Doklady Physical Chemistry*, 2015, vol. 460, no. 2, pp. 33—36. DOI: 10.1134/S0012501615020025
- Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: v 3 tomakh / Pod obshchei redaktsiei akademika RAN E. P. Lyakisheva*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997, vol. 2, 1024 p.
- Sposob diffuzionnoy svarki*. Patent RU № 2579413 / G. S. Burkhanov, A. V. Lushinskiy, A. E. Lushinskaya, N. R. Roshan, K. A. Solntsev, E. S. Fedorova, E. M. Chistov.
- Hydrogen in Metals / Ed. by G. Alefeld and J. Vökl*. Springer-Verlag, 1978, 480 p. (Russ. ed.: *Vodorod v metallakh / Pod red. G. Alefel'da i I. Fel'klya*. Moscow, Mir Publ., 1981, vol. 1, 385 p.)
- Evteev A. V., Ievlev V. M., Kosilov A. T., Prizhimov A. S. *The Physics of Metals and Metallography*, 2005, vol. 100, no. 2, pp. 179—181.
- Fizicheskaya khimiya / A. A. Zhukovitskiy, L. A. Shvartsman*. Moscow, Metallurgy Publ., 1976, 544 p.

Белонгов Евгений Константинович — д. ф.-м. н., профессор кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, профессор кафедры физики, Воронежский государственный технический университет; тел.: +7 (473) 2208735, e-mail: ekbelongov@mail.ru

Донцов Алексей Игоревич — к. ф.-м. н., научный сотрудник кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет; тел.: +7 (473) 2208735, e-mail: dontalex@mail.ru

Иевлев Валентин Михайлович — д. ф.-м. н., профессор, академик РАН, заведующий кафедрой междисциплинарного материаловедения Факультета наук о материалах МГУ им. М. В. Ломоносова, заведующий кафедрой материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет; тел.: +7 (473) 2208735, e-mail: rnileme@mail.ru

Копейкина Оксана Сергеевна — студентка химического факультета, Воронежский государственный университет; тел.: +7 (473) 2208735, e-mail: zhivotenko_oxsan@mail.ru

Максименко Александр Александрович — к. ф.-м. н., н. с. кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет; тел.: +7 (473) 2208735, e-mail: maximencoalex@mail.ru

Оморокв Дмитрий Борисович — к. ф.-м. н., старший конструктор отдела 5642 АО «Концерн «Созвездие»»; тел.: +7 (920) 4373591, e-mail: saref@list.ru

Прокушева Елена Романовна — студентка химического факультета, Воронежский государственный университет; тел.: +7 (473) 2208735, e-mail: prolen14@gmail.com

Belonogov Evgeniy K. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Materials Science and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University, Professor of Physics Department, Voronezh State Technical University; ph.: +7 (473) 2208735, e-mail: ekbelongov@mail.ru

Dontsov Aleksey I. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Researcher of Materials Science and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University; ph.: +7 (473) 2208735, e-mail: dontalex@mail.ru

Ievlev Valentin M. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of RAS, Head of Multidisciplinary Materials Science Department, Lomonosov Moscow State University, Head of Materials Science and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University; ph.: +7 (473) 2208735, e-mail: rnileme@mail.ru

Kopeykina Oksana S. — student of Chemical Department, Voronezh State University, (473) 2208735, e-mail: zhivotenko_oxsan@mail.ru

Maksimenko Aleksandr A. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Researcher of Materials Science and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University; ph.: (473) 2208735, e-mail: maximencoalex@mail.ru

Omorokov Dmitry B. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Constructor of Department no. 5642, JSC «Concern «Sozvezdie»; ph.: +7 (920) 4373591, e-mail: saref@list.ru

Prokusheva Elena R. — student of Chemical Department, Voronezh State University; ph.: +7 (473) 2208735, e-mail: prolen14@gmail.com