

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Черепанова Дмитрия Евгеньевича

«Экспериментальные методы исследования повреждения термическими ударами материалов первой стенки термоядерных реакторов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность работы:

В промышленном термоядерном реакторе стенка вакуумной камеры будет подвергаться воздействию мощных плазменно-тепловых потоков, что может повлечь интенсивную эрозию обращенных к плазме материалов. Изменение кристаллической структуры и растрескивание, плавление, испарение, выброс капель и частиц с поверхности будут приводить к уменьшению срока службы облицовочных покрытий, загрязнению плазмы примесями, образованию и накоплению пыли в вакуумной камере. Эти процессы могут существенно снизить срок безопасной эксплуатации реактора и ставят под вопрос его работоспособность. Поэтому выбор материалов и конструкции обращенных к плазме элементов вакуумной камеры промышленного термоядерного реактора является одной из актуальных проблем.

Материалы защитных покрытий вакуумной камеры должны удовлетворять целому ряду требований, в виду чего их выбор является непростой задачей. Для ее решения необходимо исследовать поведение материалов при воздействии экстремальных тепловых нагрузок, ожидаемых в реакторе синтеза. В свою очередь, для этого требуется развивать новые диагностические методы, позволяющие регистрировать параметры протекающих во время экспериментов процессов – не только после, но и непосредственно во время теплового воздействия на образцы. Таким образом, диссертационная работа Д.Е. Черепанова посвящена актуальной проблеме исследования повреждения вольфрама и высокотемпературных керамик (W_4C , SiC), перспективных материалов первой стенки реактора, при экстремальном тепловом нагреве. Созданные в ходе работы диагностические методы и полученные с их помощью экспериментальные данные важны как для оценки стойкости обращенных к плазме материалов, так для создания и проверки

соответствующих теоретических моделей, описывающих их механизмы разрушения.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 142 страницы, включая 74 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 119 наименований.

Во введении представлен краткий обзор современного состояния проблемы стойкости материалов обращенных к плазме стенок термоядерных установок. Описаны ожидаемые условия их работы и требования к свойствам облицовочных покрытий. В достаточной мере рассмотрены механизмы эрозии материалов, планируемых к использованию в проекте международного термоядерного реактора ИТЭР, а также рассмотрены преимущества высокотемпературных керамик при использовании в качестве облицовочных покрытий вакуумной камеры реактора. Здесь же обосновывается актуальность и выбор темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследования, перечислены выносимые на защиту положения, описаны научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Представлена информация об апробации результатов, публикациях, личном вкладе автора, а также – о структуре диссертации.

В первой главе приведено описание установки БЕТА и реализованных на ней диагностических систем. Для измерений температуры на поверхности вольфрамовых мишеней при воздействии ускоренного пучка электронов реализована пирометрия. С целью регистрации в реальном времени эрозии поверхности собрана диагностика диффузно рассеиваемого лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Для изучения хрупко-вязкой деформации вольфрама при импульсном нагреве создана диагностика, позволяющая отслеживать динамику изгиба образца во время эксперимента. Приведены схемы и иллюстрации, способствующие пониманию принципов работы каждой диагностики, представлено подробное описание входящих в них элементов. Достаточно подробно описан процесс обработки экспериментальных данных, выполнены оценки точности измерений.

Вторая глава посвящена описанию результатов, полученных во время экспериментов по исследованию деформации вольфрама в ходе импульсного нагрева. Рассмотрены основные этапы процесса деформации тонкой вольфрамовой

пластины в случае импульсного нагрева поверхности до температуры выше порога хрупко-вязкого перехода. Описаны причины возникновения остаточных растягивающих напряжений в тонком поверхностном слое и проведена их количественная оценка. Продемонстрировано совпадение результатов эксперимента с результатами расчетов, выполненных на основании разработанной ранее теоретической модели деформации хрупко-пластичных материалов. Показано, что с ростом тепловой нагрузки величина остаточных напряжений растет вплоть до порога прочности на растяжение, после чего происходит растрескивание поверхности вольфрамовой мишени. Делается обоснованный вывод о том, что созданная диагностика позволяет оценивать остаточные механические напряжения, возникающие в металлах вследствие импульсного теплового воздействия, что, в свою очередь, позволяет понять, насколько материал близок к растрескиванию.

В третьей главе приводится описание лазерного стенда для исследования устойчивости высокотемпературной керамики к мощному импульсному нагреву. Стенд снабжен системами диагностики для регистрации температуры облучаемой поверхности образцов, а также для определения плотности мощности их нагрева. Исследование эрозии образцов в режиме реального времени выполнялось с помощью диагностики, регистрирующей диффузно рассеиваемое лазерное излучение: изменение шероховатости поверхности приводит к изменению углового распределения рассеиваемого излучения. Приведены схемы, иллюстрирующие принципы работы каждой диагностики и представлено подробное описание входящих в них элементов. Рассмотрен процесс обработки экспериментальных данных и указана точность результатов измерений.

Четвертая глава посвящена обсуждению результатов испытаний высокотемпературных керамик. Экспериментально измерены пороговые тепловые нагрузки, при воздействии которых начинается выкрашивание мелких кусочков вещества с поверхности мишеней из горячепрессованного карбида бора и карбида кремния. Выполнена теоретическая оценка максимальных значений температуры, при достижении которых начинается хрупкое разрушение мишеней. Продемонстрировано хорошее соответствие полученных экспериментальных и расчетных значений. Помимо этого, на созданном экспериментальном стенде исследована стойкость покрытий из карбида бора, нанесенных на поверхность

вольфрама тремя различными методами: электронно-лучевого синтеза, детонационного и атмосферного плазменного напыления. Полученные результаты позволили сравнить устойчивость к тепловым ударам высокотемпературных керамик с вольфрамом и бериллием, и сделать обоснованный вывод о перспективности применения керамик в качестве обращенных к плазме материалов вакуумной камеры термоядерных установок.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная новизна.

В процессе выполнения диссертационной работы автором разработана оригинальная методика оценки остаточных механических напряжений в вольфраме при импульсном тепловом воздействии. Экспериментальные результаты, полученные с ее помощью, позволили проверить правильность теоретической модели, описывающей деформацию и растрескивание вольфрама при импульсном нагреве до температур, превышавших температуру хрупко-вязкого перехода.

Автором реализована оригинальная диагностика для регистрации эрозии высокотемпературных керамик при импульсном нагреве. С ее помощью впервые в режиме реального времени зарегистрирована эрозия на поверхности керамик при экстремальном тепловом воздействии и определены пороговые тепловые нагрузки, при которых начинается эрозия.

Теоретическая и практическая значимость.

Данные, полученные с помощью диагностики для измерения изгиба вольфрамовых мишеней при импульсном тепловом воздействии, позволяют описать механизм деформации хрупко-пластичного материала во время нагрева выше температуры хрупко-вязкого перехода. Измеренная в работе зависимость между кривизной и температурой поверхности металла дает возможность оценить величину остаточных напряжений, возникающих при пластической деформации прогреваемого слоя и приводящих к растрескиванию облучаемой поверхности.

Экспериментальные данные, полученные при испытании высокотемпературных керамик термическими ударами, позволяют описать механизм их эрозии в ходе импульсного нагрева, а также – определить пороговые тепловые нагрузки, при достижении которых начинается хрупкое разрушение.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения высокотемпературных керамик в качестве обращенных к плазме компонентов термоядерных установок.

Степень обоснованности научных положений, достоверность выводов и рекомендаций.

Достоверность полученных в работе данных не вызывает сомнений и обусловлена тщательной калибровкой измерительной аппаратуры, применением перекрестных средств измерений, воспроизводимостью результатов многочисленных экспериментов. Основные выводы работы и защищаемые положения обоснованы применением независимых методов диагностики и анализа исследуемых материалов, корректным применением теоретических моделей изучаемых процессов. Результаты получены на современном оборудовании и согласуются с данными других авторов. Результаты и положения диссертации соответствуют опубликованным данным, что также подтверждает их достоверность.

Степень завершенности работы и качество ее оформления.

В целом диссертация Д.Е. Черепанова представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу. Постановка цели и задач исследования, методика их реализации, полученные результаты изложены с высокой степенью подробности. Полученные результаты отвечают поставленным задачам, которые, в свою очередь, соответствуют поставленной цели. Качество оформления соответствует требованиям к материалам, предназначенным для публикации в научной печати. Основные результаты диссертации отражены в публикациях автора, 3 из которых – в виде статей в российских и зарубежных научных журналах, включенных в Перечень ВАК и/или индексируемых в базе данных Scopus. Автореферат полностью отражает содержание диссертации, тема и материалы которой соответствуют специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Вопросы и замечания по диссертации.

1. В двух первых защищаемых положениях (стр.15-16) помимо длительности импульсного нагрева вольфрамовых мишеней было бы желательно указать диапазон тепловых нагрузок, для которых проводились эксперименты.

2. Чем обусловлен выбор электронного пучка (установка БЕТА) для импульсного нагрева вольфрамовых мишеней и лазера – в экспериментах с высокотемпературной керамикой?

3. При описании установки БЕТА отмечается, что напряжение, ускоряющее электронный пучок, может достигать 120 кВ. Какова глубина торможения электронов такой энергии в вольфраме и как она соотносится с глубиной прогрева металла при длительности воздействия 1 мс?

4. На рисунке 2.6 (стр.46) представлены результаты измерений кривизны вольфрамовой мишени при импульсном нагреве. Видно, что спустя 1 мс от начала воздействия на графике наблюдается резкое (на 30%) уменьшение кривизны мишени с последующим восстановлением к значениям на момент окончания нагрева. С чем связано такое поведение мишени?

5. В разделе 2.4 диссертации приведены данные, подтверждающие взаимосвязь величины остаточного изгиба вольфрамовой мишени и интенсивности излучения диагностического лазера, рассеиваемого от поверхности, облучаемой электронным пучком. Каковы возможные причины роста шероховатости поверхности, если указанная закономерность наблюдается при температурах ниже 1600 К – рис.2.17, в то время как растрескивание происходит при более высоких температурах – рис.2.8?

6. В четвертой главе диссертации автор приводит результаты измерений шероховатости поверхности образцов из карбида бора и карбида кремния с помощью оптического профилометра до начала экспериментов. Было бы полезно представить результаты аналогичных измерений и после облучения образцов.

7. Насколько оправдано приводить значения коэффициента пропорциональности между температурой и параметром потока тепла с точностью 3 значащих цифры – рисунок 4.15а, если при аппроксимации экспериментальных данных линейной функцией для низких (< 1200 К) и высоких (> 1200 К) температур получены значения коэффициентов, отличающиеся более чем в два раза?

8. Проводилась ли предварительная подготовка поверхности вольфрама с целью улучшения адгезии при нанесении тонкого слоя карбида бора методом электронно-лучевого синтеза (раздел 4.6.1 диссертации)?

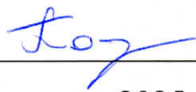
Указанные недостатки и замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ценности полученных в ней результатов.

Заключение

Диссертационная работа Д.Е. Черепанова «Экспериментальные методы исследования повреждения термическими ударами материалов первой стенки термоядерных реакторов» представляет собой завершённое научное исследование, полученные в ней результаты обладают научной новизной и практической ценностью, их достоверность не вызывает сомнения. Диссертация полностью отвечает требованиям действующего Положения о присуждении ученых степеней №842, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., а ее автор, за результаты исследования повреждения термическими ударами материалов первой стенки термоядерных реакторов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук по
специальности 01.04.08 – физика плазмы,
ведущий научный сотрудник акционерного общества
«Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»



Позняк Игорь Михайлович

15 января 2025 г.

Адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12
e-mail: poznyak.im@phystech.edu
тел. +7 495 841 53 08

Подпись И.М. Позняка заверяю

Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

