

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P13-86-162

В.М.Быстрицкий, Я.Возняк, В.Б.Грановский\*,  
В.П.Джелепов, А.П.Захаров\*\*, В.Г.Зинов,  
А.И.Канаев\*\*, В.А.Куц\*, Э.Лончки, Ю.П.Мельник\*,  
В.А.Столупин, В.М.Шарапов\*\*

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОНИКНОВЕНИЯ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ  
ЧЕРЕЗ ДВОЙНУЮ ОБОЛОЧКУ ( $Au +$  СПЛАВ ЭИ698)  
ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Направлено в журнал "Атомная энергия"

---

\* Институт геохимии и физики минералов  
АН УССР

\*\* Институт физической химии АН СССР

1986

В настоящее время резко возрос интерес к проблеме мио-катализа ядерных реакций синтеза изотопов водорода <sup>/1/</sup>. Весьма интересной областью при исследовании характеристик данных процессов является область высоких давлений и температур. Поэтому для проведения такого рода исследований необходимо предварительно решить вопрос, связанный с созданием мишени, заполняемой смесью изотопов водорода и обладающей высокой прочностью и малой водородопроницаемостью при высоких температурах до 1050 К и давлениях до 1 кбар. Согласно данным нашей работы <sup>/2/</sup>, механические свойства сплава ЗИ698 (ХН7ЗМБТЮ) позволяют использовать его в качестве материала стенок мишени в указанной области температур и давлений. Однако при высоких температурах проницаемость сплава ЗИ698 становится большой, что практически исключает возможность проведения экспериментов в течение длительного времени с ограниченным количеством газа, находящимся в мишени. В связи с этим необходимо применение "защиты" сплава ЗИ698 от непосредственного контакта с водородом, в виде оболочки из такого материала, для которого проницаемость по отношению к изотопам водорода существенно меньше, чем для ЗИ698. Указанным свойством обладает чистое золото <sup>/3/</sup>.

Создание такой мишени - сэндвича, с другой стороны, позволяет определить неизвестные до сих пор характеристики взаимодействия изотопов водорода с золотом (проницаемость, растворимость, коэффициент диффузии) при высоких температурах и давлениях.

Целью настоящей работы являлось изучение процесса проникновения изотопов водорода при давлениях до 1000 ат и температурах до 1050 К через стенку сосуда, представляющую собой двойную оболочку (Au + ЗИ698).

#### Методика эксперимента

Для исследования взаимодействия изотопов водорода с золотом нами была использована установка, описание которой приведено в работе <sup>/2/</sup>. Конструкция измерительной ячейки отражена на рис. 1. Образец 2 из сплава ЗИ698 имел следующие размеры:  $\phi_{\text{нар.}} = 6,3 \text{ мм}$ ,  $\phi_{\text{внут.}} = 3,3 \text{ мм}$ ,  $l = 52,5 \text{ мм}$ . Снаружи на образец 2 надевалась оболочка 3 из чистого золота (99,99%), выполненная в виде полого цилиндра с размерами:  $\phi_{\text{нар.}} = 6,7 \text{ мм}$ ,  $\phi_{\text{внут.}} = 6,3 \text{ мм}$ ,  $l = 52,7 \text{ мм}$ . Уплотнение оболочки из золота 3 и образца 2 осуществлялось с помощью медных прокладок 5, которые одновременно служили уплотнениями корпуса 1.

Условия проведения эксперимента приведены в таблице I.

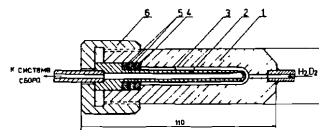


Рис. 1. Измерительная ячейка: 1- корпус, 2- образец, 3- оболочка из золота, 4- стальное кольцо, 5- медные прокладки, 6- накидная гайка.

Таблица I

Газ	T, K	p, ат
H <sub>2</sub>	700 ÷ 1050	500
	700 ÷ 1050	1000
	1050	3 + 1000
2	800 + 1050	500
	800 + 1050	1000
	1050	3 + 1000

При переходе от одних значений p и T к другим производилась вакуумно-термическая тренировка измерительной ячейки. Критерием окончания тренировки являлась степень газовыделения как со стороны высокого давления, так и со стороны системы сбора продиффундировавшего газа, которая не должна превышать 10<sup>-1</sup> мм.рт.ст/ч и 5·10<sup>-3</sup> мм.рт.ст/ч соответственно. Определение проницаемости золота P<sub>Au</sub> по отношению к изотопам водорода, а также энергии активации процесса проникновения водорода E<sub>p</sub> проводилось следующим образом. С использованием данных о проницаемости сплава ЗИ698 <sup>/2/</sup> по отношению к H<sub>2</sub> и D<sub>2</sub>, для каждого значения установившегося потока газа через двойную оболочку (Au + ЗИ698) вычислялось давление газа на внутреннюю поверхность оболочки из золота. Зная величину потока P водорода (дейтерия) через оболочку из золота, а также давление газа с обеих сторон оболочки нетрудно определить проницаемость золота P<sub>Au</sub> по отношению к изотопам водорода и энергии активации процессов проникновения E<sub>p</sub>:

$$P = \frac{P_{Au} \cdot S \cdot (\sqrt{p_H} - \sqrt{p_{вн}})}{d}, \quad (1)$$

$$P_{Au} = P_0 \cdot e^{-\frac{E_p}{RT}}, \quad (2)$$

где P<sub>0</sub> - константа, см<sup>3</sup> н.см<sup>-1</sup>.с<sup>-1</sup>.атм<sup>-1/2</sup>;

S - наружная поверхность оболочки из золота, см<sup>2</sup>;

p<sub>H</sub> - наружное давление, атм;

p<sub>вн</sub> - внутреннее давление, атм;

d - толщина золотой оболочки, равная 0,02 см.

## Результаты эксперимента

На рис. 2 для установившегося режима при температуре 1050 К приведена зависимость потока водорода, продиффундировавшего через двойную оболочку внутрь образца 2 (см. рис. 1), от величины  $\sqrt{p_H}$ . Как видно, данная зависимость хорошо описывается линейной функцией от  $\sqrt{p}$ , начиная со значения 0,5 ат<sup>1/2</sup>, которое определяется соотношением констант скоростей поверхностных реакций и диффузией водорода в золоте <sup>1/4</sup>. На рис. 3 изображена аналогичная зависимость, полученная при

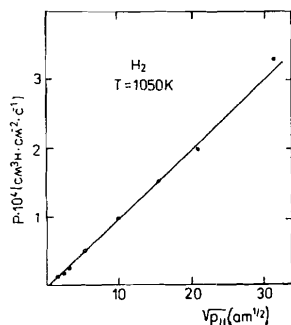


Рис. 2. Зависимость потока водорода от давления газа в измерительной ячейке.

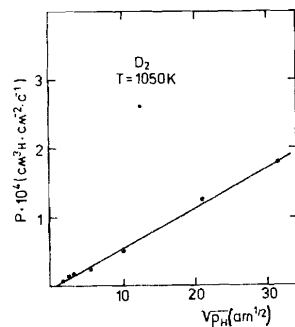


Рис. 3. Зависимость потока дейтерия от давления газа в измерительной ячейке.

работе с дейтерием. Эта зависимость также подчиняется закону  $\sqrt{p}$ , начиная примерно с того же значения предельного давления. Зависимости потоков водорода и дейтерия через двойную оболочку в области температур от 700 К до 1050 К и при давлениях 500 ат и 1000 ат приведены на рис. 4. и 5. Для сравнения на рисунках приведены также потоки водорода и дейтерия через образец из сплава ЭИ698, полученные при тех же условиях ( $\phi_{\text{нар.}} = 6,7$  мм;  $\phi_{\text{внут.}} = 3,3$  мм;  $l = 52,7$  мм). В исследуемом интервале давлений и температур отношение проникновения  $H_2$  к проникновению  $D_2$  лежит в диапазоне от 1,8 при  $T = 1050$  К до 2,1 при  $T = 800$  К. Вычисленные значения  $P_0$  и энергии активации процесса проникновения водорода и дейтерия через золото приведены в таблице 2.

В работе <sup>1/3</sup> исследовалась проницаемость золота по отношению к дейтерию в области давлений до 1,3 ат. Данные, полученные нами, хорошо согласуются с результатами работ <sup>1/3</sup>.

При сравнении данных работы <sup>1/2</sup> (сплав ЭИ698) с результатами

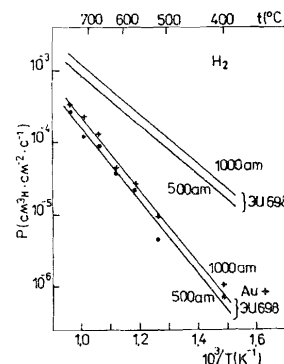


Рис. 4. Температурные зависимости потоков водорода через двойную оболочку (Au + ЭИ698) и оболочку из ЭИ698.

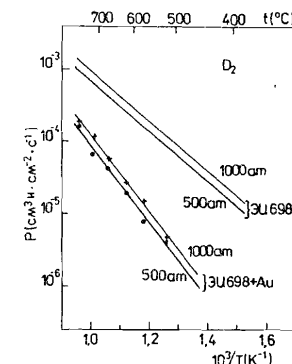


Рис. 5. Температурные зависимости потоков дейтерия через двойную оболочку (Au + ЭИ698) и оболочку из ЭИ698.

Таблица 2

Газ	$P_0 \cdot 10^2,$ $\text{cm}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{c}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1/2}$	$E_p,$ ккал/г-атом
Водород	3,0	24,1
Дейтерий	2,2	24,6

настоящей работы (Au + сплав ЭИ698) следует, что проникновение водорода через золото при  $T = 1050$  К в  $\approx 50$  раз меньше соответствующей величины через сплав ЭИ698, а проникновение дейтерия – в  $\approx 70$  раз меньше. Следует отметить, что в данной геометрии (толщина оболочки из Au = 0,2 мм) потоки водорода и дейтерия при  $T = 1050$  К и  $P = 1000$  ат через (Au + сплав ЭИ698) уменьшаются в  $\approx 5$  и  $\approx 7$  раз соответственно по сравнению с потоками  $H_2$  и  $D_2$  через ЭИ698. Время проведения измерений в этих условиях составило  $\approx 700$  ч.

На основании полученных результатов можно сделать заключение, что использование в качестве стенки сосуда сплава ЭИ698 совместно с оболочкой из золота позволяет проводить исследования с ограниченным количеством газа, находящегося в сосуде, при высоких температурах ( $T = 1050$  К) и давлениях ( $P = 1000$  ат) в течение длительного времени.

Авторы выражают благодарность за плодотворные дискуссии и помощь при проведении измерений Капышеву В.К. и Ривкису Л.А.; за полезные обсуждения Курдюмову А.А.; за помощь при проведении измерений Архипову А.П., Кулагину Б.М., Мокренко П.И., Петровскому М.М., Соковину И.С., Чибисову А.Н., Шамсутдинову Ш.Г.

### Литература

1. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1981, 80, с.1700.  
Caffrey et al., Muon-Catalyzed Fusion Workshop, Jackson Hole, WY, June 1984.
2. Быстрицкий В.М. и др. ОИЯИ, P13-86-161, Дубна, 1986.
3. Vegeal D.R. J.Vac.Sci.Technol., 1978, v.15, No 3, 1146.
4. Гельд П.В., Рябов Р.А. Водород в металлах и сплавах. "Металлургия", М., 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 марта 1986 года.

Быстрицкий В.М. и др. P13-86-162  
Исследование проникновения водорода и дейтерия через  
двойную оболочку (Au + сплав ЭИ698) при высоких  
температурах и давлениях

Применение дополнительного защитного покрытия из золота  
поверхности сосуда, выполненного из жаропрочного сплава  
ЭИ698, позволило уменьшить проникновение водорода и дейтерия  
через стенки сосуда, при температуре 1050 К и давлении  
1 кбар, приблизительно в 5 и 7 раз соответственно. Определе-  
на проницаемость золота по отношению к водороду и дейтерию  
при высоких температурах и давлениях.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Bystritsky V.M. et al. P13-86-162  
Investigation of Hydrogen and Deuterium Penetration  
Through the Double Shell (Au + Alloy EI698) at High  
Temperatures and Pressure Values

An additional protective layer of gold on the surface  
of a vessel made of the high-temperature alloy EI-698 allowed  
us to reduce hydrogen and deuterium penetration through  
the vessel walls at the 1050 K temperature and 1 kbar  
pressure  $\approx 5$  and  $\approx 7$  times respectively. Permeability of  
gold for hydrogen and deuterium at high temperature and  
pressure values has been determined.

The investigation has been performed at the Laboratory  
of Nuclear Problems, JINR,

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna. 1986