

**ПРОВЕРКА ТЕРМИЧЕСКОГО МЕТОДА ИМИТАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В
ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВАХ**

Ю. Му, Ю.С. Бордулев, В.Н. Кудияров

Научный руководитель: Ю.С. Бордулев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: 328745975@qq.com

**EXAMINATION OF THERMAL TECHNIQUE OF RADIATION DEFECTS SIMULATION IN
ZIRCONIUM ALLOYS**

Y. Mu, Yu.S. Bordulev, V.N. Kudiiarov

Scientific Supervisor: Yu.S. Bordulev

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

E-mail: 328745975@qq.com

***Abstract.** This work is aimed to check the applicability of imitation technique for radiation defects formation in Zr1Nb and Zr2.5Nb alloys. This technique is based on long-term temperature treatment. Positron lifetime spectroscopy was implemented as a control technique in this research. It was shown that defects, which were created in the process of imitation in Zr1Nb alloy, are different from classical radiation defects. However, along with dislocations, some amount of vacancies, which are the radiation defects, was detected in Zr2.5Nb after the imitation process.*

Введение. Циркониевые сплавы используются в качестве конструкционных материалов в ядерной энергетике. В процессе ядерной реакции, оболочки ТВЭЛов подвергаются облучению нейтронами и накапливают в себе структурные радиационные дефекты. Радиационное повреждение оболочек ТВЭЛов, вызванное потоком нейтронов является причиной изменений линейных размеров компонентов реактора, радиационного распухания и деформации материала. Данные процессы приводят к снижению срока эксплуатации ТВЭЛов. Таким образом, исследование процессов накопления радиационных дефектов в сплавах циркония является актуальной задачей для продления данного срока оболочек ТВЭЛов. Для того чтобы проводить исследования дефектной структуры материала после облучения, необходимо проводить облучение материалов на реакторе в течение длительного срока. Эти эксперименты требуют больших финансовых и временных затрат. В связи с этим актуальной проблемой также является разработка методов имитации радиационных дефектов. Один из таких методов имитации был разработан на базе ВНИИНМ им. Бочвара. При имитации, исследователи из данного центра ориентируются на механические свойства материала, которые после имитации становятся идентичными механическим свойствам материала после облучения. Однако, на сегодняшний момент не известно о реальном состоянии дефектной структуры материала после подобных воздействий.

Таким образом, целью данной работы является исследование дефектной структуры циркониевого сплава после термической обработки, имитирующей радиационные дефекты.

Для исследования дефектной структуры, в данной работе применялись методы электрон-позитронной аннигиляции. Данные методы являются наиболее чувствительным инструментом для исследования дефектной структуры материалов. Методы электрон-позитронной аннигиляции – это относительно новая технология ядерной физики. Электрон-позитронная аннигиляция (ЭПА) это процесс преобразования между массой и энергией частиц. Методы ЭПА используют излучение позитронной аннигиляции в конденсированной материи чтобы получить информацию о микроструктуре, распределении электронов по импульсам и типам дефектов в материале. Методика позитронов имеет много преимуществ в изучении вещества. Она обеспечивает неразрушающий метод, потому что информация передается из материала, через аннигиляционное излучение. Нет необходимости в специальной подготовке образцов. Самым главным преимуществом методов ЭПА является их высокая чувствительность к изменениям дефектной структуры материалов [1].

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи: 1) подготовить образцы Zr1Nb и Zr2.5Nb; 2) провести имитацию радиационных дефектов; 3) провести исследования методами позитронной аннигиляции; 4) проанализировать спектры позитронной аннигиляции.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования в данном эксперименте были выбраны сплавы циркония Э110 (Zr1Nb) и Э125 (Zr2,5Nb). Данные сплавы используются в качестве конструкционных материалов в российских ядерных реакторах типа ВВЭР. Образцы были вырезаны из листа в состоянии поставки при помощи электроискровой резки. После этого поверхность образцов была отшлифована.

Метод имитации заключался в отжиге образцов при температуре 400 °С в течение 24 часов. Данные образцы в дальнейшем будут именоваться как «имитационные». По результатам данного отжига, полученным в ВНИИНМ им. Бочвара, микротвердость образцов после облучения соответствует значению микротвердости образцов после испытаний на реакторе. Несколько образцов были подвержены технологическому отжигу при температуре 580 °С в течение 3 часа. Данные образцы далее будут именоваться как «исходные». Также несколько образцов были подвержены отжигу при температуре 847 °С в течение 54 часов. Данные образцы являются условно бездефектными и далее будут именоваться как «бездефектные» [2].

В качестве метода исследования дефектной структуры материала, в данной работе был применен метод спектрометрии по времени жизни позитронов (СВЖП) [1].

Результаты и обсуждение. Среднее время жизни позитронов в бездефектном образце циркония Э110 составило 163 пс что хорошо согласуется с литературными данными [2]. Это значение говорит о том, что данный образец можно считать бездефектным. Среднее время жизни в исходном образце циркония Э110 и Э125 составило 175 и 184 пс, что говорит о том, что в данном образце имеются структурные дефекты (наличие дефектов увеличивает время жизни позитронов в материале). Имитационный отжиг приводит к увеличению среднего времени жизни в обоих сплавах до значений 188 и 236 пс для сплавов Э110 и Э125, соответственно. Это говорит о том, что имитационный отжиг действительно индуцирует формирование дефектов в обоих сплавах.

Для получения более детальной информации о дефектной структуре, в данной работе был применен метод много-компонентного разложения спектров. В процессе данного разложения, были зафиксированы значения времени жизни позитрона в бездефектном цирконии (163 пс) [2], в дислокационной петле

циркония (215 пс) [3] и вакансии циркония (252 пс) [4]. Интенсивность компоненты вакансии в спектрах Zr1Nb (исходный), Zr1Nb (имитационный) и Zr2,5Nb (исходный) примерно равна нулю. Основными типами дефектов в Zr1Nb (исходный), Zr1Nb (имитационный) и Zr2,5Nb (исходный) являются дислокации (40, 60 и 53 %, соответственно). В образце Zr2,5Nb (имитационный) интенсивность вакансионной компоненты составила 59 %, в то время как интенсивность дислокаций составила 41 %.

Заключение. В ходе проделанной работы было изучено влияние температурного отжига, как имитационного метода создания радиационных дефектов, на дефектную структуру сплавов циркония Э110 и Э125. После имитационного отжига сплава Э110 (Zr1Nb) в спектре имеются только дислокации. Согласно литературным данным [5], - радиационными дефектами являются вакансии и междоузельные атомы, а также кластеры. После имитационного отжига сплава Э125 (Zr2,5Nb) в спектре имеется как вакансии, так и дислокации. Таким образом, можно сделать вывод, что метод имитационного отжига является успешным для сплава Э125.

Помимо этого, было показано, что для исходного сплава Э110 (Zr1Nb) и сплава Э125 (Zr2,5Nb) технологический отжиг не удаляет все дефекты, поэтому данный метод отжига не является оптимальным для удаления дефектов. Возможно, хорошим решением будет продлить время отжига исходного сплава Э125 (Zr2,5Nb) или увеличить температуру отжига.

В образце Zr1Nb (имитационный) имеются только дислокации. Это говорит о том, что либо в образце не было вакансий, либо вакансии в образце диффундировали и сформировали дислокации в процессе имитационного отжига. Т.к. в Zr2,5Nb (имитационный) имеются вакансии, то я склоняюсь утверждать, что в сплаве Э110 (имитационный) вакансии также имелись в процессе имитации. В этом случае можно предположить, что наличие большего количества ниобия в сплаве Э125 закрепляет движение дефектов (как дислокаций, так и вакансий) при термической обработке. Это объясняет наличие дислокаций и вакансий в исходном и имитационном образце, соответственно. Таким образом, можно сделать предположение о том, что длительный отжиг циркониевых сплавов Э110 и Э125 при температуре 400 °С приводит к формированию вакансий, которые в дальнейшем также коагулируют в дислокации, что в принципе может происходить во время облучения данных материалов нейтронами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордулев Ю. С., Лаптев Р. С. Спектрометр времени жизни позитронов [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15-19 Апреля 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 1 - С. 131-132. - Режим доступа: <http://portal.tpu.ru:7777/science/konf/ctt/proceedings/2013>.
2. Hood G. M., Eldrup M., Pedersen N. J., Positron Annihilation 5, ed.: Hasiguti R. R., Fujiwara K. - Japan Institute of Metals, Sendai, 1979. – 751 p.
3. Hatakeyama M., Toyama T., Yang J., Nagai Y., Hasegawa M., Ohkubo T., Eldrup M. and Singh B. N. Journal of Nuclear Materials // - J NUCL MATER, 2009, vol. 386, 852-855p.
4. Hood G. M. and McKee B. T. A. 1978 J. Phys. F: Met. Phys. 8 1457-65.
5. Углов В. В. Радиационные эффекты в твердых телах // - Минск : БГУ, 2011. -207с.