

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АННИГИЛЯЦИИ ПОЗИТРОНОВ В ДИСЛОКАЦИЯХ СПЛАВА Zr1%Nb

Ю.С. БОРДУЛЕВ¹, Р.С. ЛАПТЕВ¹

¹Томский политехнический университет

E-mail: bus@tpu.ru

Сплавы на основе циркония находят применение в современном реакторостроении в качестве конструкционных материалов для различных элементов активных зон ядерных реакторов. Причиной тому являются хорошие прочностные, антикоррозийные и радиационные характеристики. Однако, в ходе эксплуатации данных изделий в условиях коррозионной среды, повышенной температуры и ионизирующего излучения, эти изделия подвержены водородному насыщению, сопровождающемуся деградацией механических свойств и разрушением материала [1]. Данные процессы сопровождаются образованием целой гаммы дефектов разной размерности. При этом, значительную роль в определении механических свойств в циркониевых сплавах играют дислокации. Исследования формирования и развития дислокационных структур в конструкционных материалах в ходе различных процессов являются важным этапом прогнозирования изменений их свойств. Одним из самых чувствительных инструментов для исследования структурных дефектов твердых тел (в том числе и дислокаций) является метод аннигиляции позитронов. Однако, количественные характеристики поведения позитронов в дислокационных дефектах циркония остаются неизученными по сей день. Таким образом, целью данной работы является определение времени жизни позитронов и коэффициента захвата позитронов в дислокациях циркониевого сплава Zr1%Nb.

Образцы исследуемого сплава были отожжены при температуре 857 °С в течение 54 часов. Далее в ряде образцов была сформирована дислокационная структура методом холодной прокатки до различных степеней обжатия (2, 5, 10 %). В качестве методов исследования были использованы спектрометрия времени жизни (ВЖ) позитронов и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ).

При обработке спектров ВЖ позитронов, в первую очередь было оценено среднее ВЖ позитронов, как наиболее робастный параметр, не зависящий от применяемой модели. Далее спектры ВЖ позитронов были разложены на 2 экспоненциальные компоненты с применением стандартной модели захвата. В результате была получена компонента аннигиляции позитрона в дислокациях, ВЖ позитронов в которой составило 217 пс. Зависимость среднего ВЖ, а также значения интенсивности компоненты дислокаций от уровня деформации, представлена на рисунке 1.

Анализируя представленную зависимость, можно заключить, что значение ВЖ, как и интенсивности дислокационной компоненты, резко возрастает при 2% деформации и продолжает расти при 5 %. Это является ожидаемым результатом, т.к., согласно теории методов позитронной аннигиляции, увеличение плотности дефектов путем деформации увеличивает вероятность захвата позитрона дислокацией, тем самым увеличивая среднее ВЖ. Однако, можно заметить, что дальнейшее увеличение значения деформации приводит к снижению как среднего ВЖ позитронов, так и интенсивности компоненты дислокаций. Причиной этому является перестройка образующихся в образцах дислокаций из изотропно-распределенной структуры в ячеистую (т.н. «дислокационные ячейки») структуру. Подобные ячейки характеризуются дислокационно-обогащенными границами и практически бездефектной внутренней областью.

Для применения метода позитронной аннигиляции с целью оценки плотности дефектов, присутствующих в материале, необходимо использовать следующее выражение:

$$C_d = K_d / \mu_d, \quad (1)$$

где C_d – плотность оцениваемого типа дефектов, присутствующего в материале, μ_d – коэффициент захвата позитронов определенным типом дефектов (зависит от материала и

типа дефектов) и K_d – скорость захвата позитронов дефектами этого типа. Последняя величина зависит от типа и концентрации дефектов и определяется экспериментально из спектров ВЖ позитронов.

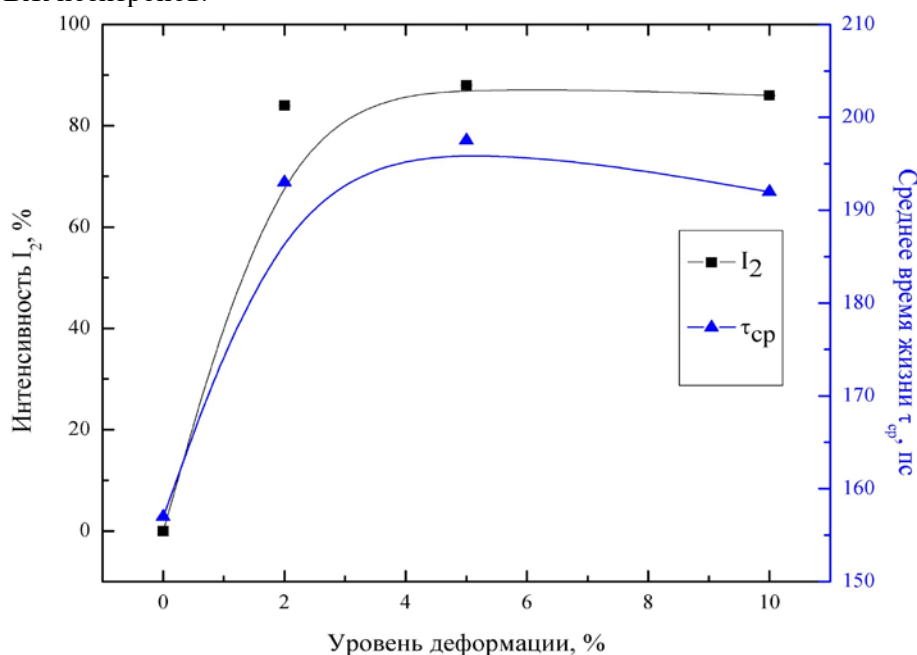


Рисунок 1 - Зависимость среднего ВЖ позитронов и интенсивности компоненты дислокаций от уровня деформации сплава Zr1%Nb

Таким образом, для определения концентрации дефектов методами позитронной аннигиляции необходимо иметь экспериментальный спектр ВЖ, а также значение константы μ_d для данного типа дефектов. В литературных данных отсутствует значение коэффициента захвата позитронов в дислокациях циркония. Для определения данного значения необходимо подготовить образец с известной концентрацией дефектов и экспериментально определить характеристики позитронной аннигиляции в дефекте данного типа (ВЖ и интенсивность дефектной компоненты). При этом, данные характеристики не должны соответствовать ситуации насыщенного захвата позитронов дефектами (интенсивность дефектной составляющей должна быть менее 100 %).

В нашем эксперименте таким материалом является образец циркониевого сплава, прокатанный до 2 % обжатия. Как уже было показано ранее, дислокационная структура данного образца характеризуется изотропным распределением без формирования ячеистой структуры. Плотность дислокаций в данном образце была определена методом секущих из данных ПЭМ и составила $1,04 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Полученное значение было использовано для расчета коэффициента захвата позитронов дислокациями циркония μ_d , которое согласно выражению (1) составило $9,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, в результате проделанной работы были получены количественные значения двух важнейших характеристик позитронной аннигиляции в дислокации циркония: времени жизни позитронов и коэффициента захвата позитронов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2020-0017.

Список литературы

1. Zieliński A., Sobieszczyk S. Hydrogen-enhanced degradation and oxide effects in zirconium alloys for nuclear applications // Int. J. Hydrog. Energy. – 2011. – Т. 36. – № 14. – С. 8619–8629.