

О Т З Ы В

официального оппонента доктора химических наук

Ляхова Николая Захаровича на диссертацию АРАКЧЕЕВА Алексея Сергеевича

«Теоретическое и экспериментальное исследование плавления, испарения и образования трещин на вольфраме при мощной плазменной нагрузке»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям

01.04.08 – физика плазмы и

01.04.07 – физика конденсированного состояния

в диссертационный совет Д 003.016.03

Работа А.С.Аракчеева посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию поведения материалов в экстремальных условиях импульсного воздействия на них потока плазмы токамака. В основном рассмотрены материалы, используемые при строительстве токамака ITER. Используемые в модельных экспериментах и теоретических расчетах параметры плазмы также приближены к параметрам плазмы ITER.

Актуальность. Наиболее опасными являются импульсные тепловые нагрузки на материалы термоядерных реакторов, так как они вызывают перенос материала плазмоприёмников с минимальными затратами энергии потока плазмы на единицу массы материала. Основные механизмы такого переноса: активное испарение, плавление с движением расплава и выбросом капель и механическое разрушение в виде дробления на пылевые частицы или образования трещин. Темой данной диссертации является исследование этих механизмов с помощью теоретических вычислений и разработки новых экспериментальных диагностик. Такое исследование поможет найти материалы и конструкции, которые выдержат поток плазмы на первой стенке перспективных термоядерных реакторов.

Работа А. С. Аракчеева безусловно является актуальной.

Цели и задачи. Выявление закономерностей различных механизмов эрозии должно помочь в нахождении способов увеличения устойчивости обращённых к плазме материалов. Поэтому основная цель диссертации состоит в исследовании механизмов эрозии вольфрамовых плазмоприёмников, характерных для ожидающихся в перспективном термоядерном реакторе нагрузках: испарение, плавление и механическое разрушение.

Научная новизна. Для описания парового экранирования впервые была сформулирована одномерная аналитическая модель, которая позволяет вычислить количество поглощённой материалом энергии и испарённого материала. Справедливость описания охлаждения за счёт испарения доказывается сравнением с экспериментально измеренной зависимостью размера расплавленной области от времени. Впервые продемонстрирован режим, в котором во время импульсного нагрева охлаждение за счёт испарения вносит значительный вклад в энергобаланс. Для расплава вычислены характерные времена колебаний и затухания колебаний на поверхности расплава. Эти данные впервые использованы для анализа изменения формы поверхности затвердевшей расплавленной области за время остывания. Результаты позволяют связывать формы поверхности расплава во время облучения и после затвердевания.

Усовершенствована одномерная теоретическая модель для расчёта деформаций и напряжений в материале при импульсной тепловой нагрузке. В новом подходе к описанию динамики деформаций и напряжений при импульсном нагреве впервые реализован плавный переход от хрупкого состояния в вязкое, что позволяет корректно описывать поведение материалов с близкими пределами прочности и текучести.

Проведён двумерный расчёт деформаций и напряжений вокруг трещины, появившейся в результате импульсной тепловой нагрузки. Впервые получены распределения указанных величин с корректным учётом особой точки на конце трещины в рамках линейной теории упругости. В ходе этого расчёта два дифференциальных уравнения второго порядка на две функции от двух переменных (уравнения механического равновесия четверти пространства, заполненного упругой средой) были сведены к одному интегральному уравнению первого порядка на одну функцию одной переменной с помощью оригинального модифицированного метода интегрального граничного условия. Детали применявшихся математических приёмов подробно описаны в приложениях диссертации.

Разработан физический проект новой методики для измерения динамики распределения деформаций по глубине при импульсной тепловой нагрузке на основе рассеяния синхротронного излучения на монокристаллическом материале. Создана специализированная станция рассеяния синхротронного излучения "Плазма" в бункере СИ ВЭПП-4. Станция "Плазма" является первой установкой, на которой реализована разработанная методика измерений. Кроме того, измерена динамика дифракции во время импульсных тепловых нагрузок и непосредственно после них.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в диссертации результаты значимы для качественного и количественного описания различных механизмов эрозии материалов. В теоретических исследованиях получены следующие значимые результаты.

Степень достоверности. Достоверность теоретических результатов подтверждается их сравнением с доступными экспериментальными результатами и использованием проверенных способов аналитического и численного моделирования. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается качественным и количественным совпадением с результатами теоретических расчётов, в том числе с полученными до проведения экспериментов. Материалы работы опубликованы в ведущих зарубежных и российских научных журналах и неоднократно докладывались на международных конференциях и семинарах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация содержит 210 страниц и библиографический список из 178 работ.

Во введении приведено короткое описание современного состояния дел в изучении взаимодействия плазмы с материалами. Обсуждены цели и план их реализации в диссертации, а также дана оценка актуальности работы.

В первой главе представлен исторический обзор и современное состояние изучения взаимодействия плазмы с материалами. Сначала перечислены требования, которым должны удовлетворять материалы первой стенки в перспективных термоядерных установках. Затем описаны ожидающиеся параметры нагрузки на материалы первой стенки.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию плавления и испарения вольфрама при импульсном нагреве. Три раздела этой главы посвящены исследованию

парового экранирования, влияния охлаждения за счёт испарения и динамики изменения формы поверхности расплава после прекращения импульсного нагрева. Для теоретического исследования парового экранирования использовался одномерный подход.

При теоретическом исследовании охлаждения за счёт испарения ослабление потока энергии в испарённом материале не учитывалось, но в граничном условии был учтён обратный поток энергии за счёт испарения. Основным содержанием этого раздела работы являлось сравнение результатов расчётов с экспериментальными результатами, полученными на установке ВЕТА, использующей для воспроизведения импульсной тепловой нагрузки электронный пучок.

В третьей главе описывается теоретическое исследование образования перпендикулярных облучаемой поверхности трещин в результате импульсной тепловой нагрузки. По сравнению с предыдущими работами в описанных теоретических вычислениях корректно учтены непрерывный переход из хрупкого состояния в вязкое при изменении температуры и упрочнение материала. Эти особенности теоретического описания особенно важны именно для вольфрама, произведённого по спецификациям ИТЭР, так как у него в широком диапазоне температур пределы прочности и текучести близки по величине.

В четвертой главе описывается теоретическое исследование образования трещин в результате импульсной тепловой нагрузки с учётом двумерных эффектов. Для этого решалась задача линейной теории упругости для трещины от поверхности. По аналогии с классической задачей Гриффитса задача сведена к приложению сил к сторонам трещины. Задача Гриффитса может быть сведена к интегральному уравнению благодаря тому, что первообразная перпендикулярных к плоскости трещины напряжений и перпендикулярные смещения связаны преобразованием Гильберта. Аналогично задачу с трещиной от поверхности можно свести к уравнению Фредгольма второго типа, в котором в качестве ядра интегрального преобразования используется смещение при приложении к четверти пространства силы в виде производной от дельта-функции от расстояния от ребра. Ядро интегрального преобразования получено в виде ряда, для которого доказано экспоненциальное убывание членов ряда с ростом их номера по норме максимума модуля. Получение ядра интегрального преобразования в аналитическом виде позволило корректно учесть особую точку на конце трещины. Благодаря полученному уравнению Фредгольма второго рода было получено распределение в плоскости трещины перпендикулярных ей напряжений. Заметим, что в качестве правой части уравнения использовались напряжения, рассчитанные по одномерной модели из предыдущей главы. Знание полученного распределения напряжений позволяет получить полное распределение любых компонент деформаций и механических напряжений в области вокруг перпендикулярной поверхности трещины, образовавшейся в результате импульсной тепловой нагрузки. В результате было показано, что рядом с перпендикулярной поверхности трещиной могут появляться растягивающие механические напряжения, перпендикулярные облучаемой поверхности. Эти напряжения не малы по сравнению с пределом прочности и, соответственно, могут приводить к образованию и распространению параллельных поверхности трещин. Было рассчитано распределение деформаций на облучаемой поверхности и в плоскости трещины. Из-за эффекта Пуассона рядом с перпендикулярными поверхности трещинами образуется подъём поверхности. Так как такой подъём идёт вдоль трещины на поверхности, то он имеет

вид "хребта".

Пятая глава посвящена применению рассеяния синхротронного излучения для исследования динамики деформаций и напряжений в материалах при импульсном нагреве. Предварительные эксперименты по измерению остаточных напряжений в вольфрамовых образцах, облучённых на установке ГОЛ-3, проводились на станции "Аномальное рассеяние" на накопителе электронов ВЭПП-3 в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения [8]. В этих экспериментах была подтверждена ожидавшаяся структура упругих деформаций и было измерено уменьшение напряжений в направлении, перпендикулярном трещинам на поверхности. В этих измерениях применялся классический метод измерения механических напряжений по измерению угла рассеяния дифракционного максимума. Такое измерение требует получения нескольких профилей дифракционных максимумов, что обычно можно сделать только за несколько минут. Поэтому получение динамики деформации во время облучения за менее чем 1 мс таким методом невозможно. Для реализации диагностики с требуемым временным разрешением была предложена методика на основе рассеяния синхротронного излучения на монокристаллическом образце. Изменение дифрактограммы во время импульсного нагрева при таком подходе происходит из-за поворота атомарной плоскости, на которой происходит рассеяние в дифракционный максимум. В связи с тем, что по условию Вульфа-Брэгга угол падения синхротронного излучения на кристаллическую плоскость равен углу отражения в дифракционный максимум. Кроме того, при изменении угла рассеяния, в соответствии с тем же условием Вульфа-Брэгга, будет меняться энергия рассеиваемого в дифракционный максимум излучения. Поэтому для такого эксперимента требуется использовать полихроматическое излучение. Перераспределение деформаций по глубине приводит к изменению формы дифракционного пика. Предложенная методика потенциально позволяет реализовать измерения распределения деформаций и напряжений по глубине с временным и пространственным разрешением.

Эксперименты по предложенной методике проводились на специально созданной станции рассеяния "Плазма" в бункере синхротронного излучения ВЭПП-4. Для импульсного нагрева использовался Nd:YAG генератор лазерного излучения в режиме свободной генерации и усилитель лазерного излучения. Длительность импульса лазера около 140 мкс, энергозапас импульса генератора излучения 0.5 Дж, энергозапас после трёх проходов через усилитель до 50 Дж. Многопиковый режим нагрева не меняет существенно результат измерений по сравнению с однородным по времени нагревом, поскольку разница в распределении температуры имеет место только в тонком поверхностном слое. Лазерное излучение доводится до образца с помощью системы диэлектрических зеркал и фокусируется в пятно диаметром 5 мм на поверхности образца.

Измерения динамики дифракционного пика 110 монокристалла вольфрама проводились на монокристалле с ориентацией поверхности (100) толщиной 200 мкм.

Можно четко различить три стадии эволюции дифракционного пика: нагрев поверхности, выравнивание распределения температуры по глубине перпендикулярно поверхности и охлаждение до комнатной температуры.

На первом этапе нагрева лазерным импульсом, примерно от 0 мкс до 140 мкс, температура поверхности растёт, и толщина нагреваемого слоя увеличивается. Угол рассеяния рентгеновских лучей растёт с ростом температуры в нагретом слое. Следовательно, часть исходного дифракционного пика сдвигается вправо. На этом

этапе температура обратной стороны образца остается близкой к начальной. Это означает, что в распределении температуры представлены слои со всеми температурами от начальной до мгновенного максимума. Следовательно, сигнал рассеянного излучения охватывает весь диапазон от исходного положения до движущейся правой стороны дифракционного пика. Распределение деформации определяется довольно резким распределением температуры. В результате дифракционный пик имеет сложную форму, отличную от колоколообразной.

Наблюдаемое изменение формы дифракционного пика является прямым доказательством предсказанного эффекта поворота атомарной плоскости решетки из-за локального нагрева, потому что изгиб образца не может привести к образованию наблюдаемой сложной формы дифракционного пика.

Вначале выравнивания температуры по глубине неоднородно: нагреваемая сторона горячая и имеет увеличенный угол рассеяния, тогда как у другой стороны почти начальная температура и, следовательно, начальное значение угла рассеяния. Уравнивание температуры означает, что более холодные слои нагреваются, более горячие слои остывают. Таким образом, изменение угла рассеяния является положительным при малых углах рассеяния и отрицательным при больших углах рассеяния.

В результате дифракционный пик становится уже. Однако в конце этого этапа дифракционный пик шире исходного пика из-за наличия пластической деформации. Эволюция формы дифракционного пика значительно замедляется после второго этапа, потому что дальнейшее изменение распределения температуры вызвано отводом тепла вокруг поверхности образца. Отвод тепла вокруг поверхности и затем к держателю образца намного медленнее, чем уравнивание в поперечном направлении к поверхности, потому что тепло переносится на значительно большее расстояние. На последующих кадрах, которые не показаны на рисунке, нет заметных изменений формы дифракционного пика.

Эволюция формы дифракционного пика на третьем этапе (охлаждение до комнатной температуры) не измерялась, потому что охлаждение требует гораздо больше времени, чем другие этапы, а используемый детектор не подходил для длительных измерений. Конечное состояние формы дифракционного пика измеряли через несколько секунд после конца нагрева, когда температура образца вернулась к комнатной. Согласно соотношению между температурой и углом рассеяния, последний уменьшается после охлаждения. Однако, дифракционный пик не вернулся к исходному положению. Это означает формирование остаточной пластической деформации.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложения вынесены математические выкладки по вычислению вспомогательных интегралов и доказательству вспомогательных формул.

Представленные в диссертации результаты (сформулированные, в частности, в положениях, выносимых на защиту и отдельно в автореферате) отличаются научной новизной и представляют собой значительный шаг в развитии теоретического и экспериментального исследований воздействия мощных импульсных нагрузок на материалы. Научная и практическая значимость диссертации заключается в построении теоретических моделей для анализа различных механизмов разрушения материалов при воздействии пламенного потока и разработке новой экспериментальной методики для измерения динамики деформаций и напряжений в материале при импульсной нагрузке.

Замечания:

1. При исследовании внутренних напряжений поликристаллического вольфрама исследуемый образец предварительно шлифовался, что привело к образованию шероховатости в виде канавок глубиной 3 мкм (данные электронной микроскопии на стр. 137). Автор не обосновал адекватность полученного качества поверхности используемому методу измерения напряжений, т.к. вероятно что напряжения на дне канавки и вне ее могут отличаться.

2. Для измерения внутренних напряжений автор использует СИ с энергией 8.048 кэВ (стр. 136), однако он не обосновывает выбор этой энергии. На экспериментальной станции «Аномальное рассеяние» доступен спектральный диапазон 5 – 20 кэВ и вполне логично было бы использовать энергию 20 кэВ. Использование этой энергии позволило бы получать информацию о напряжениях кристаллической решетки с большей глубины, где материал не разрезан царапинами после шлифования.

3. На экспериментальной станции «Аномальное рассеяние» для регистрации порошковых рентгенограмм используется щелевая коллимация. Известно, что щелевая коллимация приводит к асимметрии дифракционных пиков. Поэтому для прецизионных измерений угла дифракции экспериментальные дифракционные пики нужно описывать асимметричными функциями.

4. В связи с тем, что автор неправильно описывает экспериментальные дифракционные пики, используя для их аппроксимации симметричные функции, появляется систематическая ошибка в определении положения дифракционного пика. Это хорошо видно на рисунке 39: аппроксимирующая кривая смещена относительно экспериментальных точек дифракционного пика на 0.1 градус. Величина в 0,1 градус слишком велика для прецизионных экспериментов, т.к. наблюдаемый эффект смещения дифракционного пика при измерении напряжений составляет всего 0.02 градуса (рисунок 40 (а), пунктирная кривая в диапазоне поворота по пси на от 0 до 40 градусов).

Опечатки и небрежность изложения (сленг):

5. На рисунке 39 вместо «Интенсивность рассеянного СИ ...» следовало бы написать «Интенсивность дифрагированного СИ ...».

6. В подписи к рисунку 39 автор не указал что означает сплошная линия, а чему соответствуют точки.

7. На рисунке 40 вместо «Зависимости угла рассеяния СИ ...» следовало бы написать «Зависимости угла дифракции СИ ...».

8. На странице 134 присутствует бессмысленное предложение (профессиональный сленг): «Угол рассеяния 2θ определялся по результату аппроксимации результата Гауссовского и Лоренцевского профилей... ». Исходя из логики изложения следовало бы написать: «Положение дифракционного пика определялся по результату аппроксимации экспериментальных данных суммой функций Гаусса и Лоренца».

Данные замечания не влияют на оценку диссертации. Квалифицированно проведенные расчеты и подтверждение их результатов экспериментами позволяют считать полученные результаты обоснованными и достоверными. Результаты исследования опубликованы в высокорейтинговых журналах. Личный вклад автора

является определяющим. Автореферат достоверно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Теоретическое и экспериментальное исследование плавления, испарения и образования трещин на вольфраме при мощной плазменной нагрузке» представляет собой законченное научное исследование и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по специальностям 01.04.08 – физика плазмы и 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а ее автор, Аракчеев Алексей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Академик РАН
Доктор химических наук
Главный научный сотрудник
Заведующий лабораторией
ИХТТМ СО РАН
630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 18
Тел.: 89139878295
Email: lyakhov@solid.nsc.ru

Н.З. Ляхов

Подпись Н.З. Ляхова заверяю
Ученый секретарь ИХТТМ СО РАН
Доктор химических наук
Email: shah@solid.nsc.ru

Т.П.Шахтшнейдер

Дата:
02.04.2021

