

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В СРЕДЕ ВОДОРОДА

А.Ж. Минязов, А.А. Ситников, М.К. Скаков, И.Л. Тажибаева, В.И. Яковлев

Исследования посвящены изучению поведения вольфрама (плазмообращенный материал в термоядерном реакторе) при нейтронном облучении в среде водорода. Проведено длительное нейтронное облучение образцов вольфрама (99,99%) в исследовательском атомном реакторе ВВР-К и изучено влияние реакторного облучения на изменение микроструктуры вольфрама. Показано влияние синергетического воздействия нейтронного облучения и водорода на микроструктуру вольфрама в процессе длительного реакторного облучения в течение 3255 часов. Результаты имитационных экспериментов по влиянию реакторного облучения на характеристики взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами термоядерного реактора (ТЯР) позволят установить корреляцию и синергетические эффекты между воздействием реакторов деления и синтеза на материалы ТЯР.

Ключевые слова: ИТЭР, термоядерная энергетика, плазмообращенный вольфрам, нейтронное облучение, водород, СЭМ, микроструктура, дефекты структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, одной из важных задач по реализации проекта ИТЭР является выбор конструкционных материалов с наиболее подходящими характеристиками, обеспечивающими безопасную эксплуатацию ТЯР. Благодаря ряду уникальных качеств, как высокая температура плавления и теплопроводность, высокая пороговая энергия физического распыления, вольфрам (W) на сегодняшний день является наиболее перспективным материалом в роли контактирующих с плазмой конструкционных элементов, работающих в условиях сильных радиационных воздействий и высоких тепловых нагрузок в ядерных установках [1]. Вольфрам планируется использовать в местах (баффл и плазмообращенные элементы дивертора ИТЭР), подверженных высоким тепловым нагрузкам при нормальных условиях работы реактора, а также при срывах плазмы, что может приводить к эрозии поверхности элементов конструкции, обращенных к плазме.

В процессе горения термоядерной плазмы вольфрам будет облучаться интенсивными потоками дейтерия и трития, а также ионами гелия энергией 3,5 МэВ и нейтронами энергией 14,1 МэВ, возникающими в результате D—T-термоядерной реакции.

Основные требования к обращенным к плазме материалам и компонентам установки сводятся к следующему:

- длительное время жизни;

- малое накопление топливного трития (≤ 700 г), что связано как с безопасностью, так и с нежелательностью потерь дорогого топлива;

- стойкость к нейтронному облучению.

Современный обзор работ по свойствам, технологии изготовления и возможности использования вольфрама в качестве материала, контактирующего с плазмой, приведен в работе [2]. Серьезную озабоченность относительно известных на сегодняшний день сортов промышленно изготавливаемого вольфрама вызывает его устойчивость и сопротивление к термическим нагрузкам в реакторе – токамаке, особенно в присутствии нейтронного и других типов излучения [3]. В этом случае, может произойти разрушение материала и повышенная эрозия поверхности, что приведет к поступлению вольфрама в центральные зоны разряда и ухудшению удержания плазмы. В условиях эксплуатации, эрозия вольфрама обуславливается его распылением, энергетический порог которого для H, D, T равен 447, 209, 136 эВ, соответственно. Возрастающий интерес к проблеме эрозии вольфрама подтверждается резким увеличением публикаций в мире по данной проблематике [1]. Изучение таких изменений в структуре вольфрама, как эрозия, блистеринг, пузыри являются предметом большинства современных работ в области исследований плазмообращенных материалов в ТЯР.

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В СРЕДЕ ВОДОРОДА

Вместе с тем, одним из важных вопросов применения вольфрама, как материала ТЯР, обращенного к плазме, является недостаток экспериментальных результатов о нейтронных повреждениях при высоких флюенсах, особенно в среде изотопов водорода.

Целью настоящей работы является изучение влияния длительного нейтронного облучения в атмосфере водорода на микроструктуру вольфрама, конструкционного, плазмо-обращенного материала в ТЯР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе, была реализована задача по изучению влияния длительного нейтронного облучения на структуру вольфрама. На исследовательском атомном реакторе ВВР-К (Институт ядерной физики, г. Алматы) был проведен эксперимент с образцами вольфрама в среде водорода и гелия.

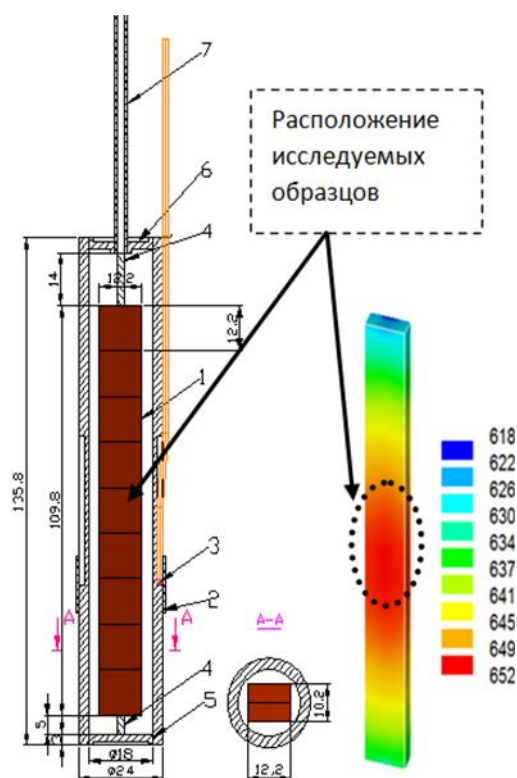


Рисунок 1- Схема ампульного устройства с образцами (1 – образцы вольфрама, 2 - ампула, 3 – термопара, 4 - фиксатор, 5 – донная часть, 6 - крышка, 7 – стержень) и расчет распределения температуры в капсуле с водородом во время облучения

Образцы изготовлены из поликристаллического вольфрама с чистотой 99,99%, с минимальной анизотропией зерен, с полированной поверхностью, которые были поставлены Юлихским исследовательским центром, Германия. Геометрические размеры образцов 12×12×5 мм.

Специально разработанная герметичная капсула (рис. 1), для облучения образцов вольфрама, конструктивно состоит из внешнего корпуса капсулы, в которую помещены вольфрамовые образцы. Капсула наполнена газом водорода с давлением 30 кПа при температуре 20 °C. Капсула в составе ампульного устройства во время облучения была расположена в корпусе периферийного водяного канала реактора ВВР-К, и во время облучения омывалось водой при температуре около 40 °C. На рисунке 1 представлены расчетные данные распределения температуры в капсуле во время облучения, рассчитанный с помощью кода ANSYS. В данной работе были исследованы образцы вольфрама из участка максимального температурного градиента в капсуле, в интервале температур 649-652 °C.

Исследования микроструктуры облученных в среде водорода образцов вольфрама проводили методом сканирующей электронной микроскопии в режиме высокого вакуума с ускоряющим напряжением электронного пучка не более 20 кВ. Элементный анализ выполнен методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью приставки ЭДС-анализа сканирующего электронного микроскопа. Все исследования были проведены в Институте атомной энергии РГП НЯЦ РК (г. Курчатов, Казахстан).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам микроструктурных исследований образцов вольфрама обнаружена эрозия поверхности в виде вытравленных зерен и микропор (рис. 2). В частности, в образце вольфрама, облученного при температуре 652 °C в среде водорода размер крупных пор, составляет 1-3 мкм. Обнаружено, что в исследуемых образцах микроструктура зерен имеет различный характер изменений и имеет связь с их кристаллографической ориентацией. Если в одних зернах наблюдается значительная эрозия, то в других установлено образование микропор с неравномерным распределением, являющиеся следами образования блистеров (рис. 3).

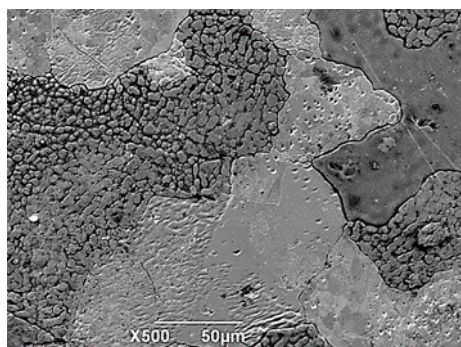


Рисунок 2 - Характерная микроструктура поверхности образца вольфрама, облученного в среде водорода при 652 °С

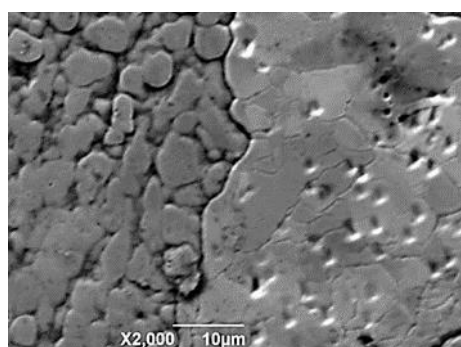


Рисунок 3 - Разные типы разрушения (эрозия, поры) на различных зернах в структуре вольфрама, облученного в водороде при 652 °С

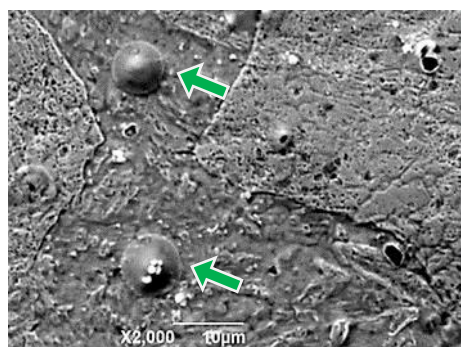


Рисунок 4 - Образование блистеров в вольфраме, облученного в среде водорода при 649 °С

В работе [4], где экспериментальные исследования с таким же поликристаллическим вольфрамом (99,99%), но при воздействии ионами дейтерия, показала зависимость структурных изменений от ориентации зерен, т.е. некоторые зерна почти не имеют блистеров, в то время как остальные равномерно покрыты ими. В ряде работ

были показаны подобные результаты, этот эффект связывается с тем, что различные кристаллографические плоскости обладают различной стойкостью к эрозии [5,6]. Установление зависимости изменения микроструктуры зерен от их кристаллографической ориентации требует проведения дальнейших рентгеноструктурных исследований.

В микроструктуре поверхности образца вольфрама после облучения в среде водорода в температурной зоне 649 °С обнаружены редкие блистеры, с диаметром не более 10 мкм (рис. 4). Это агломерация водорода в полостях под поверхностью, вызванная высоким давлением, убиравшим часть вольфрама (в общем случае только одно зерно или его часть) которое выглядит сверху как пузырьки. В работе [7] показано, что при плазменном облучении при близких температурах ($T < 900$ К) и флюенсе $> 10^{23}$ He(H)/м² в вольфраме образуются гелиевые и водородные блистеры.

В образце облученной при температуре 649 °С обнаружены следы оплавления поверхности в виде каплеобразований (рис. 5). Это является характерным явлением при облучении вольфрама ионами водорода [8,9], как правило в интервале температур 200÷650 °С, но при воздействии реакторного облучения ранее не наблюдалось.

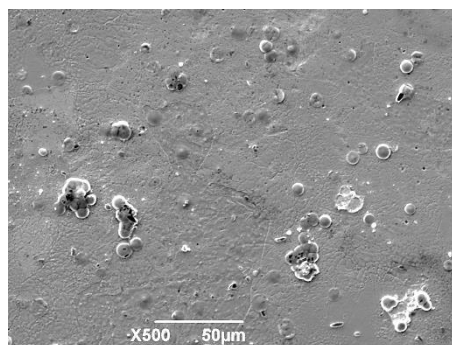


Рисунок 5 - Микроструктура поверхности образца вольфрама, облученного в среде водорода, при 649 °С

При изучении эрозии вольфрама необходимо учитывать влияние неизбежных собственных примесей (He, Be, C, O), которые могут внести существенный вклад в этот процесс [3].

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В СРЕДЕ ВОДОРОДА

Для качественной и количественной оценки элементов на поверхности образцов вольфрама был проведен элементный анализ. На рисунке 6 показаны характеристические спектры обнаруженных элементов. В результате элементного анализа поверхности исследуемых образцов вольфрама обнаружено наличие углерода и кислорода, общее количество этих элементов в среднем не превышает 2,5 масс. %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам микроструктурных исследований обнаружено, что поверхность вольфрама эродирует при длительном облучении в среде водорода. При этом происходит изменение ее рельефа и заметное различие микроструктуры по отдельным зернам, появляются выступы и террасы.

Микроструктурные исследования показали, что облучение в среде водорода привело к образованию блистеров и микропор (1-3 мкм), что не наблюдалось ранее при реакторном облучении в водородной среде. Зерна структурно отличаются как с гладкой поверхностью, так и с рельефной структурой. Изменения микроструктуры зерен имеют отличия между собой, что связано кристаллографической ориентацией зерен. Обнаружены следы оплавления поверхности, в том числе в виде каплеобразований. Элементный анализ исследуемой поверхности показал наличие легких элементов, массовая доля которых не превышает 2,5 %.

Экспериментальная часть работы по облучению вольфрама в реакторных условиях выполнена в рамках Международного исследовательского проекта МАГАТЭ, основной целью которого является применение объединяющего потенциала существующих плазменных установок, ускорителей, токамаков, циклотронов, электронно-лучевых установок и ядерных реакторов стран-участников, чтобы внести свой вклад для пополнения знаний о поведении кандидатных плазмо-обращенных материалов ТЯР, как следующий шаг в развитии термоядерных устройств. Основной задачей данной работы является "Исследование изменений структуры и свойств вольфрама, облученного нейтронами, альфа-частицами и тяжелыми ионами в диапазоне температур до 600 °С, чтобы предсказать его поведение в условиях эксплуатации термоядерных реакторов".

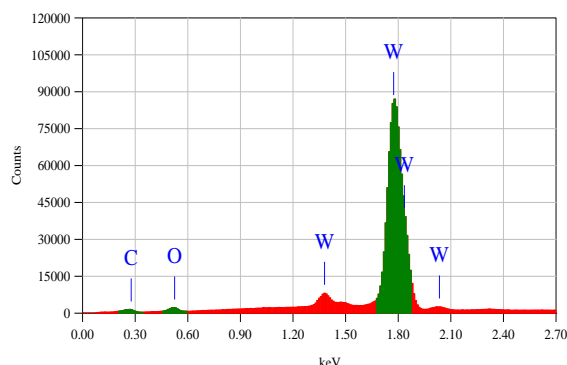


Рисунок 6 - Характеристический спектр ЭДС-анализа поверхности образца вольфрама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривченко О.В., Ю.П. Курило, Шепелев А.Г. Оптимальный материал для термоядерной энергетики будущего. ВАНТ. Серия Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (19), с. 62-70. №6, 2011.
2. Будаев В.П. Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба / В.П. Будаев; ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, т. 38, вып. 4. с. 5-33. 2015.
3. Nygren R., Raffray R., Whyte D. and all. "Making tungsten work. Overview of ICFRM-14 session Plasma facing materials", J.Nuclear Materials, v.417, issues 1-3, p.451-456, and 2011.
4. Беляева А.И., Галуза А.А., Савченко А.А., Слатин К.А. Модификация оптических свойств W при изменении морфологии поверхности вследствие бомбардировки ионами дейтерия. Известия РАН. Серия физическая, 2011, том 75, № 5, с. 763-766.
5. Канащенко С.Л., Шарапов В.М. Исследование структуры поли- и монокристаллов вольфрама после облучения дейтериевой плазмой с допороговыми энергиями ионов методом просвечивающей электронной микроскопии. Материаловедение, №3, с. 17-25. 2007.
6. Madey T.E. et al. Surface science. vol. 438, p. 191. 1999.
7. Колбасов Б.Н. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, вып. 4, с. 48—69, 2010.
8. Wirtz M., Linke J., Pintsuk G., Rapp J., Wright G.M. "Influence of high flux hydrogen plasma exposure on the thermal shock induced crack formation in tungsten". Journal of Nuclear Materials 420 (1-3), pp. 218
9. Шарапов В.М., Канащенко, С.Л. Структурные нарушения в вольфраме после взаимодействия с низкоэнергетичной гелиевой плазмой с допороговыми энергиями ионов. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. Вып. 2, с. 20-25. 2008.
10. Wirtz O.M. Thermal Shock Behavior of Different

Tungsten Grades under Varying Conditions. Julich, Germany. ISBN: 978-3-89336-842-6 (2013), XIV, 130 pp.

Ситников А.А. – д.т.н., профессор, проф. кафедры «Наземные транспортно-технологические системы» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, sitalan@mail.ru

Скаков М.К. – д.ф.-м.н., профессор, заместитель генерального директора по науке (руководство «Институтом атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан), skakovmk@mail.ru

Тажобаева И.Л. - д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора Института атомной энергии, филиала РГП Национального ядерного центра Республики Казахстан, tazhibayeva@ntsc.kz

Яковлев И.В. – к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, anicpt@rambler.ru

Миниязов А.Ж. – научный сотрудник Института атомной энергии, филиала РГП Национального ядерного центра Республики Казахстан, artanminiyazov@gmail.com