УДК 536.24

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ИСТОЧНИКА ПОЗИТРОНОВ CU-64 ДЛЯ IN SITU ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.Д. Анжигатова, М.А. Кругляков
Научный руководитель: к.т.н., В.Н. Кудияров
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: eda5@tpu.ru

DEVELOPMENT AND TESTING OF THE CU-64 POSITRON SOURCE FOR IN SITU RESEARCH OF STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

E.D. Anzhigatova, M.A. Kruglyakov
Scientific Supervisor: PhD., V.N. Kudiyarov
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: eda5@tpu.ru

Abstract. *In this paper, the flooded material of the BT1-0 brand is considered using a positron source based on the Cu-64 isotope. The annealing temperature has a strong influence on the formation of various types of defects.*

Введение. Проблема взаимодействия водорода с материалами существует уже долгие годы. Причем проблема распространяется как на исследования материалов накопителей водорода, так и на конструкционные материалы, которые при эксплуатации с ним взаимодействуют [1, 2]. Общей проблемой является развитие водородной хрупкости, что сопровождается выделением стабильных гидридов и развитием водород-индуцированных дефектов [3]. В этом случае водород оказывает сильное влияние на характеристики сорбции водорода. Поэтому необходимо понимание того, как происходит эволюция дефектной структуры. Одним из чувствительных методов исследования дефектной структуры является метод аннигиляции позитронов, который позволяет исследовать структуру в режиме *in situ*. Целью данной работы является создание и аппробация источника позитронов на основе Cu-64.

Экспериментальная часть. Для получения источника позитронов Cu64 была использована медная фольга толщиной 10 мкм и массой 1 мг. Данная фольга была облучена потоком тепловых нейтронов 10^{13} нейтрон/см^2·сек в течение 3 часов. Облучение проводилось в исследовательском ядерном реакторе Томского политехнического университета ИРТ-Т. Активность на момент начала эксперимента составляла ~ 40 МБк. Материалом для аппробации выступал титан марки ВТ1-0.

Результаты. Сбор спектров ДУАЛ производилось в ручном режиме при нагреве и наводораживании. На рис.1 представлены спектры ДУАЛ, на которых показана кинетика изменения импульсного распределения аннигиляции позитронов при нагреве до 550 °С и наводороживании до концентрации 860 ppm. Спектры нормированы на одинаковую площадь.

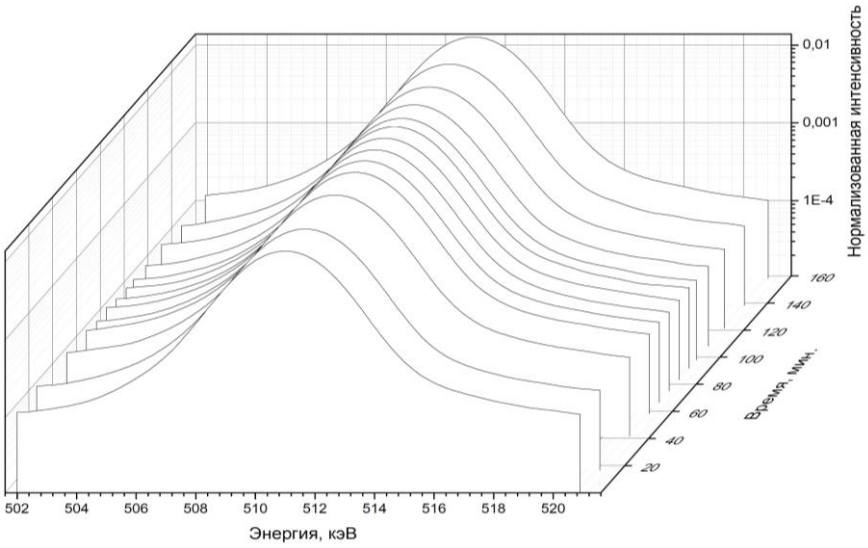

Рис. 1. Кинетика изменения импульсного распределения аннигиляции позитронов при нагреве до 550 °C

На рис.1 можно наблюдать нелинейное изменение импульсного распределения аннигиляции позитронов, это связано с изменением дефектной структуры материала и характеристик системы рис.2. Кинетика изменения S и W параметров ДУАЛ при нагреве и наводороживании титана ВТ1-0 до концентрации 860 ppm с учетом коррекции активности источника представлены на рис.2.

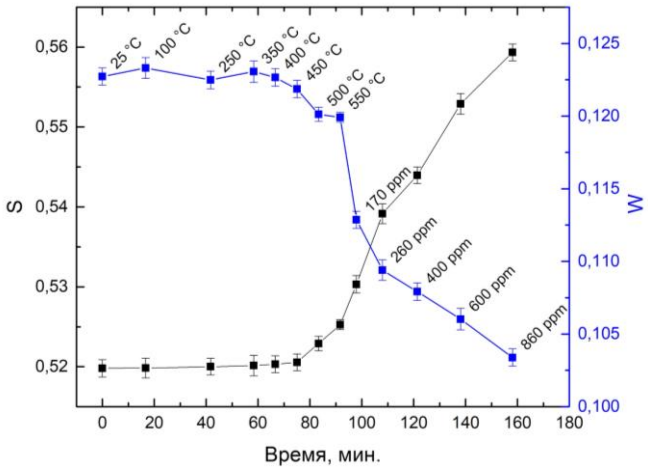

Рис. 2. Кинетика изменения S и W параметров ДУАЛ при нагреве до 550 °C

Как видно из рис.2 при нагреве до температуры 350 °C S и W параметры остаются практически неизменными. В диапазоне от 350 до 550 °C происходит снижение W параметра и при этом S параметр остается постоянным до температуры 450 °C и начинает увеличиваться до 550 °C, что может обуславливаться отжигом остаточных дислокаций и формированием термических вакансий.

Дальнейшее наводороживание осуществлялось при температуре 550 °C. Как видно из рис. 2 накопление водорода сопровождается интенсивным ростом параметра S и снижением W, что свидетельствует об образовании дефектов вакансионного типа.

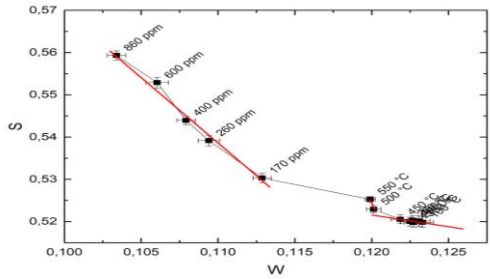

Рис. 3. Графическое представление R-параметра как функции S =f (W)

На рис.3 приведено графическое представление R-параметра как функции *S =f (W)* в титане марки ВТ1-0 при нагреве до 550 °С и наводороживании до концентрации 860 ppm. Анализ графического представления R-параметра как функции *S =f (W)* позволяет выделить три участка: (25÷450) °С, (500÷550) °С, (170÷860) ppm (рис.3). На выделенных участках разный наклон аппроксимирующих прямых, что свидетельствует о различных типах дефектов. Согласно данным ВРАП, дефектами первого диапазона являются дислокации, которые отжигаются до 500°С. Для второго диапазона характерно накопление термических вакансий. Образование вакансий, как и водород-вакансионных комплексов приводит к увеличению S параметра и снижению W [4, 5], однако поскольку угол наклона прямых R-параметра отличается для второго и третьего диапазона, можно заключить, что и превалирующие типы дефектов отличаются. Таким образом, на поглощении водорода титаном ВТ1-0 в диапазоне концентраций (170÷860) ppm формируются водород-вакансионные комплексы.

Заключение. В ходе работы было проведено экспериментальное исследование *in situ* позитронной спектроскопии технически чистого титана марки ВТ1-0 при водородном воздействии. После технологического отжига при температуре 650 °С в материале присутствует лишь один тип дефектов - дислокации, плотность ~ $3 \cdot 10^{12}$ м$^{-2}$. *In situ* анализ импульсного распределения аннигиляции позитронов при нагреве до 350 °С и наводороживании при 860 ppm изменений не наблюдается, увеличение температуры с 350 °С до 550°С сопровождается отжигом остаточных дислокаций и формированием вакансий. При наводороживании ВТ1-0 в диапазоне концентраций (170÷860) ppm приводит к формированию водород-вакансионных комплексов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Наука № FSWW-2023-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson W.H. On Some Remarkable Changes Produced in Iron and Steel by the Action of Hydrogen and Acids: 281 // Nature. Nature Publishing Group. – 1875. – Vol. 11, № 281. – P. 393-393.
2. Jena P. Materials for hydrogen storage: past, present, and future // The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2011. – Vol. 2, №. 3. – P. 206-211.
3. Sculley J., Yuan D., Zhou H.C. The current status of hydrogen storage in metal–organic frameworks—updated // Energy & Environmental Science. – 2011. – Vol. 4, №. 8. –. P. 2721-2735.
4. Laptev R.S. et al. Positron annihilation spectroscopy of defects in commercially pure titanium saturated with hydrogen // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 134-140.
5. Bordulev I. et al. Positron annihilation spectroscopy study of defects in hydrogen loaded Zr-1Nb alloy // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 798. – P. 685-694.