

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности «6D071000 – материаловедение и технология новых
материалов»

АЛДАБЕРГЕНОВА ТАМАРА МУСТАФАЕВНА

**Исследование деградации структуры и физико-механических свойств
графита и вольфрама под воздействием облучения потоками плазмы и
заряженных частиц**

Общая характеристика работы.

В диссертационной работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния импульсного выделения энергии и ионного облучения на структуру поверхности и физико-механические свойства высокочистого вольфрама двойной горячей штамповки и реакторного графита.

Актуальность исследований. Осуществление управляемой термоядерной реакции - один из перспективных путей решения энергетических проблем мирового сообщества. Наилучшие параметры плазмы получены на исследовательских термоядерных установках с тороидальным удержанием плазмы, т.е. токамаках. Поэтому в настоящее время основные усилия физиков ядерщиков и материаловедов сконцентрированы на дальнейшем развитии и совершенствовании этих установок, на основе которых разрабатываются проекты энергетических ТЯР. Среди проблем создания ТЯР, к которым относятся охлаждение первой стенки, систем удержания плазменного шнура сверхпроводящими магнитами, наработка трития и др., не меньшую роль играют материаловедческие проблемы. Это задачи защиты первой стенки и материалов диверторных устройств, как одного из наиболее энергонапряженных узлов ТЯР, от потоков энергии и заряженных частиц. Вопросы создания, выбора конструкционных материалов для ТЯР являются составной частью проблемы радиационной стойкости материалов для любых ядерных установок, но в тоже время имеют и свои особенности. Так, в ТЯР материалы подвержены действию не только нейтронного облучения и контакта с теплоносителем, но и синергическому воздействию нейтронного и ионного облучения, существенно усиливающему радиационные эффекты, а также выделение энергии на поверхности камеры при срыве плазмы. Одним из решений, реализуемых в токамаках, является облицовка камеры, т.е. первой стенки ТЯР, специальными материалами защиты, принимающими на себя основные термические нагрузки и предохраняющие первую стенку от этих воздействий. Роль этих материалов состоит в том, что они должны обеспечить работоспособность первой стенки в течение длительного периода эксплуатации и, в идеале, в течение всего «периода жизни» ТЯР.

Еще более жесткие требования предъявляются к диверторным пластинам. На пластины дивертора приходятся основные тепловые и радиационные нагрузки, поскольку их задачей является «очистка» плазмы от продуктов термоядерной реакции. Поэтому на пластины дивертора воздействуют не только потоки энергии при нештатных ситуациях типа срывов плазмы, но потоки энергии, заряженных и нейтральных частиц при штатной работе токамака. Задача выбора материала для пластин дивертора на сегодняшний день стоит особенно остро. К настоящему времени сформулирован целый ряд требований к материалам защиты первой стенки и диверторных устройств. Основные требования следующие: низкий коэффициент распыления поверхности, высокий коэффициент теплопроводности, низкая химическая активность, высокая температура плавления, высокая прочность при высоких температурах, высокая пластичность и трещиностойкость, высокая поверхностная радиационная стойкость по отношению к процессам эрозии (распыление и шелушение).

В качестве материалов для изготовления дивертора, рассматривался ряд материалов – молибден, графит, жидкокристаллические материалы, но наиболее приоритетным в настоящее время считается вольфрам. Вольфрам рассматривается как перспективный материал пластин дивертора ТЯР благодаря таким своим свойствам как высокие температура плавления и теплопроводность, низкий коэффициент распыления поверхности и другие характеристики. Марки вольфрама различаются способом изготовления, наличием примесей и легирующих добавок вследствие чего имеют различные физико-механические свойства. В частности, особо чистый вольфрам вакуумной выплавки отвечает необходимым требованиям и рассматривается в качестве материала облицовки дивертора реактора ИТЭР. Основываясь на этих требованиях основное внимание в диссертационной работы сосредоточено на исследованиях особо чистого вольфрама, как наиболее перспективного материала дивертора ТЯР.

Целью диссертационной работы являются комплексные исследования воздействие импульсных потоков энергии и ионного облучения на структуру и физико-механические свойства высокочистого вольфрама марки DFW - перспективного материала защиты пластин дивертора и первой стенки термоядерных реакторов с тороидальным удержанием плазмы. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи.

Основные задачи исследований:

- Адаптировать и разработать методики исследования эффектов распыления поверхности и деградации свойств вольфрама при ионном облучении.
- Исследовать эффекты распыления вольфрама DFW и графита при ионном облучении.
- Исследовать эффекты эрозии поверхности (измерить потери массы при локальном плавлении) и изменение механических свойств вольфрама DFW и графита при импульсном выделении энергии (импульсное электронное облучение, импульсное плазменное облучение).

- Исследовать накопление гелия и водорода и эффекты деградации структуры поверхности (блистеринг, флекинг) в вольфраме DFW облученном альфа-частицами и протонами.
- Разработать теоретические модели для оценок эффектов эрозии поверхности (потери массы при локальном плавлении) при импульсном выделении энергии.

Объектами исследований являются:

Особо чистый вольфрам марки DFW, полученный методом горячей штамповки (double forget high purity tungsten fabricated by firm Plansee AG), как один из перспективных материалов защиты пластин дивертора токамаков;

Графит марки АРВ, являющийся конструкционным материалом ядерной техники.

Предметами исследования являются:

Структура поверхности и механические свойства вольфрама, облученного назкоэнергетическими альфа-частицами, коэффициенты распыления поверхности вольфрама и графита, потери веса вольфрама и графита, облученного импульсными потоками электронов и плазмы.

Методы исследования:

- Оптическая микроскопия - для исследования морфологии поверхности;
- Растровая электронная микроскопия – для исследования «тонкой» структуры поверхности;
- Атомно-силовая микроскопия - для исследования структуры и шероховатости поверхности;
- Термодесорбционная спектроскопия – для определения накопления имплантированного гелия в облученных альфа-частицами образцах;
- Измерение микро- и нанотвердости,
- Резерфордское обратное рассеяние – для измерения толщины распыленного слоя при ионном облучении.

Научная новизна результатов диссертационного исследования

В диссертационной работе приведены результаты комплексных исследования воздействия ионами гелия и водорода и импульсного выделения энергии на структуру и свойства вольфрама DFW и графита.

- Впервые экспериментально измерена зависимость коэффициента распыления вольфрама от флюенса облучения ионами аргона. Показано, что с ростом флюенса ионов коэффициент распыления увеличивается.

- Впервые экспериментально измерены потери массы вольфрама DFW при облучении мощным импульсным электронным пучком. Показано, что потери массы вольфрамом \sim в два раза меньше по сравнению с потерями массы молибденом, при тех же условиях облучения.

- Разработана теоретическая модель для оценок потери массы при импульсном выделении энергии на поверхности. Новизна модели состоит в учете фазового превращения, т.е. плавления и испарения, а также теплового излучения с облучаемой поверхностью. Рассчитанные потери массы DFW

вольфрама, молибдена и графита, облученных импульсными электронами, согласуются с экспериментальными результатами.

- Экспериментально изучено формирование блистеров и шелушение поверхности DFW вольфрама, облученного низкоэнергетическими альфа-частицами до высоких флюенсов. Показано, что при флюенсе облучения $1.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ на поверхности формируются блистеры, т.е. наблюдается выход наполненных гелием пор на поверхность, часть из которых раскрыта, т.е. кроме наблюдается шелушение поверхности.

- На основе результатов исследований кинетики десорбции гелия из облученного низкоэнергетическими альфа-частицами DFW вольфрама впервые определены формы нахождения гелия и установлена связь эволюции блистеров и прочностных свойств вольфрама.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально установлено, что с повышением флюенса ионов аргона с энергией 100 кэВ от $5 \cdot 10^{+17} \text{ см}^{-2}$ до $1 \cdot 10^{+18} \text{ см}^{-2}$ коэффициент распыления вольфрама возрастает на 20%. Два фактора являются причиной роста коэффициента распыления с флюенсом облучения. Первое – уменьшение энергии связи атомов с поверхностью кристалла, за счет увеличения разорванных связей с ростом флюенса. Второе - увеличение радиационных повреждений в области пробега бомбардирующих ионов. Радиационные дефекты снижают вероятность каналирования падающих ионов и способствуют локализации каскадов атом-атомных соударений в приповерхностной области.

2. Экспериментально измеренные потери массы при облучении вольфрама DFW импульсным электронным пучком длительностью $2 \times 10^{-6} \text{ с}$ потоком энергии $J = 4 \times 10^{11} \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$ приводит к потерям массы 1.6 мг на площади облучаемой поверхности 2 см^2 . Величина потери массы определяется теплопроводностью облучаемого вольфрама и энергией сублимации, которые определяют количество испарившихся атомов из расплавленной области. Расчет потери массы по модифицированной теоретической модели, учитывающей тепловое излучение и фазовые превращения, т.е. образование жидкой фазы, согласуется с экспериментально измеренными потерями массы.

3. Установлено, что в наполненных гелием порах, облученного альфа-частицами с энергией 45 кэВ до флюенса $1.5 \cdot 10^{+18} \text{ см}^{-2}$ вольфрама, в приповерхностной слое $\sim 100 \text{ нм}$ содержится $\sim 25\text{-}30\%$ имплантированного гелия, сосредоточенного в блистерах. Основная часть имплантированного гелия содержится в гелий-вакансионных комплексах, стабильных до высоких температур ($> 1100 \text{ }^\circ\text{C}$), сформировавшихся как в области пробега альфа-частиц, так и за пробегом. Гелий-вакансионные кластеры в области за пробежной области приводят к упрочнению при температурах отжига до $1100 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Экспериментально измеренные потери массы при облучении графита импульсном плазменном пучком составляют 4 мг при 13 импульсах длительностью 2 мкс с энерговыделением 10 Дж/см^2 при площади облучения графита 2 см^2 . Расчет потери массы по модифицированной теоретической модели согласуется с экспериментально измеренными потерями массы.

Связь темы диссертационной работы с планами научно-исследовательских программ.

Диссертационная работа выполнялась в рамках подпрограммы 105 «Прикладные научные исследования технологического характера в сфере атомной энергетики» по мероприятию «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» Министерства энергетики Республики Казахстан по теме: «Исследования воздействия облучения заряженными частицами и плазмы на тепловую эрозию поверхности, накопление газовых примесей и изменение механических свойств перспективных материалов защиты первой стенки установки ТЯР» в 2015 – 2017 Госрегистрация №0115PK02433 и в 2018 г Госрегистрация №0118PK01184.

Личный вклад автора

Личный вклад автора диссертационной работы, Алдабергеновой Т.М., состоит в участии в постановке задач диссертационной работы, проведении экспериментальных исследований, разработке в соавторстве с сотрудниками лаборатории прикладного и теоретического материаловедения модели эрозии, обсуждении результатов работ и подготовке публикаций.

Научная и практическая ценность работы

Результаты выполненных исследований имеют существенную научную и практическую ценность:

- Полученные в работе результаты комплексных исследований деградации структуры и физико-механических свойств вольфрама DFW под воздействием облучения потоками плазмы, импульсного выделения энергии и заряженных частиц являются основой для рекомендаций по использованию вольфрама DFW в качестве материала диверторных устройств реактора ИТЕР и энергетических ТЯР.

- Теоретическая модель для расчетов потерь массы и степени деградации свойств материалов под действием облучения потоками плазмы и заряженных частиц позволяет существенно ограничить круг материалов перспективных для защиты первой стенки и изготовления диверторных устройств. Модель также применима для прогнозирования свойств поверхности при обработке материалов импульсными потоками энергии для повышения их эксплуатационных свойств.

- Разработанная методика экспериментального измерения коэффициента распыления металлических материалов, основанная на определении толщины распыленного слоя методом Резерфордского обратного рассеяния применима для широкого круга материалов, в том числе композитных многокомпонентных материалов.

- Разработанные экспериментальные методики будут способствовать эффективному решению материаловедческих задач с использованием Казахстанского реактора КТМ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается тем, что исследования проводились с корректным использованием зарекомендованных экспериментальных методов и методик с применением современного оборудования. Корректность результатов, полученных с помощью разработанной теоретической модели, доказывается сравнением с экспериментальными результатами, полученными для различных материалов. Обоснованность выводов заключается в согласии с фундаментальными положениями физики твердого тела и радиационного материаловедения. Результаты и выводы диссертационной работы широко обсуждались на международных и региональных конференциях и семинарах, а также опубликованы в международных рецензируемых журналах.

Апробация диссертационной работы

Материалы диссертационной работы представлялись и докладывались:

- Результаты исследований доложены на следующих международных конференциях:

- на 21- Международной научной конференции «Sumposium on Heavy ion fusion» (Астана, Қазақстан, 18-22 июнь 2016г),

- «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» Международной научной конференции (г. Томск, Россия, 19-23 Сентябрь 2016г)

- «Международной научной конференции студентов и молодых ученых, «Фараби әлемі» (Алматы, Қазақстан, 9-12 апрель, 2018)

- на IV- Международной научной конференции студентов и молодых ученых, «Фараби әлемі» (г. Алматы, Қазақстан, 10-13 Апрель, 2017)

- на XI- Международной научной конференции «Ядерная и радиационная физика, Ядерная наука и ее применение» (Алматы, Қазақстан, 12-15 Сентябрь, 2017)

- «XII – International Conference ION Implantation and other applications of ions and electrons » (Kazimierz Dolny, Poland, June 18-21, 2018)

- на XIV Международной научной конференции – «Физика твердого тела, функциональные материалы и новые технологии» (г. Бишкек, Қырғыстан, 1-5 август, 2018 ж.)

Публикации

По теме диссертации опубликованы 15 научных работах, 8 из которых опубликованы в трудах международных конференций, 4 статьи в изданиях, рекомендованных ККСОН для диссертаций на степень доктора PhD, две статьи индексируемые в базе данных Web of Science и одна статья с импакт-фактором по базе данных Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 102 страницах печатного текста, содержит 66 рисунка, 14 таблиц и список использованных источников из 106 наименований.

В первой главе приведен литературный анализ работ посвященных основным факторам, лимитирующим использование материалов в качестве защиты от ионизирующих излучений и потоков энергии. В завершении главы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведены основные методики, используемые в диссертационной работе. Основное внимание уделено оригинальным методикам определения коэффициента распыления поверхности и измерения твердости материала по глубине.

В третьей главе представлены экспериментальные и расчетные результаты комплексных исследований структуры и свойств вольфрама DFW и графита под действием импульсных потоков энергии и заряженных частиц.