

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА МЕТОДОМ  
ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ИХ НАВОДОРОЖИВАНИИ**

Сюй Шупэн, Чжоу Хао

Научный руководитель: профессор В.В. Ларионов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [1208502516@qq.com](mailto:1208502516@qq.com)

**A LABORATORY DEVICE FOR MESURING THE METHOD OF EDDY CURRENTS THE  
DIFFUSION COEFFICIENT OF HYDROGEN IN METALS HYDROGENATION**

Xu Shupeng, Zhou Hao

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.V. Larionov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [1208502516@qq.com](mailto:1208502516@qq.com)

**Abstract.** *A method is proposed for measuring the diffusion coefficient of hydrogen in a membrane made of a titanium alloy VT1-0 based on the use of eddy currents and an installation for its implementation is described. An eddy current sensor is located on the membrane, which is the wall of the electrolytic cell. The diffusion process is measured under the conditions of formation of titanium hydrides. The formation of titanium hydrides during hydrogenation is monitored over time by measuring the diffraction spectra. The results of the measurement of the diffusion coefficient of hydrogen by the proposed method are given in the conditions of formation of titanium hydrides in the membrane. The results can be used to determine the diffusion coefficients of hydrogen in various structural materials, in space technology, nuclear power engineering, in products subjected to hydrogenation during operation.*

**Введение.** Известно, что по значениям коэффициента диффузии водорода оценивают скорости поглощения водорода и дегазации металла. Для строго описания диффузии водорода в металлах исследуют закономерности взаимодействия атомов водорода как друг с другом, так и с металлической матрицей. Растворенный атом водорода является точечным дефектом кристаллической структуры, образующийся в результате перехода атома Н из внешней среды в междоузлие кристаллической решетки металла. Такая особенность связана с весьма малым атомным объемом водорода, а также с диссоциацией молекулы водорода (с небольшими энергиями активации) на отдельные атомы как при попадании в металл [1-5], так и на его поверхности. При больших концентрациях водорода образуются гидриды металла [3, 4]. На величину коэффициента диффузии влияют границы зерен, пористость материала, напряжения и динамические нагрузки, возникающие в металле [1, 5].

Целью данной работы является разработка чувствительной методики и прибора для исследования и контроля диффузии водорода в условиях образования гидридов в деталях, подвергаемых водородному поражению.

**Материалы и методы.** Функциональная схема установки приведена на рис. 1. Для насыщения мембраны 1 водородом использована электролитическая ячейка 2, в которую заливают электролит.

Водород, попадающий из электролита в мембрану, диффундирует в горизонтальном направлении. В ячейку заливают электролит – 0.1 М раствор серной кислоты, в который погружены анод 3 и исследуемый образец (мембрана) 1 – катод. В качестве измерителя использован прибор магнитный спектрометр ЗМА-II (производство Германия, Саарбрюккен), который включает вихретоковый датчик 4 и измеритель напряжения 5. На анод и мембрану электролитической ячейки подают постоянное напряжение, обеспечивающее плотность тока в пределах от 0.1 до 1 А/см<sup>2</sup>, от источника тока 6 DC SUPPLY HY 3002. Влияние изменения структуры титановой мембраны при измерении коэффициента диффузии при её насыщении водородом контролируется дифрактометром PDIFF Beamline.

**Экспериментальная часть.** Ниже приведены результаты исследований диффузии водорода через мембрану, изготовленную из листа титанового сплава ВТ1-0. Коэффициенты диффузии определяли тайм-лаг-методом по формуле Бэррера [3]

$$t = h^2 / 6D, \quad (1)$$

где  $t$  – время установления стационарного потока водорода через металлическую мембрану,  $h$  – толщина металлической мембраны,  $D$  – коэффициент диффузии. Глубина проникновения  $\delta$  вихревого тока в металл является функцией электропроводности металла  $\sigma$ , частоты вихревого тока  $\omega$  и магнитной проницаемости металла  $\mu$  [3].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\omega \mu_0 \sigma / 2}} \quad (2)$$

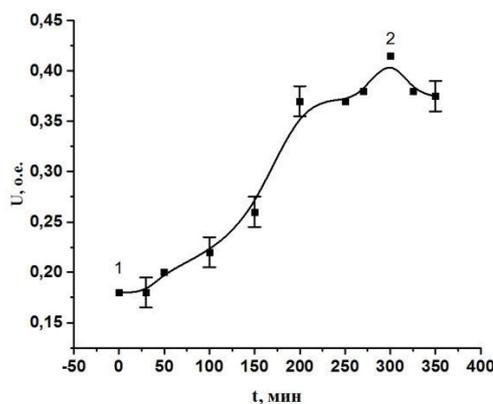
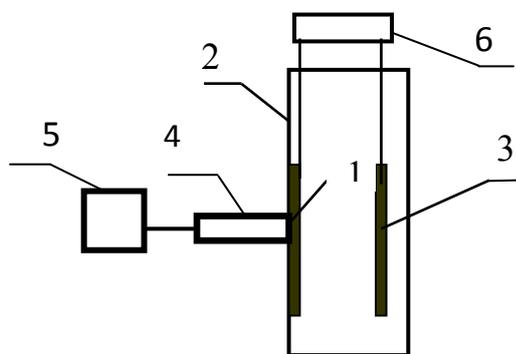


Рис. 1 Схема измерения коэффициента диффузии водорода: 1 - металлическая мембрана, 2 - вихретоковый датчик, 3 - платиновый анод, 4 - измеритель напряжения, 5 - источник постоянного тока, 6 - вихретоковый датчик

Рис. 2. Зависимость напряжения в относительных единицах на вихретоковом датчике от времени электролитической ячейки, насыщения мембраны водородом: цифрами 1 и 2 – вихретоковый датчик, 5 – измеритель напряжения, 6 – источник постоянного тока

Изменение электропроводности металла, насыщаемого водородом или любыми газами [1], приводит к изменению напряжения на вихретоковом датчике магнитного спектрометра. Величина электропроводности зависит от количества атомов водорода, приходящихся на каждый атом титана, от направления распространения токов по образцу-мембране.

Это вызвано появлением дефектов в ходе наводороживания. При диффузии через образец-мембрану появление водорода в его приповерхностном слое будет зафиксировано датчиком, если частота подобрана так, чтобы глубина проникновения вихревого тока в металл соответствовала толщине мембраны. Накопление водорода в мембране в процессе диффузии изменяет сопротивление мембраны. Таким образом, можно зафиксировать время изменения напряжения на вихретоковом датчике магнитного спектрометра связанное с появлением водорода в результате диффузии через мембрану. С этой целью вихретоковый датчик магнитного спектрометра устанавливают на поверхность металлической мембраны, которая является катодом, расположенным совместно с анодом в электролитической ячейке. Измеряют толщину мембраны и по формуле (1) рассчитывают частоту вихретокового датчика и устанавливают ее значение на датчике. Включают датчик и, поворачивая его вдоль вертикальной оси, находят максимальное значение напряжения до насыщения водородом, после чего подают напряжение на ячейку и фиксируют время включения. Как только водород достигает поверхностного слоя с противоположной от ячейки стороны мембраны, прекращается изменение показаний вихретокового датчика. Фиксируют время  $t$ , при котором показания вихретокового датчика магнитного спектрометра, достигают максимума (рис.2) и рассчитывают  $D$ .

**Выводы.** Таким образом, данный метод в полной мере учитывает процессы наводороживания металла, которые сопровождают процесс диффузии. А именно наличие ярко выраженной неоднородности расположения гидридов в титане, образование зерен, их формы, расположения по площади и глубине наводороженного металла. В наводороженном титане образуются гидриды титана  $TiH_n$  с различным количеством атомов водорода, что приводит к изменению коэффициентов диффузии вследствие образования гидридов  $TiH_n$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Взаимодействие водорода с металлами / Под. ред. Захарова А.П. М.: Наука, 1987.
2. Ларионов В.В., Лисичко Е.В., Лидер А.М. Исследование модификации свойств наводороженных металлов вихретоковым методом // Вестник Челябинского государственного педагогического университета. – 2012. – № 6. – С. 268–276.
3. Тюрин Ю. И., Ларионов В. В., Никитенков Н. Н. // ПТЭ. 2016. № 5. С. 147. Yu. I. Tyurin, V. V. Larionov and N. N. Nikitenkov. Instruments and Experimental Techniques, 2016, Vol. 59, No. 5, pp. 772. DOI: 10.7868/S0032816216040273
4. Lider, A.M., Larionov, V.V., Syrtanov, M.S. Hydrogen concentration measurements at titanium layers by means of thermo-EMF 2016 Key Engineering Materials 683, pp. 199-202.
5. Lider, A., Larionov, V., Kroening, M., Kudiiarov, V. Thermo-Electromotive Force and Electrical Resistivity of Hydrogenated VT1-0 Titanium Alloy 2016 IOP Conference Series: Materials 012004.