



УТВЕРЖДАЮ  
Научный руководитель  
АО «ТНЦРФ ТРИНИТИ»

В.Е. Черковец

« 30 » 03 2021 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию  
Аракчеева Алексея Сергеевича

на тему:

«Теоретическое и экспериментальное исследование плавления, испарения и  
образования трещин на вольфраме при мощной плазменной нагрузке»,  
по специальностям 01.04.07, 01.04.08

на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Диссертационная работа Аракчеева А.С. посвящена исследованию физики взаимодействия плазмы с материалами в условиях, ожидаемых во время переходных процессов в термоядерном реакторе-токамаке.

**Актуальность** представленных в диссертации исследований связана с поиском материалов и конструкции первой стенки и дивертора токамака, поскольку на сегодняшний день нет проекта плазмоприемника, который сможет обеспечить долгосрочную работу реактора. Основными ограничивающими факторами при этом являются значительная эрозия материала, а также – деградация его теплофизических свойств. С точки зрения эрозии защитных покрытий наиболее опасными являются импульсные плазменно-тепловые воздействия, поскольку они вызывают перенос вещества плазмоприемников с минимальными (на единицу массы материала) затратами энергии. Основными механизмами эрозии являются: испарение, плавление, движение расплава и выброс капель с его поверхности, а также – механическое разрушение в виде дробления на пылевые частицы и образование трещин. Представленная диссертационная работа посвящена комплексному исследованию перечисленных механизмов эрозии.

**Диссертация состоит** из введения, пяти глав, заключения и трех приложений.

Во **введении** обоснована актуальность работы, приведены цели и задачи исследования, описано краткое содержание диссертации, сформулированы выносимые на защиту положения.

В **главе 1** представлен анализ литературных данных по теме исследования. Перечислены требования, которым должны удовлетворять материалы обращенных к плазме покрытий вакуумной камеры термоядерных установок. Подробно обсуждаются условия, в которых будут работать защитные покрытия, и типы лабораторных установок, на которых такие условия можно моделировать. Кроме этого, описаны основные процессы, возникающие при плазменно-тепловом воздействии на материалы: поглощение водорода, плавление, испарение и механическое разрушение.

В **главе 2** описываются результаты теоретических исследований явлений, развивающихся при импульсном нагреве материалов. Предложены аналитические модели, описывающие эффекты паровой экранировки и охлаждения за счет испарения. Для эффекта паровой экранировки предложены несколько моделей взаимодействия потока плазмы с плотным слоем испаренного вещества мишени. Показано, что максимальная плотность поглощенной энергии логарифмически слабо зависит от механизма взаимодействия частиц плазмы с испаренным газом и определяется свойствами материала мишени, а также – параметрами плазменного воздействия.

Модель охлаждения за счет испарения позволила корректно рассчитать динамику размера расплавленной области в экспериментах по облучению вольфрама электронным пучком на установке ВЕТА. В ходе расчетов показано, что уровень насыщения поглощенной мишенью энергии на единицу площади поверхности определяется только термодинамическими свойствами и скоростью испарения материала, и слабо зависит от деталей механизмов потери энергии потока плазмы в паровом слое. Показано, что охлаждение за счет испарения может вносить существенный вклад в общий баланс энергии.

Кроме этого, во второй главе диссертации рассмотрена модель, описывающая динамику формы поверхности жидкого металлического расплава в результате затухания капиллярных волн. Показано, что остаточные возмущения на затвердевшей поверхности не могут быть объяснены генерацией возмущений только во время облучения. Для объяснения экспериментальных результатов требуются физические механизмы, приводящие к возмущению поверхности расплава на стадии его остывания, либо механизмы, замедляющие затухание начальных возмущений.

В **главе 3** построена аналитическая модель образования трещин, распространяющихся вглубь материала, перпендикулярно его поверхности, в результате воздействия импульсной тепловой нагрузки. Корректно учтены непрерывный переход из

хрупкого состояния в вязкое при изменении температуры и упрочнение материала. Это особенно важно для вольфрама, произведённого по спецификациям ИТЭР, так как для него в широком диапазоне температур пределы прочности и текучести близки по величине. Таким образом, этот материал нельзя считать абсолютно вязким или абсолютно пластичным, как это делалось в предыдущих работах. Согласно полученным результатам, при увеличении начальной температуры вольфрама, произведённого по спецификациям ИТЭР, уменьшается энергетический порог образования трещин, перпендикулярных к обращенной к плазме поверхности.

**В главе 4** разработана физическая модель, учитывающая двумерные эффекты, при образовании трещин в результате импульсного теплового воздействия на поверхность. В рамках линейной теории упругости решена задача распространения трещины от поверхности вглубь материала. Показано, что рядом с такой трещиной могут появляться растягивающие механические напряжения, сравнимые по величине с пределом прочности материала, что, соответственно, ведет к образованию и распространению трещин, ориентированных вдоль поверхности.

Был проведен расчет распределения деформаций как на облучаемой поверхности, так и в плоскости распространения трещины. Из-за эффекта Пуассона по краям трещин, перпендикулярных поверхности, образуется подъем материала, имеющий вид «хребта». Путем аналитических расчетов показано, что отношение ширины трещины к высоте «хребта» равно  $\pi$ . Этот результат согласуется с экспериментальными данными, полученными при облучении вольфрамовых образцов электронным пучком на установке ВЕТА. При появлении трещин, параллельных поверхности, это отношение должно уменьшаться. Используя результаты расчетов деформаций материала рядом с трещинами, были разработаны диагностики, позволяющие определять наличие и момент образования трещин различных ориентаций в облучаемом образце.

**В главе 5** посвящена экспериментальным исследованиям динамики деформаций и напряжений в материалах при импульсном нагреве. Для этого была создана диагностика в основе которой лежит регистрация рассеянного синхротронного излучения на монокристаллическом образце в различные моменты времени по отношению к началу теплового воздействия. Изменение дифрактограммы во времени обусловлено изменением межатомных расстояний в образце в результате теплового расширения, что позволяет реализовать измерение распределений деформаций и напряжений по глубине материала с временным и пространственным разрешением. Эксперименты проводились на специально созданной для этой цели станции рассеяния «Плазма» в бункере синхротронного излучения ВЭПП-4. Полученные экспериментальные данные отчетливо свидетельствуют о различии

поведения материала на разных стадиях теплового воздействия.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**В приложениях** приведены математические выкладки для доказательства и вычисления вспомогательных формул и интегралов.

**Диссертационная работа** хорошо структурирована, все главы логично связаны друг с другом и соответствуют поставленной цели.

Наиболее значимые **результаты** диссертации заключаются в следующем:

- построена простая одномерная аналитическая модель процесса паровой экранировки материала. С ее помощью получено выражение для уровня насыщения плотности поглощенной материалом энергии. При импульсном тепловом воздействии продемонстрировано совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными в ходе облучения вольфрамовых мишеней интенсивными потоками водородной плазмы на установке МК-200 (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк). Показано, что уровень насыщения плотности поглощенной мишенью энергии определяется в основном термодинамическими свойствами и скоростью испарения материала, и слабо зависит от механизмов потери энергии потока плазмы в паровом слое;

- построена численная модель охлаждения облучаемого образца за счет испарения. Продemonстрировано совпадение результатов расчета с экспериментальными данными о динамике размера расплавленной области при облучении вольфрамовых образцов электронным пучком на установке ВЕТА. Показано, что охлаждение за счет испарения вносит существенный вклад в общий баланс энергии;

- проведены аналитические расчеты динамики деформаций и напряжений в материале при импульсном тепловом воздействии на его поверхность. В модели учтены упрочнение материала и плавный переход из хрупкого в вязкое состояние. Это особенно актуально для материалов, у которых значения пределов прочности и пластичности близки в широком температурном диапазоне. Так, например, показано снижение энергетического порога образования трещин на вольфраме, произведенном по спецификациям ИТЭР, при увеличении начальной температуры материала;

- построена аналитическая модель растрескивания материала при импульсном тепловом воздействии. В рамках линейной теории упругости показано, что после образования перпендикулярной поверхности трещины появляются механические напряжения, которые могут приводить к образованию и распространению трещин, параллельных поверхности. Установлены причины образования подъема материала по краям трещины и вычислено отношение высоты этого подъема к ее ширине. Продemonстрировано совпадение результатов расчета с экспериментальными данными о

профиле поверхности вольфрамового образца вблизи трещин, образовавшихся в результате облучения электронным пучком на установке ВЕТА. На основании полученных результатов предложены экспериментальные методы, позволяющие определить момент образования трещин, распространяющихся по нормали к поверхности, и установить факт наличия трещин, проходящих в объеме материала параллельно поверхности, без нарушения целостности исследуемого образца;

- предложена методика измерения деформации по глубине образца в реальном масштабе времени. Методика основана на регистрации спектра синхротронного излучения, рассеянного на монокристалле вольфрама при импульсном тепловом воздействии на его поверхность. Для реализации данной диагностики создана станция рассеяния синхротронного излучения «Плазма» в бункере СИ ВЭПП-4. Полученные на ней экспериментальные данные согласуются с теоретическими предсказаниями о деформации материала при распространении вглубь него тепловой волны.

Результаты, представленные в диссертации, **получены впервые** и обладают существенной **научной и практической ценностью**. Экспериментальные и теоретические исследования, выполненные в рамках работы, относятся к фундаментальным вопросам физики взаимодействия интенсивных потоков плазмы с поверхностью твердых тел, в связи с чем диссертация Аракчеева А.С. соответствует специальностям **01.04.08 – «физика плазмы»** и **01.04.07 – «физика конденсированного состояния»**.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научно-исследовательских институтах, ведущих исследования по программе УТС (НИЦ “Курчатовский институт”, НИЯУ МИФИ, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН), а также лабораториях, разрабатывающих и использующих мощные источники плазмы для решения научных и прикладных задач.

#### **Вопросы и замечания по работе, отмеченные ведущей организацией:**

1. При проверке результатов расчетов (охлаждения материала за счет испарения, формирования продольных и поперечных трещин) автор ссылается на экспериментальные данные, полученные на установке ВЕТА. В тексте диссертации было бы полезно более подробно описать как саму установку, так и ее возможности применительно к задаче моделирования условий эксплуатации обращенных к плазме материалов термоядерного реактора.

2. В ходе экспериментального исследования растрескивания вольфрама на установке ВЕТА показано, что измеренная задержка образования трещин как минимум на 2 порядка больше, чем время, за которое вольфрам возвращается в хрупкое состояние после

окончания нагрева. В тексте диссертации подробно описаны созданные автором теоретические модели, описывающие формирование продольных и поперечных трещин, однако указанный экспериментальный факт наличия задержки их образования никак не объясняется.

3. При теоретическом исследовании формирования перпендикулярных поверхности трещин (глава 3 диссертации) указывается, что в расчетах используются физические свойства вольфрама, произведенного по спецификациям ИТЭР. Однако в тексте работы нигде не упоминается, какие конкретно сорта вольфрама использовались для проверки теоретических моделей, в экспериментах на установке ВЕТА.

4. В разделе, где речь идет о моделировании эффекта парового экранирования, никак не учитывались особенности нагрева поверхности потоком плазмы, а именно – термоэлектронная эмиссия и формирование униполярных дуг. Как сильно указанные эффекты могут повлиять на результаты расчетов? Насколько результаты, полученные при тепловом воздействии на материал с помощью лазеров и электронных пучков, применимы к задачам облучению защитных покрытий мощными потоками плазмы в термоядерных установках?

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств диссертационной работы, оценивая которую в целом, следует отметить, что она выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует определяющий личный вклад автора в разработку обсуждаемых проблем. Полученные Аракчеевым А.С. результаты, опубликованы в виде статей в ведущих мировых рецензируемых журналах, докладывались на российских и международных конференциях и известны научной общественности. **Достоверность** результатов диссертации и сформулированных автором выводов обеспечивается использованием современных методов аналитического и численного анализа, а также – сопоставлением результатов расчетов с результатами, полученными в ходе лабораторных экспериментов на электронных пучках и плазменных ускорителях.

Аннотация полностью отражает содержание диссертации.

### **Заключение**

Диссертация Аракчеева А.С. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором лично разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики взаимодействия плазмы с материалами, позволяющее значительно улучшить представления о механизмах эрозии материалов под

действием интенсивных потоков тепла и частиц.

Представленная к рассмотрению диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.08 – физика плазмы и 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Научного совета Государственного научного центра Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, протокол № 2 от 24 марта 2021 г.

Отзыв составил:

начальник лаборатории плазмотоники

Отделения магнитных и оптических исследований,

кандидат физико-математических наук

Позняк Игорь Михайлович



*Игорь Позняк*

Позняк И.М.

30.03.2021

Ученый секретарь,

кандидат физико-математических наук

*А.А. Ежов*

Ежов А.А.

30.03.2021