

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук Будаева Вячеслава Петровича

на диссертационную работу 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

Диссертационная работа А.С. Аракчеева посвящена исследованию устойчивости материалов к мощным импульсным воздействиям плазмы в предполагаемых условиях эксплуатации стенки термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы.

Актуальность работы

При мощной плазменной нагрузке на материалы происходят множественные процессы деградации структуры поверхности из-за эрозии, образования трещин, плавления, испарения и переосаждения материала, приводя к изменению физико-химических свойств обращенных к плазме конструкций. Такие процессы наблюдаются в термоядерных плазменных установках с магнитным удержанием плазмы – токамаках, стеллараторах, линейных системах, эти процессы необходимо всесторонне исследовать для выработки подходов к конструированию стенки будущего термоядерного реактора с целью исключить риск ее разрушения. В термоядерных реакторах, включая международный токамак-реактор ИТЭР, планируется использовать вольфрам для изготовления обращенных к плазме компонентов в зонах наибольшей плазменной нагрузки. Механизмы изменения обращенной к плазме поверхности, в том числе вольфрамовой, включают процессы взаимодействия приповерхностной плазмы с материалом и динамическую эволюцию поверхности, развивающиеся на пространственных масштабах от атомных до макроскопических и временных масштабах от времен молекулярной динамики до часовых периодов плазменного разряда. Имеющихся к настоящему времени экспериментальных результатов недостаточно для предсказания всех эффектов разрушения стенки в будущем термоядерном реакторе. Описать все эффекты в рамках единой теоретической модели также не удается из-за сложности и множественности одновременных процессов. Поэтому требуется проведение экспериментальных исследований наиболее интенсивных процессов, приводящих к разрушению материала, включая плавление, испарение и образования трещин на вольфраме,

при мощной плазменной нагрузке, а также развитие теоретических моделей таких эффектов для обобщающего анализа и предсказания явлений разрушения стенки в будущем термоядерном реакторе. Таким образом тема диссертации Аракчеева А.С., посвященная теоретическому и экспериментальному исследованию плавления, испарения и образования трещин на вольфраме при мощной плазменной нагрузке, является важной и актуальной для термоядерной энергетики.

Анализ содержания работы

По структуре, содержанию и изложению материала диссертация Аракчеева А.С. является законченным научным трудом, состоит из введения, пяти глав, заключения, трех приложений, списка литературы. Диссертация объемом 210 страниц, включая 61 рисунок, библиография содержит 178 наименований, написана технически грамотным языком, оформлена надлежащим образом.

Во введении представлено описание проблемы, определена цель диссертационной работы, представлены используемые подходы к решению поставленных задач, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены обзор и описание современного состояния исследований взаимодействия потоков плазмы с материалами в термоядерных установках.

Во второй главе описаны теоретические рассмотрения ряда явлений при взаимодействии потоков плазмы с материалами, включающие плавление и испарение материалов: паровое экранирование и охлаждение материала за счёт испарения. Рассмотренные модели парового экранирования основаны на уравнениях, описывающих нагрев материала, его испарение и уменьшение интенсивности потока плазмы на поверхность материала из-за наличия плотного слоя газа. При анализе влияния охлаждения материала за счет испарения паровое экранирование не учитывается, нагрев материала уменьшается из-за обратного потока тепла с испаренным материалом. Все вычисления в этой главе производятся в предположении однородного вдоль поверхности облучения. Такие модели не позволяют проводить достаточно детальные расчеты режимов работы существующих и проектируемых термоядерных установок. Вместе с тем, такая рассмотренная автором упрощенная модель позволила получить новые закономерности. Были сделаны выводы о связи уровней насыщения поглощенной энергии и количестве испаренного материала.

Третья глава содержит описание теоретических исследований образования перпендикулярных поверхности трещин при импульсном нагреве. Численные результаты получены для вольфрама, изготовленного по спецификациям ИТЭР. Расчеты для этого типа вольфрама показали уменьшение энергетического порога образования трещин при

увеличении базовой температуры. На основе геометрии деформаций при импульсном нагреве проанализировано влияние армирования материала на образование трещин, что представляется важным для будущего практического применения.

В четвертой главе представлена расширенная модель образования трещин. Рассчитаны распределения деформаций и напряжений в области вокруг перпендикулярной поверхности трещины. Применились аналитические и численные методы с использованием метода граничных интегральных уравнений. Задача решена только для импульсного облучения, после которого образовались трещины. Получена расчетная форма поверхности вблизи трещины. На основе этого результата предложены диагностики по рассеянию лазерного излучения на поверхности для регистрации перпендикулярных и параллельных поверхностей трещин, появившихся в результате импульсного нагрева. Экспериментальная реализация такой методики будет способствовать получению данных о динамике образования трещин, что необходимо для оценки эрозии материала в реакторе.

Пятая глава содержит описание предложенной методики измерения динамики деформаций и механических напряжений во время импульсного нагрева с помощью рассеяния синхротронного излучения. Предложенная методика является оригинальной и основана на изменении угла рассеяния в дифракционный максимум при деформации материала. Угол рассеяния изменяется вместе с энергией рассеиваемого в дифракционный максимум синхротронного излучения из-за поворота рассеивающей атомарной плоскости. Предложенный метод реализован на созданной для этого станции рассеяния «Плазма» в бункере синхротронного излучения ВЭПП-4 с использованием мощного лазера. Полученные экспериментальные результаты имеют важное значение для оценки эрозии вольфрама при критически высоких нагрузках, ожидаемых в термоядерном реакторе на конструкционных материалах.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложения вынесены результаты математических вычислений вспомогательных интегралов и доказательства вспомогательных формул.

Научная новизна и практическая значимость

В диссертационной работе получены новые научные результаты имеющие практическое значение. Разработана новая методика экспериментального измерения характеристик деформации по глубине при импульсной тепловой нагрузке на монокристаллическом материале с высоким временным разрешением. Эта методика впервые реализована на стенде «Плазма» в бункере синхротронного излучения ВЭПП-4. Получены новые экспериментальные данные о деформациях в вольфраме, что является важным для оценки риска разрушения вольфрамовых конструкций в будущем

термоядерном реакторе. Разработаны новые теоретические модели образования трещин при импульсных нагрузках. Проведен расчет деформаций и напряжений при импульсной тепловой нагрузке при переходе от хрупкого состояния в вязкое.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке новой экспериментальной методики и создании диагностики измерения динамики деформации и напряжений в материале при импульсной нагрузке по глубине, построении теоретических моделей для анализа механизмов разрушения материалов при воздействии пламенного потока.

Достоверность и аprobация работы

Достоверность работы подтверждается сравнением экспериментальных данных с расчетами, использованием проверенных методов теоретического рассмотрения и моделирования. Представленные в диссертации результаты прошли аprobацию на 11 международных и всероссийских конференциях. Основные результаты работы достаточно полно отражены в 17 статьях в ведущих мировых журналах. Автореферат содержит основные результаты исследования и в полной мере отражает содержание диссертации.

К работе имеются следующие замечания:

1. Для всестороннего описания эффектов эрозии стенки термоядерного реактора необходимо учитывать процессы протекания токов из приповерхностной плазмы на материал, в том числе в сильных магнитных полях термоядерного реактора при мощных плазменно-тепловых нагрузках на материал. Особенно это может влиять на эффекты плазменного экранирования и на динамику поверхности материала при возникновении униполярных дуг, развивающихся на субмикросекундных временах. В диссертационной работе такие эффекты протекания токов не исследованы и не приведена оценка их влияния на характеристики эрозии для термоядерного реактора.

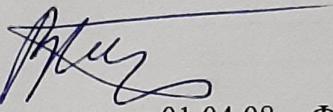
2. Не проведен анализ динамики трещин субмикронного масштаба в условиях образования пористой поверхности нано- и микрометрового масштаба, которая формируется при длительной эксплуатации конструкционных компонентов, обращенных к плазме в термоядерных установках. Следует ожидать, что такие слои могут изменить характеристики напряжений на глубине до нескольких микрометров, а также изменить динамику развития трещин.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку диссертации в целом. Полученные экспериментальные результаты и сопоставление их с проведенными теоретическими расчетами и другими экспериментальными данными позволяют считать

полученные результаты обоснованными и достоверными. В диссертации получены новые результаты, имеющие научное и практическое значение. Личный вклад автора является определяющим.

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.

5 марта 2021 г.

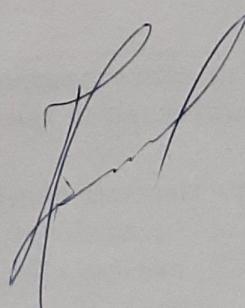
Будаев Вячеслав Петрович,

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы, ведущий научный сотрудник лаборатории исследований транспортных процессов в плазме отдела Т-10 отделения токамаков Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт»

Адрес:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)
123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
Телефон: +7 (499) 196-7707
e-mail: Budaev_VP@nrcki.ru

Подпись В.П. Будаева заверяю.

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»
nrcki@nrcki.ru



И.И. Еремин

« 9 » апреля 2021 г.