

На правах рукописи

АРАКЧЕЕВ Алексей Сергеевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ, ИСПАРЕНИЯ И
ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН НА ВОЛЬФРАМЕ
ПРИ МОЩНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКЕ**

01.04.08 - физика плазмы

01.04.07 - физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный консультант:

Бурдаков Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

Будаев Вячеслав Петрович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, ведущий научный сотрудник.

Бурдовицин Виктор Алексеевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск, ведущий научный сотрудник.

Ляхов Николай Захарович – доктор химических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, главный научный сотрудник.

Ведущая организация: – Акционерное общество “Государственный научный центр Российской федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, г. Троицк.

Защита диссертации состоится «27» апреля 2021 г. в «14:00» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН и на сайте института http://inp.nsk.su/images/diss/Arakcheev_disser.pdf.

Автореферат разослан «17» февраля 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П. А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

На данный момент одним из самых проработанных и близких к осуществлению методом реализации управляемого термоядерного синтеза является магнитное удержание плазмы. Наибольшие успехи в получении требуемых параметров плазмы достигнуты в установках с магнитным полем на основе геометрии токамака. Ожидается, что одной из ключевых проблем таких установок станет устойчивость материалов стенки вакуумной камеры под воздействием потока плазмы из горячей зоны реактора и обратное влияние такого воздействия на плазму. На данный момент нет проекта плазмopриёмника, который сможет обеспечить долгосрочную работу реактора без значительной эрозии и деградации материала в предполагаемых условиях на стенке вакуумной камеры термоядерных установок следующего поколения (величина постоянной и импульсной тепловой нагрузки, поток частиц плазмы и нейтронов, степень доступности технологического обслуживания и другие). При этом с точки зрения эрозии материала наиболее опасными являются именно импульсные тепловые нагрузки, так как они вызывают перенос материала плазмopриёмников 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.

Степень разработанности темы исследований

В различных научных группах и организациях проводились теоретические и экспериментальные исследования механизмов эрозии материалов при плазменных нагрузках и различных воздействиях, моделирующих отдельные аспекты этих нагрузок. В большинстве исследований облучаемыми материалами были считающиеся перспективными материалы на основе графита, вольфрама, бериллия и жидких металлов. В последнее время самым перспективным материалом для принятия интенсивных плазменных нагрузок считается вольфрам. Под интенсивностью плазменной нагрузки мы будем понимать поток частиц и энергии. При относительно малой интенсивности исследования были направлены на изучение следующих механизмов эрозии: распыление материала, пе-

реосаждение распылённого материала, имплантация атомов из плазмы в материал, модификация поверхности и объёма материала и другие. В ходе экспериментов было обнаружено, что при повышении интенсивности нагрузки главными механизмами эрозии и переноса материала вместо распыления становятся испарение, плавление и механическое разрушение. В отличие от эрозии за счёт распыления, во время этих процессов происходят макроскопические изменения температуры и механических напряжений. Кроме того, все эти механизмы объединяет то, что основной их причиной является именно тепловая нагрузка при облучении материалов потоком плазмы. Для плавления и испарения это очевидно, а для механического разрушения было подтверждено в экспериментах, воспроизводящих только импульсную тепловую составляющую плазменной нагрузки. Поэтому данная диссертация посвящена именно изучению особенностей поведения материалов при мощных постоянных и импульсных тепловых нагрузках. В ходе исследований в различных научных группах и организациях были обнаружены и изучены различные явления, сопутствующие испарению, плавлению и механическому разрушению при мощных тепловых нагрузках: паровое экранирование, течение расплава и разлёт его капель, дробление материалов на пылевые частицы, образование трещин и другие. Некоторые эксперименты были направлены на непосредственное измерение устойчивости к ожидаемым нагрузкам, а некоторые — на исследование закономерностей при таких процессах. В результате таких работ было получено и опубликовано большое количество экспериментальных данных о поведении материалов при мощных плазменных нагрузках. Однако из-за большого количества аспектов нагрузки и диапазона её интенсивности, а также типов материалов, эти результаты, тем не менее, не могут претендовать на полноту описания взаимодействия плазмы с материалами в ожидающихся в перспективном термоядерном реакторе условиях. Особенно не хватает данных о динамике явлений при импульсной нагрузке из-за сложностей проведения экспериментов. Именно разработка экспериментальной диагностики для измерения динамики деформации материала в таких условиях представлена в диссертации.

Полноценное всестороннее теоретическое описание взаимодействия плазмы с материалами практически невозможно из-за большого разнообразия элементарных явлений, их сильно нелинейных взаимодействий и больших диапазонов характерных временных и пространственных масштабов. Поэтому подавляющее количество численных и аналитических теоретических исследований взаимодействия плазмы с материалами фокусируется на узком круге изучаемых процессов. Поэтому результаты большинства теоретических исследований можно рассматривать как ка-

ческую демонстрацию наличия эффекта и грубую количественную оценку его параметров в реальных условиях. Кроме того, проблемой для теоретических исследований является малое количество и низкая точность имеющихся данных о свойствах материалов при высоких температурах, растворённых примесях и других сопутствующих мощной плазменной нагрузке условиях. Различные разделы представляемых в диссертации теоретических исследований аналогично сфокусированы на описании отдельных явлений (паровое экранирование, охлаждение за счёт испарения, колебания поверхности расплава и механическое разрушение при импульсной тепловой нагрузке) и используют большой набор литературных источников для получения достаточного для вычисления количественных результатов набора данных о свойствах материала.

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. Для этого в диссертации решаются следующие задачи:

- построение численных и аналитических моделей и их использование для теоретического исследования испарения, плавления и механического разрушения материалов при импульсных тепловых нагрузках,
- создание специализированной станции рассеяния “Плазма” в бункере СИ ВЭПП-4 на источнике синхротронного излучения для реализации диагностики, позволяющей проводить экспериментальные исследования динамики деформаций в материале при импульсной тепловой нагрузке,
- проведение экспериментальных исследований динамики дифракции на монокристаллах вольфрама во время импульсной тепловой нагрузки и сразу после неё на станции рассеяния синхротронного излучения “Плазма” в бункере СИ ВЭПП-4,
- сравнение результатов теоретического исследования с экспериментальными результатами.

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.

- В простой одномерной модели продемонстрированы основные особенности парового экранирования. Благодаря прозрачности описания явления наглядно продемонстрировано, что совпадение с экспериментальными данными по поглощению энергии потока плазмы материалом обеспечивается тем, что оно определяется в основном термодинамическими свойствами материала, а не особенностями взаимодействия потока плазмы с газом.
- Теоретически и сравнением с экспериментальными данными показано, что при облучении электронным пучком с энергией частиц около 100кэВ охлаждение за счёт испарения материала вносит один из основных вкладов в баланс энергии.
- Проанализировано поведение капиллярных волн на поверхности расплава при импульсном нагреве для определения того, как судить о форме поверхности расплава во время облучения по форме затвердевшей поверхности.
- В одномерное описание деформации при импульсном нагреве добавлено корректное описание хрупко-вязкого перехода и упрочнения материала. В результате продемонстрировано, что энергетический порог образования трещин на произведённом по спецификациям ИТЭР вольфраме уменьшается при увеличении базовой (начальной) температуры до 1500°С из-за того, что предел текучести не становится значительно меньше предела прочности при нагреве.
- По геометрии деформации при импульсном нагреве получено, что армирование материала волокнами вдоль облучаемой поверхности не увеличивает энергетического порога образования трещин.
- Получены решения уравнений линейной теории упругости в области вокруг перпендикулярной поверхности трещины, появившейся в результате импульсного нагрева. В результате продемонстрировано, что после появления таких трещин рядом с ними появляются напряжения, которые могут приводить к образованию параллельных поверхности трещин, которые значительно опаснее для работы

термоядерной установки из-за ухудшения теплоотвода от поверхности.

Для проведения измерений деформации материала при импульсном нагреве была разработана диагностика на основе дифракции синхротронного излучения. Диагностика применяется только для микрокристаллических образцов, однако она позволила многократно улучшить временное разрешение по сравнению с классическим способом измерения механических напряжений в монокристаллах по рентгеновской дифракции. Основными особенностями разработанной диагностики являются возможность измерения с пространственным разрешением по глубине внутри материала и временное разрешение, позволяющее исследовать динамику характерных для термоядерных установок нагрузок на материалы. Такая диагностика реализована на станции рассеяния синхротронного излучения в бункере СИ ВЭПП-4.

Методология и методы исследования

В диссертации применяется теоретическое исследование с использованием уравнений теплопроводности, гидродинамики, механического равновесия упругой среды и уравнений Максвелла. Из специфических математических методов следует отметить применение модификации метода граничных интегральных условий и использование специальных функций (полилогарифмов). Экспериментальная часть диссертации основана на применении метода монокристаллической дифрактометрии с измерением динамики одномерным детектором во время импульсной тепловой нагрузки и остывания.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитическое выражение для уровня насыщения поверхностной плотности поглощенной материалом энергии потока плазмы. Показана сильно нелинейная связь уровня насыщения поверхностной плотности поглощенной материалом энергии и количества испаренного материала на единицу площади поверхности.
2. Обнаруженное при сравнении совпадение экспериментальных и теоретических данных о динамике размера расплавленной области при облучении вольфрама электронным пучком на установке ВЕТА свидетельствует о корректном учете охлаждения за счет испарения в теоретической модели.
3. Анализ поведения формы поверхности расплава при импульсном нагреве, которое определяет связь формы поверхности расплава во время облучения с формой затвердевшей поверхности.

4. Математическая модель деформаций и напряжений при импульсном нагреве, которая продемонстрировала уменьшение энергетического порога образования трещин на вольфраме, произведённом по спецификациям ИТЭР, при росте начальной температуры материала (от более $17 \text{ МДж/м}^2 \text{с}^{1/2}$ при комнатной температуре до менее $8 \text{ МДж/м}^2 \text{с}^{1/2}$ при 1500°C). Показано, что нехарактерное для вольфрама и вольфрамовых сплавов поведение вызвано близостью величин пределов прочности и текучести произведённого по спецификациям ИТЭР вольфрама в широком диапазоне температур, которая не даёт материалу перейти в пластическое состояние.
5. На основе решения задач теории упругости и пластичности в теле при импульсном нагреве показано, что смещения вдоль поверхности малы по сравнению с перпендикулярными смещениями как отношение толщины нагретой области к размеру облучаемой области. При такой структуре деформации армирование волокнами вдоль поверхности в такой же степени слабо влияет на энергетический порог образования трещин.
6. Решение задачи линейной теории упругости в полупространстве с перпендикулярной поверхности трещиной, образовавшейся после импульсного нагрева, с корректным учётом особой точки. На основе этого решения вычислены механические напряжения, приводящие к образованию параллельных поверхности трещин. Рассчитана форма поверхности рядом с перпендикулярной поверхности трещиной. На основе рассчитанной формы поверхности рядом с перпендикулярной поверхности трещиной предложена идея экспериментальных методик для определения наличия перпендикулярных и параллельных поверхности трещин по рассеяния лазерного излучения на деформированной поверхности и измерениям соотношения ширины трещины и высоты подъёма поверхности рядом с трещиной.
7. Методика измерения динамики распределения деформаций по глубине при импульсной тепловой нагрузке в монокристалле по рентгеновской дифракции. Методика основана на изменении угла рассеяния рентгеновского излучения в дифракционный максимум в результате деформации при тепловом расширении. Проведение экспериментов по этой методике на созданной станции рассеяния синхротронного излучения.

Степень достоверности и апробация диссертации

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.

Основные результаты по теме диссертации представлены в докладах на следующих конференциях:

1. 5th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2015), Julich, Germany, 7 – 9 October 2015.
2. Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR2016), 4-7 July 2016, Novosibirsk, Russia.
3. 11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016), 8–12 August 2016, Novosibirsk, Russia.
4. Symposium on Fusion Technology (SOFT2016), 5-9 September 2016, Prague, Czech Republic.
5. 26th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2016), 17–22 October 2016, Kyoto, Japan.
6. XIII Забабахинские научные чтения, 20 - 24 марта 2017, Снежинск, Россия.
7. International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (PSI2018), 17-22 June 2018, Princeton University, NJ, USA.
8. Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR2018), 25-28 June 2018, Novosibirsk, Russia.
9. 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2018), 27-31 August, 2018, Tsukuba, Japan.
10. 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2018), 22–27 October 2018, Gandhinagar, India.

11. XXII конференция “Взаимодействие плазмы с поверхностью”, 23 - 24 января 2019, Москва, Россия.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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. На данный момент ближайшей к запуску термоядерной установкой следующего поколения является ИТЭР (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor), строящийся в исследовательском центре Кадараш (Франция). Поэтому для большинства современных исследований взаимодействия плазмы с материалами по термоядерным задачам ожидаемые условия на стенке ИТЭР стали ориентиром условий, в которых исследуется поведение материалов. В частности, большинство исследований сейчас проводятся с вольфрамовыми образцами, так как материалом для самых нагруженных обращённых к плазме частей первой стенки (дивертора) в ИТЭР был выбран вольфрам. Затем объяснены причины возникновения значительных нагрузок в токамаках. Во-первых, поток плазмы истекает из токамаков и попадает на дивертор узким слоем из-за наличия сепаратрисы в закрытых магнитных системах. Во-вторых, в перспективных токамаках предполагается использовать режим удержания плазмы, сопряжённый с периодическими импульсными выбросами плазмы. Далее, перечислены установки и научные организации, в которых ведутся исследования взаимодействия термоядерной плазмы с материалами.

Дальнейшее изложение разделено на разделы по различным явлениям, важным при облучении материалов потоками плазмы в термоядерном реакторе: поглощение водорода, плавление, испарение и механическое разрушение. Поглощение материалами водорода и других атомов

плазмы встречается и в низкотемпературной плазме, но в термоядерных установках оно приобретает новые аспекты. В термоядерных реакторах дейтерий и тритий являются топливом, поэтому значительная потеря его в материале первой стенки недопустима для выполнения баланса вещества. Кроме того, есть требования на максимальное количество содержащегося в установке трития. Плавление, испарение и механическое разрушение связано с ростом интенсивности постоянной и импульсной тепловой нагрузки. Плавление и испарение являются механизмами, увеличивающими перенос вещества по сравнению с распылением при том же флюенсе, но большем времени облучения. Эти эффекты делают эрозию сильно нелинейной по интенсивности нагрузки. Механическое разрушение материалов, проявляющееся в виде образования трещин или дробления на пылевые частицы, может быть ещё опаснее для работы термоядерной установки, чем испарение и плавление, из-за в разы более низкого энергетического порога проявления эффекта. Механическое разрушение связано именно с импульсной тепловой нагрузкой. Основной его причиной является большой градиент температуры в поверхностном слое.

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 этом мы можем использовать хорошо известное выражение для определения температуры поверхности облучаемого материала:

$$T_s = \frac{1}{\sqrt{\pi C_p \rho \kappa}} \int_0^t \frac{q(t')}{\sqrt{t-t'}} dt', \quad (1)$$

где C_p , ρ и κ – теплоёмкость, плотность и теплопроводность материала мишени, соответственно, а $q(t)$ – тепловой поток, достигающий мишени. Темп испарения материала мишени в предлагаемых моделях задаётся следующим уравнением, определяющим темп испарения в вакуум:

$$\frac{dN}{dt} = j_0 e^{-E_{ev}/kT_s}, \quad (2)$$

где E_{ev} – энергия испарения материала, j_0 – предэкспоненциальный параметр и N – число испарившихся атомов с единицы площади поверхности. Для описания ослабления потока плазмы применялось три различные

модели:

$$q = q_0 e^{-N\sigma}, \quad (3)$$

где q_0 – исходный неослабленный поток энергии на поверхность мишени и σ – эффективное сечение торможения на газе,

$$q(t) = q_0 - \dot{E}_{rad} N(t), \quad (4)$$

где \dot{E}_{rad} – эффективная потеря энергии на одну частицу в газовом облаке и

$$W_{rad} = n_e n_i L_{rad} V, \quad (5)$$

где L_{rad} – функция охлаждения, n_i – концентрация излучающих ионов, n_e – концентрация электронов и V – объём газа. Для всех моделей ослабления энергии в потоке плазмы получено выражение для уровня насыщения E_{max} поглощённой мишенью энергии на единицу площади поверхности:

$$E_{max} \approx \sqrt{\frac{4C_p \rho \kappa}{\pi}} \frac{E_{ev}}{k} \frac{\sqrt{t_{pulse}}}{\Lambda}, \quad (6)$$

где Λ – логарифмическая функция (слабо меняющаяся в зависимости от используемой модели) от длительности облучения. Полученный результат количественно согласуется в экспериментальными результатами, полученными на установке МК-200 [1]. Выражение (6) показывает, что уровень насыщения поглощённой 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. Поэтому эта величина не может использоваться как критерий для оценки корректности численных моделей, задача которых заключается в вычислении количества испарённого материала.

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 согласно работе [2] с экспериментальными результатами, полученными на установке ВЕТА, использующей для воспроизведения импульсной тепловой нагрузки электронный пучок. В качестве величины для сравнения был выбран размер области расплава, так как на установке ВЕТА были сделаны достаточно точные измерения этой величины на стадии остывания [3]. На рисунке 1 представлено сравнение для расчёта без учёта охлаждения за счёт испарения и с ним. Результаты

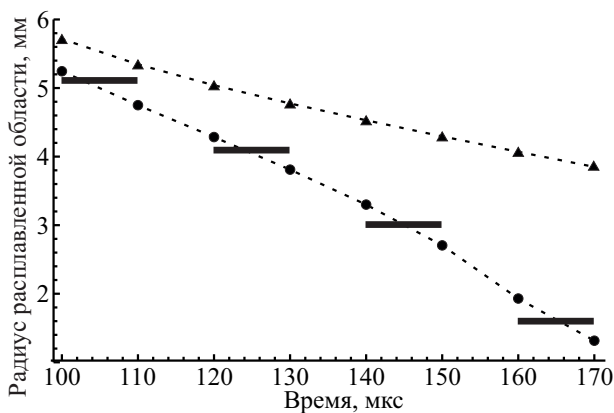


Рис. 1. Временная зависимость радиуса расплавленной области. Толстые линии: экспериментальные данные; треугольники: результат расчёта без учёта испарения; круги: результат расчёта с учётом охлаждения испарением.

демонстрируют, что охлаждение за счёт испарения может существенно влиять на баланс энергии при использовании электронного пучка для экспериментов по влиянию импульсной тепловой нагрузки на материалы.

Теоретическое исследование движения поверхности расплава проводилось для того, чтобы определить, на сколько меняется форма поверхности за время остывания материала после окончания облучения до затвердевания. Дело в том, что о происходивших во время облучения движениях расплава судят в том числе по форме затвердевшей поверхности, хотя за время до затвердевания могут происходить значительные изменения формы поверхности. Для расчёта этих изменений было использовано дисперсионное соотношение для капиллярных волн. По нему были получены зависимости периода колебания и времени затухания от длины волны. По профилограмме облучённого на установке ВЕТА образца была получена характерная величина 0.1 мкм остаточных возмущений затвердевшей поверхности с длиной волны около 20 мкм. В предположении, что динамика формы поверхности определяется только колебаниями и затуханием капиллярных волн, получено, что амплитуда возмущений с длиной волны 20 мкм в момент прекращения облучения должна была превышать 1 мм. Эта величина значительно превышает и длину волны, и

глубину расплава. То есть остаточные возмущения формы затвердевшей поверхности не могут быть объяснены генерацией возмущения только во время облучения. Для объяснения экспериментальных результатов требуется наличие явлений, приводящих к генерации возмущений поверхности расплава на стадии остывания или к замедлению их затухания.

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 [4]. То есть, материал нельзя считать абсолютно вязким или абсолютно пластичным, как это делалось в предыдущей версии вычислений [5].

Основное уравнение для расчёта деформации выводится из отсутствия смещений вдоль поверхности при её однородном облучении поверхности:

$$u(T, T_0) + \varepsilon_{xx}^e + \varepsilon_{xx}^p = 0, \quad (7)$$

где $u(T, T_0)$ – относительное линейное удлинение в результате теплового расширения при однородном нагреве до температуры T от температуры T_0 , ε_{ij}^e и ε_{ij}^p – упругая и пластическая части тензора деформации, x – координата вдоль поверхности. Для использования этого выражения упругую и пластическую деформацию нужно выразить через механические напряжения. Для упругой деформации выражение выводится из закона Гука, однородности вдоль поверхности и равенства нулю перпендикулярного поверхности напряжения:

$$\varepsilon_{xx}^e = \varepsilon_{yy}^e = \frac{1 - \nu(T)}{E(T)} \sigma_{xx}, \quad (8)$$

где ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, σ_{ij} – тензор напряжений. Выражение для пластической выводится из уравнения Холломона и предположений о том, что всестороннее сжатие не приводит к появлению пластической деформации и пластическая деформация не приводит к изменению удельного объёма:

$$\varepsilon_{xx}^p = - \left(\frac{\sigma_{zz}}{2K} \right)^{1/n}, \quad (9)$$

где n – показатель упрочнения и K – модуль пластичности. При остывании считается, что пластическая деформация не происходит до изменения знака напряжений. На рисунке 2 представлен пример результата вычисления динамики деформаций и напряжений при нагреве вольфрама, произведённого по спецификациям ИТЭР, от 0°C до 1500°C и остывании обратно. Будем считать, что трещины образуются, если при остывании растягивающие механические напряжения превысят предел прочности. По этому принципу был теоретически получен результат импульсного нагрева: появятся ли трещины (рисунок 3). На рисунке 3 ясно видно необычное поведение вольфрама, произведённого по спецификациям ИТЭР: при увеличении базовой температуры уменьшается энергетический порог образования трещин. Причиной такого поведения являются близкие при любой температуре пределы прочности и текучести. Кроме того, заметим, что из-за малости смещений вдоль поверхности при импульсном нагреве армирование волокнами, расположенными вдоль поверхности, не может изменить энергетический порог образования трещин. Позитивное влияние армирования материала такими волокнами может проявляться только в осложнении распространения трещин вглубь материала.

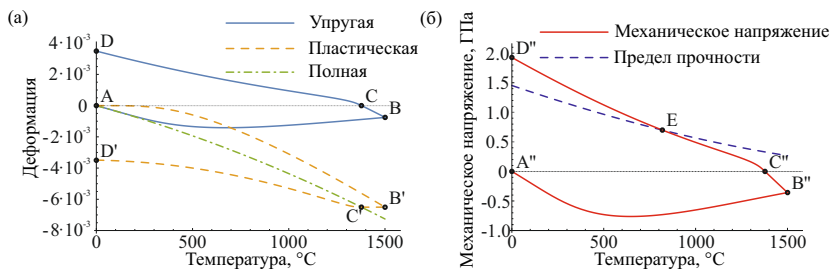


Рис. 2. Зависимости упругой и пластической деформации и механического напряжения (σ_{xx}) в отпущенном вольфраме, произведённом по спецификациям ИТЭР, при нагреве от $T_0 = 0^\circ\text{C}$ до $T_{max} = 1500^\circ\text{C}$ и обратном охлаждении. Отрезки АВ, АВ' и АВ'' – нагрев; ВС, В'С' и В''С'' – упругая стадия охлаждения; CD, C'D' и C''D'' – пластическая стадия охлаждения; E – разрушение. (а) Сплошная кривая – упругая деформация (ε_{xx}^e), пунктирная линия – пластическая деформация (ε_{xx}^p), штрих-пунктирная линия – суммарная деформация ($\varepsilon_{xx}^e + \varepsilon_{xx}^p$). (б) Сплошная линия – механическое напряжение (σ_{xx}), пунктирная линия – предел прочности.

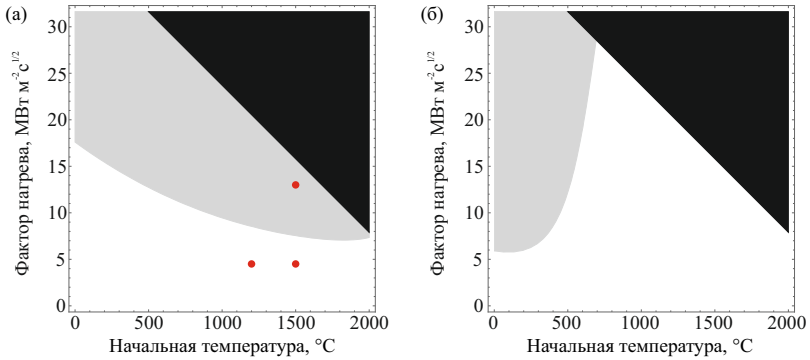


Рис. 3. Результат импульсного нагрева вольфрама, произведённого согласно спецификациям ИТЭР, после цикла нагрева-охлаждения в численном расчёте в зависимости от начальной температуры T_0 и коэффициента нагрева F . Серая область – образование трещин, чёрная область – отсутствуют данные о механических свойствах материала. Точки – параметры импульсной нагрузки в работе [6]. (а) Отпущенный вольфрам, (б) Отожжённый вольфрам.

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 уравне-

нию 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 облучавшейся 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 облучавшейся 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”. На рисунке 4 приведено сравнение результатов расчёта с измеренными данными. Хорошее

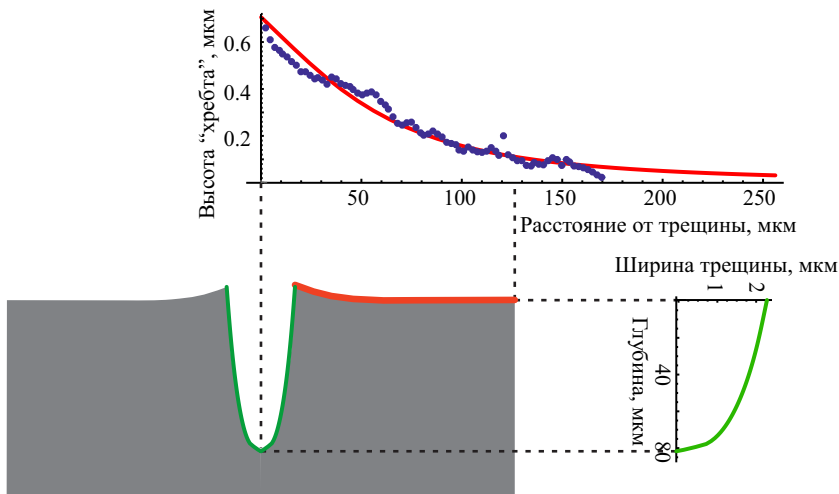


Рис. 4. Рассчитанная зависимость ширины трещины от расстояния до поверхности и высоты “хребта” от расстояния до трещины. Точки – экспериментальные данные.

совпадение теоретических и экспериментальных данных требует уточнения, что кроме использованных для расчёта параметров материала есть только два свободных параметра: глубина перпендикулярной поверхности трещины и величина импульсной тепловой нагрузки. Обе эти величины достаточно точно определимы. Вычисление распределения деформации является довольно трудоёмкой задачей, так как процедура включает в себя решение интегральных уравнений и применение интегральных преобразований. Однако удалось найти простое соотношение между компонентами деформации у трещины на поверхности. При вычислении деформации в этой точке аргумент ядра равен нулю, и поэтому ядро может быть вынесено из-под интеграла. Поэтому при вычислении отношения ширины трещины и высоты “хребта” интегралы сокращаются, и эта величина оказывается равна π . Полученный результат согласуется с экспериментальными данными, полученными при облучении вольфрамовых образцов на установке ВЕТА. При появлении параллельных поверхности трещин это отношение должно уменьшаться. На основе рассчитанных деформаций материала рядом с перпендикулярной поверхности трещиной были предложены диагностики для определения наличия перпендикулярных и параллельных поверхности трещин. В работе [7] описано применение рассеяния лазера на облучаемой поверхности для определения момента образования “хребтов”. В результате было обнаружена неожиданно большая задержка между импульсным нагревом и образованием трещин.

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 монокристал-

лическом образце. Изменение дифрактограммы во время импульсного нагрева при таком подходе происходит из-за поворота атомарной плоскости, на которой происходит рассеяние в дифракционный максимум (рисунок 5). Напомним, что по условию Вульфа-Брэгга угол падения синхротронного излучения на кристаллическую плоскость равен углу отражения в дифракционный максимум. Кроме того, заметим, что 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. На рисунке 6 приведена схема дифракции на облучаемом образце, приводящей к тому, что распределение 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

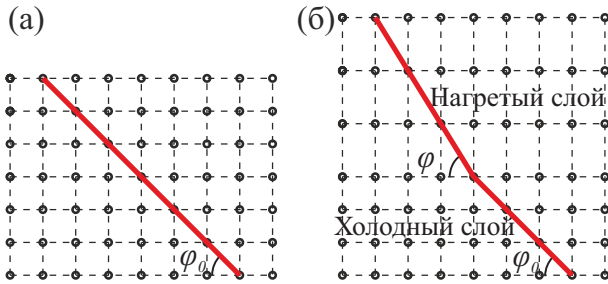


Рис. 5. Пояснительная картинка к геометрии поворота кристаллической плоскости при импульсной тепловой нагрузке. (а) образец до импульсной тепловой нагрузки; (б) образец с нагретой верхней половиной (нагрев со свободной поверхности сверху).

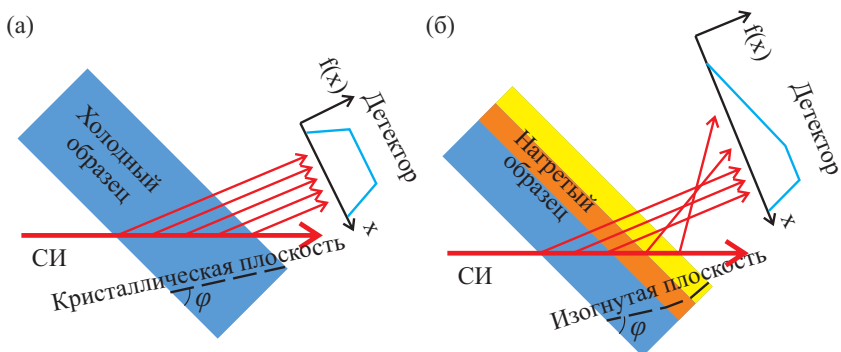


Рис. 6. Схематическое изображение дифракции в мозаичном монокристалле под воздействием импульсной тепловой нагрузки. (а) Дифракция до нагрева. (б) Дифракция во время импульсного нагрева.

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. Коэффициент поглощения для излучения с длиной волны 1064 нм на поверхности вольфрама составляет около 0.4. Чтобы избежать изменения коэффициента серости поверхности из-за окисления, импульсная тепловая нагрузка производилась только внутри вакуумной камеры при вакууме с давлением ниже 10 Па. Для ориентации образца был сделан держатель с тремя поступательными и двумя вращательными степенями свободы. Кроме того, вольфрамовые образцы толщиной 200 мкм зажимались по периметру для того, чтобы избежать изгиба.

Измерения динамики дифракционного пика 110 монокристалла вольфрама проводились на монокристалле с ориентацией поверхности (100) толщиной 200 мкм. Ориентация поверхности (100) выбрана для того, чтобы обеспечить наличие плоскости (110) под углом 45° к поверхности при отсутствии выделенного направления вдоль поверхности. На рисунке 7 показана динамика формы пика, а также его начальное и конечное состояния. Начальное состояние пика измеряли до импульсного нагрева, а конечное состояние измерялось по прошествии времени, достаточного для достижения теплового равновесия при комнатной температуре. Ширина исходного состояния дифракционного пика значительно превышает

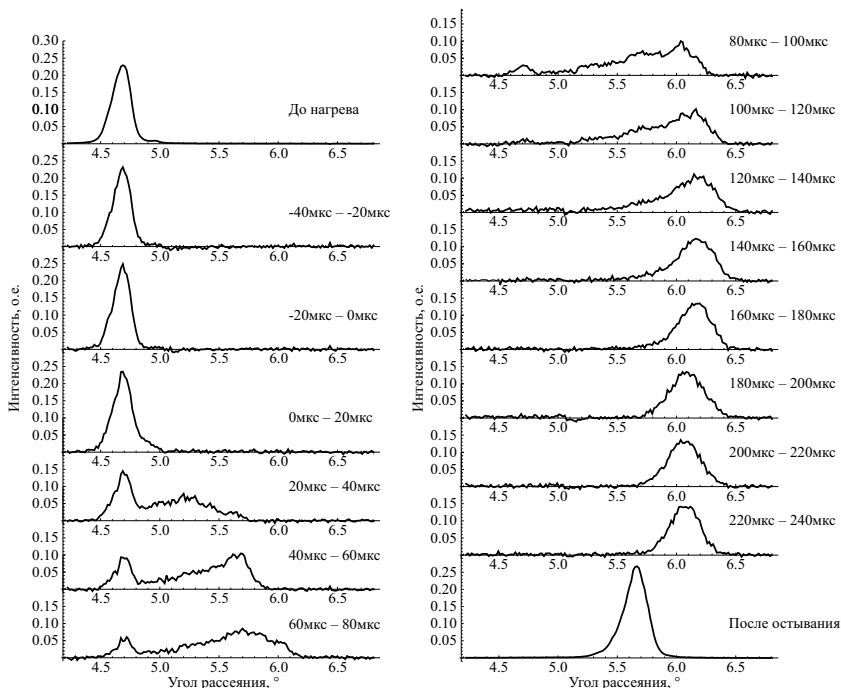


Рис. 7. Исходное состояние, конечное состояние и динамика дифракционного пика 110 от монокристаллического вольфрама с ориентацией (100) толщиной 200 мкм при импульсной тепловой нагрузке. Нагрев начался примерно в 0 мкс и завершился в 140 мкс.

угловой разброс исходного синхротронного излучения. Таким образом, в анализе результатов экспериментов последним можно пренебречь. 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, примерно от 0 мкс до 140 мкс (нагрев лазерным импульсом), температура поверхности растет, и толщина нагреваемого слоя увеличивается. Угол рассеяния рентгеновских лучей растет 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 рас-

пределении 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. Еще одной особенностью этого этапа является практически постоянное положение начального пика дифракции. Положение пика около 4.7° является результатом дифракции на монокристалле при начальной температуре. Поэтому, при уменьшении толщины слоя при начальной температуре из-за распространения теплового фронта амплитуда пика также уменьшается. Постоянство положения пика подтверждает отсутствие изгиба образца. Значит, все изменения формы дифракционного пика вызваны локальным вращением дифракционной плоскости атомной решетки. 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. По качественной оценке, изогнутый образец должен просто увеличить угловой разброс рассеянного синхротронного излучения. Выравнивание распределения температуры перпендикулярно поверхности происходит на втором этапе (приблизительно с 140 мкс до 240 мкс). В начале выравнивания распределение 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.

Было сделано еще два нагревательных импульса. Динамика формы дифракционного пика была похожа на динамику при первом нагреве. Был более примечательный момент изменения окончательных форм и положений дифракционных пиков после второго и третьего импульсов. Устойчивый сдвиг в сторону больших углов рассеяния после каждого импульса означает, что каждый импульс приводит к увеличению пластического сжатия вдоль поверхности. Зависимость остаточной деформации от глубины приводит к уширению дифракционного пика. Очевидно, что длительности импульсного нагрева (~ 140 мкс) недостаточно для достижения пластической деформации, соответствующей максимальной достигнутой температуре. Поэтому ранее использовавшийся подход статических расчетов пластической деформации [5, 9] не распространяется на достаточно короткие импульсные процессы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Для теоретического описания парового экранирования при воздействии потока плазмы на материал сформулирована одномерная модель. С её помощью получено выражение для уровня насыщения поглощённой материалом энергии на единицу площади. Результаты расчётов хорошо согласуются с экспериментальными результатами установки МК-200. Аналитическими вычислениями показано, что уровень насыщения поглощённой материалом энергии на единицу площади в основном определяется только термодинамическими свойствами и скоростью испарения материала и слабо зависит от деталей механизмов потери энергии потока плазмы в паровом слое. Поэтому уровень насыщения поглощённой материалом энергии хорошо воспроизводится при теоретических вычислениях и измерениях в экспериментах. С другой стороны, этот уровень оказывается связан с количеством испарённого вещества через параметры

взаимодействия потока плазмы с газом над поверхностью, которые известны значительно хуже, чем термодинамические свойства материалов. Следовательно, уровень насыщения поглощённой материалом энергии не может использоваться для проверки более сложных кодов для моделирования взаимодействия потока плазмы с материалами. Тем более, если основной интересующей характеристикой результата импульсной плазменной нагрузки является количество испарённого материала

2. Численными расчётами показано, что охлаждение за счёт испарения существенно влияет на динамику температуры материала. Сравнение результатов расчётов с измеренной в эксперименте на установке ВЕТА динамикой размера расплавленной области подтверждает справедливость использовавшейся модели учёта охлаждения за счёт испарения. При росте интенсивности потока плазмы охлаждение за счёт испарения может стать значимым для исследования не только импульсной тепловой нагрузки электронным пучком, но и для случая импульсной плазменной нагрузки.
3. Для анализа формы затвердевшей после плавления поверхности теоретически получены характерные времена колебаний и затухания капиллярных волн на расплаве вольфрама при импульсном нагреве на установке ВЕТА. С помощью полученных характерных времён затухания показано, что имеющиеся на затвердевшем расплаве неровности не могли образоваться во время облучения. Соответственно, есть механизмы и кроме неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, приводящие к образованию возмущения формы поверхности расплава.
4. Проведены теоретические расчёты динамики деформации и напряжений в материале при импульсной тепловой нагрузке с учётом упрочнения материала и “бесшовным” переходом из хрупкого состояния в вязкое. С их помощью показано, что энергетический порог образования трещин на произведённом по спецификациям ИТЭР вольфраме уменьшается при росте базовой (начальной) температуры материала. Такое необычное поведение объясняется близкими при любой температуре пределами прочности и пластичности. Сделана оценка снизу параметров пластичности материала, гарантирующая отсутствие хрупкого разрушения при импульсной тепловой нагрузке. Кроме того, по структуре деформации показано,

что армирование материала волокнами вдоль поверхности не может увеличить энергетический порог образования трещин.

5. В рамках линейной теории упругости решена задача расчёта деформаций и напряжений в области вокруг перпендикулярной поверхности трещины, появившейся в результате импульсной тепловой нагрузки. Для этого задача сведена к интегральному уравнению Фредгольма первого рода, которое поддаётся численному решению. Численные расчёты показали, что после образования перпендикулярной поверхности трещины появляются механические напряжения, которые могут приводить к образованию и распространению параллельных поверхности трещин. Теоретически объяснён подъём поверхности рядом с перпендикулярными поверхности трещинами и вычислено отношение высоты подъёма к ширине трещины. Продемонстрировано совпадение рассчитанной формы поверхности вокруг перпендикулярной поверхности трещины с измеренными профилограммами вольфрама, облученного на установке ВЕТА. На основе полученных теоретических данных о деформации в области вокруг перпендикулярной поверхности трещины предложены экспериментальные методики определения по форме поверхности момента образования перпендикулярных поверхности трещин и наличия параллельных поверхности трещин под поверхностью без разрушения образца.
6. Предложена методика измерения динамики распределения деформаций по глубине при импульсной тепловой нагрузке на монокристаллы на основе рентгеновской дифрактометрии. Для её реализации создана станция рассеяния синхротронного излучения "Плазма" в бункере СИ ВЭПП-4. На станции ней измерена динамика дифракции во время импульсной тепловой нагрузки. Полученные результаты качественно согласуются с теоретическими предсказаниями о деформации при импульсном нагреве. Измерения дифракции между импульсными нагревами показали, что при длительности облучения порядка 100 мкс требуется несколько импульсов для достижения финальной величины остаточной деформации и напряжений. Соответственно, при такой длительности нагрева нельзя использовать предположение, что пластическая деформация соответствует равновесному состоянию при мгновенном распределении температуры.

В приложении А представлена процедура вычисления вспомогательного интеграла

$$\int_0^{\infty} g_1(\beta) \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n A_{n,m} \text{Li}_{-n}(\alpha\beta) \ln^m(\alpha\beta) d\beta, \quad (10)$$

где Li – полилогарифм.

В приложении Б представлена процедура вычисления вспомогательного интеграла

$$\int_0^{\infty} g_1(\beta) \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n A_{n,m} \text{Li}_{-n}(-\alpha\beta) \ln^m(\alpha\beta) d\beta. \quad (11)$$

В приложении В представлено доказательство справедливости формулы

$$\sum_{i=0}^n C_n^i \text{Li}_{-i}(x) \text{Li}_{-(n-i)}(y) = \frac{y \text{Li}_{-n}(x) - x \text{Li}_{-n}(y)}{x - y}. \quad (12)$$

Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 публикациях, 12 из которых изданы в журналах, рекомендованных в ВАК:

1. Skovorodin D.I., Pshenov A.A., Arakcheev A.S., Eksaeva E.A., Marenkov E.D., Krasheninnikov S.I. Vapor shielding models and the energy absorbed by divertor targets during transient events // Phys. Plasmas. – 2016. – Vol. 23. – P. 022501.
2. Arakcheev A.S., Apushkinskaya D.E., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Kurkuchekov V.V., Lazareva G.G., Maksimova A.G., Popov V.A., Snytnikov A.V., Trunev Yu.A., Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N. Two-dimensional numerical simulation of tungsten melting in exposure to pulsed electron beam // Fusion Eng. Des. – 2018. – Vol. 132. – P. 13-17.
3. Arakcheev A.S., Chernoshtanov I.S., Popov V.A., Shoshin A.A., Skovorodin D.I., Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N., Bataev I.A., Bataev V.A. Shape evolution of surface molten by electron beam during cooling stage // Fusion Eng. Des. – 2018. – Vol. 128. – P. 154-157.
4. Lazareva G.G., Arakcheev A.S., Vasilyev A.A., Maksimova A.G. Numerical simulation of tungsten melting under fusion reactor-relevant high-power pulsed heating // Smart Innovation, Systems and

Technologies (International Conference on 50 years of the development of grid-characteristic method). – 2019. – Vol. 133. – P. 41-51.

5. Arakcheev A.S., Huber A., Wirtz M., Sergienko G., Steudel I., Burdakov A.V., Coenen J.W., Kreter A., Linke J., Mertens Ph., Shoshin A.A., Unterberg B., Vasilyev A.A. Theoretical investigation of crack formation in tungsten after heat loads // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – Vol. 463. – P. 246-249.
6. Arakcheev A.S., Skovorodin D.I., Burdakov A.V., Shoshin A.A., Polosatkin S.V., Vasilyev A.A., Postupaev V.V., Vyacheslavov L.N., Kasatov A.A., Huber A., Mertens Ph., Wirtz M., Linsmeier Ch., Kreter A., Lowenhoff Th., Begrambekov L., Grunin A., Sadovskiy Ya. Calculation of cracking under pulsed heat loads in tungsten manufactured according to ITER specifications // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – Vol. 467. – P. 165–171.
7. Arakcheev A.S., Burdakov A.V., Huber A., Kasatov A.A., Kreter A., Linsmeier Ch., Lowenhoff Th., Mertens Ph., Shoshin A.A., Skovorodin D.I., Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N., Wirtz M. Modeling of crack formation after pulse heat load in ITER-grade tungsten // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – Vol. 1771. – P. 060010.
8. Vasilyev A.A., Arakcheev A.S., Bataev I.A., Bataev V.A., Burdakov A.V., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Kurkuchekov V.V., Mekler K.I., Popov V.A., Shoshin A.A., Skovorodin D.I., Trunev Yu.A., Vyacheslavov L.N. In-situ imaging of tungsten surface modification under ITER-like transient heat loads // *Nucl. Mater. Energy.* – 2017. – Vol. 12. – P. 553-558.
9. Arakcheev A.S., Arakcheev S.A. Solution to Force Problem of Linear Elasticity Theory for Quarter Space with Edge-uniform Forces // *Journal of Applied and Theoretical Physics Research.* – 2018. – Vol. 2, N 2. – P. 5–12.
10. Vyacheslavov L.N., Arakcheev A.S., Bataev I.A., Burdakov A.V., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Kurkuchekov V.V., Popov V.A., Shoshin A.A., Skovorodin D.I., Trunev Yu.A., Vasilyev A.A. Diagnostics of the dynamics of material damage by thermal shocks with the intensity possible in the ITER divertor // *Phys. Scr.* – 2018. – Vol. 93. – P. 035602.

11. Arakcheev A.S., Arakcheev S.A., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Kurkuchekov V.V., Lazareva G.G., Maksimova A.G., Mashukov V.I., Popov V.A., Trunev Yu.A., Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N. On the mechanism of surface-parallel cracks formation under pulsed heat loads // Nucl. Mater. Energy. – 2019. – Vol. 20. – P. 100677.
12. Vasilyev A.A., Arakcheev A.S., Burdakov A.V., Bataev I.A., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Kurkuchekov V.V., Popov V.A., Shoshin A.A., Trunev Yu.A., Vyacheslavov L.N. Continuous laser illumination for in situ investigation of tungsten erosion under transient thermal loads // Fusion Eng. Des. – 2019. – Vol. 146(B). – P. 2366-2370.
13. Arakcheev A.S., Shmakov A.N., Sharafutdinov M.R., Tolochko B.P., Popov V.A., Shoshin A.A., Vasilyev A.A., Skovorodin D.I., Polosatkin S.V., Burdakov A.V., Bataev I.A., Bataev V.A. Modeling of plasma interaction with first wall in fusion reactor – measuring residual mechanical stresses in tungsten after irradiation at GOL-3 facility // J. Struct. Chem. – 2016. – Vol. 57. – P. 1314-1320.
14. Arakcheev A.S., Ancharov A.I., Aulchenko V.M., Bugaev S.V., Burdakov A.V., Chernyakin A.D., Evdokov O.V., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Koidan V.S., Kosov A.V., Khripunov B.I., Kurkuchekov V.V., Piminov P.A., Polosatkin S.V., Popov V.A., Sharafutdinov M.R., Shekhtman L.I., Shmakov A.N., Shoshin A.A., Skovorodin D.I., Skovorodin I.N., Tolochko B.P., Trunev Y.A., Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N., Zhulanov V.V. Applications of synchrotron radiation scattering to studies of plasma facing components at Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Centre // AIP Conf. Proc. – 2016. – Vol. 1771. – P. 060003.
15. Arakcheev A.S., Ancharov A.I., Aulchenko V.M., Bugaev S.V., Burdakov A.V., Chernyakin A.D., Evdokov O.V., Kasatov A.A., Kosov A.V., Piminov P.A., Polosatkin S.V., Popov V.A., Sharafutdinov M.R., Shekhtman L.I., Shmakov A.N., Shoshin A.A., Skovorodin D.I., Tolochko B.P., Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N., Zhulanov V.V. Status of dynamic diagnostics of plasma material interaction based on synchrotron radiation scattering at the VEPP-4 beamline 8 // Phys. Procedia. – 2016. – Vol. 84. – P. 184-188.
16. Arakcheev A.S., Aulchenko V.M., Balash I.I., Burdakov A.V., Chernyakin A.D., Dokutovich V.A., Evdokov O.V., Kasatov A.A.,

- Kazantsev S.R., Kosov A.V., Popov V.A., Sharafutdinov M.R., Shekhtman L.I., Shoshin A.A., Tolochko B.P., Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N., Vaigel L.A., Zhulanov V.V. Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load // *J. Synchrotron Radiat.* – 2019. – Vol. 26, N 5. – P. 1644-1649.
17. Arakcheev A., Aulchenko V., Kudashkin D., Shekhtman L., Tolochko B., Zhulanov V. Development of a silicon microstrip detector with single photon sensitivity for fast dynamic diffraction experiments at a synchrotron radiation beam // *J. Instrum.* – 2017. – Vol. 12. – P. C06002.

Список литературы

- [1] Arkhipov N., Karelou S., Poznyak I. et al. Experimental study of tungsten impurity formation and it's dynamics under condition relevant to transient events in ITER // *Proceedings of the 39th International Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion in Zvenigorod, 06-10 February 2012.*
- [2] Popov V.A., Arakcheev A.S., Burdakov A.V. et al. Theoretical modeling of shielding for plasma flow and electron beam heating // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – Vol. 1771. – 060009.
- [3] Vasilyev A.A., Arakcheev A.S., Bataev I.A. et al. In-situ imaging of tungsten surface modification under ITER-like transient heat loads // *Nucl. Mater. Energy.* – 2017. – Vol. 12. – P. 553-558.
- [4] Davis J.W., Smith P.D. ITER material properties handbook // *J. Nucl. Mater.* – 1996. – Vol. 233. – P. 1593-1596.
- [5] Arakcheev A.S., Huber A., Wirtz M. et al. Theoretical investigation of crack formation in tungsten after heat loads // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – Vol. 463. – P. 246-249.
- [6] Loewenhoff Th., Linke J., Pintsuk G. et al. ITER-W monoblocks under high pulse number transient heat loads at high temperature // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – Vol. 463. – P. 202-205.
- [7] Vyacheslavov L.N., Arakcheev A.S., Bataev I.A. et al. Diagnostics of the dynamics of material damage by thermal shocks with the intensity possible in the ITER divertor // *Phys. Scr.* – 2018. – Vol. 93. – P. 035602.

- [8] Shmakov A.N. High precision X-ray diffraction studies of polycrystalline materials on synchrotron radiation. // J. Struct. Chem. – 2012. – Vol. 53. – P. S133-S149.
- [9] Arakcheev A.S., Skovorodin D.I., Burdakov A.V. et al. Calculation of cracking under pulsed heat loads in tungsten manufactured according to ITER specifications // J. Nucl. Mater. – 2015. – Vol. 467. – P. 165–171.