

**УТВЕРЖДАЮ.**Директор Института физики прочности  
и материаловедения СО РАН  
доктор технических наук

Колубаев Е.А.

« 13 » января 2025 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации - Института физики прочности и материаловедения СО РАН о диссертационной работе Черепанова Д.Е. «Экспериментальные методы исследования повреждения термическими ударами материалов первой стенки термоядерных реакторов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук диссертационная работа Черепанова Д.Е. посвящена одной из наиболее современных и чрезвычайно важных для науки и техники проблем, связанных с материаловедческой стороной обеспечения устойчивости процессов термоядерного синтеза на установках типа ТОКАМАК. **Актуальность** этой тематики не вызывает сомнения, поскольку устойчивость процесса термоядерного синтеза требует материалов, способных, хотя бы кратковременно, выдерживать рабочие температуры плазмы до  $10^8$  К. Таким образом, вопросы устойчивого протекания процессов термоядерного синтеза в таких установках практически полностью определяются выбором материалов для первой стенки реактора, что представляет собой принципиально сложную многофакторную материаловедческую задачу, решение которой не может быть простым.

По аргументированному мнению автора ключевым для решения такой задачи условием явился системный подход, основанный на аттестации материалов первой стенки термоядерного реактора по уровню остаточных микро- и макронапряжений, возникающих при термическом ударе. Не требуя использования разрушающих методов контроля, этот подход обнаружил свою эффективность, поскольку микро- и макронапряжения могут измеряться рентгеноструктурным методом, и позволяют выявить физическую причину разрушения теплового

экрана. Реализация такого подхода потребовала создания методики определения остаточных напряжений, выяснения связи этих напряжений со структурными показателями и механическими факторами и обоснования возможностей и путей управления ими.

Эти задачи, которые, как нетрудно видеть из текста диссертационной работы, соискателю удалось решить на достаточно высоком научном и инженерно-техническом уровнях, определили актуальность диссертационного исследования Черепанова Д.Е.

Представленная к защите диссертационная работа Черепанова Д.Е. включает в себя **Введение**, четыре оригинальные **Главы**, **Список литературы** из 119 наименований, **Заключение** и **Списки** включенных в текст рисунков и таблиц.

Во **Введении** автор знакомит с общим состоянием решаемой проблемы, дает общую характеристику диссертационной работы, обосновывает актуальность выбранной темы исследования, формулирует цели и задачи исследования, описывает новые научные результаты, полученные при выполнении работы, определяет ее практическую значимость и представляет Основные положения, выносимые на защиту. Отметим как сильную сторону работы то обстоятельство, что соискатель хорошо ориентируется в научной литературе и цитирует ее с необходимым уровнем критицизма, что, конечно, повышает общий научный уровень диссертации.

**Глава 1. «Описание установки БЕТА и in situ диагностических систем для характеристики нагрева и деформации образцов»** содержит описание экспериментальной установки, на которой изучалась исследуемая автором проблема. В ней проведен анализ современного состояния высокоразвитых динамических методов измерения температур, характерных для термоядерного синтеза, а также приведены данные о структурах и свойствах используемых материалов и методах их экспериментального исследования.

**Глава 2. «Экспериментальное изучение деформации вольфрама во время термических ударов»** посвящена детальному описанию результатов оценки внутренних напряжений и остаточных деформаций, возникающих в

вольфраме при импульсном нагреве. Здесь также проанализированы формы существующих зависимостей прочностных и пластических характеристик вольфрама от величины генерируемых термических напряжений и изучены морфологические закономерности разрушения вольфрама при импульсном нагреве с высокой скоростью. Обнаружены и изучены причинно-следственные связи между свойствами и структурой разрушения (фрактографией) вольфрама.

**Глава 3 «Описание лазерного стенда и реализованных на нем *in situ* диагностических систем для характеристики нагрева и модификации облучаемой поверхности образцов»** представляет особенный интерес для широкого круга исследователей в области термоядерного синтеза, так как в ней детально описана разработанная автором экспериментальная установка (стенд) для непосредственного проведения исследований процессов импульсного нагрева материалов. Не лишне будет отметить в этом случае общенаучную значимость описания установки, возможные применения которой выходят за рамки диссертационного исследования и могут оказаться важными и полезными также для многих исследований в области физики высоких температур.

**Глава 4 «Экспериментальное изучение повреждения высокотемпературной керамики во время термических ударов»** посвящена вопросам оценки режимов работы и работоспособности керамических материалов (карбид бора,  $B_4C$ ) и условий применимости изделий из него в термоядерных реакторах. В тексте этой главы автором намечены пути управления свойствами перспективной карбидной керамики за счет оптимизации ее микроструктуры.

В **Заключении** ясно и четко сформулированы результаты и выводы работы, которые, безусловно, следует считать новыми.

В целом диссертационная работа написана ясно и логично, ее разделы тесно увязаны друг с другом, что позволяет сделать заключение о высоком профессионализме автора, понимании им тенденций современной науки о деформации материалов в импульсных температурных полях и умении ставить и решать сложные экспериментальные задачи. Положения, выносимые автором на защиту, и пункты **Заключения** по диссертации обоснованы и доказаны. Выводы и

заклучения как по частным вопросам исследований, так и в целом, выглядят надежными и обоснованными, причем эта обоснованность в ряде случаев подкреплена численными оценками измеряемых параметров процессов, сделанными на основе предложенных физических моделей.

Характеризуя качество текста диссертации Черепанова Д.Е. в целом, необходимо отметить четкость изложения научных проблем и полученных автором результатов, логичность рассуждений автора, грамотное использование научной терминологии и минимальное применение практически неизбежных жаргонизмов. Все это делает рецензируемую работу ясной в изложении и достоверной по получаемым результатам.

**Научная новизна** защищаемой диссертации неоспорима. Как ясно из материалов диссертации, впервые в мировой практике автору удалось предложить методику оценки остаточных напряжений в вольфрамовых пластинах при импульсном нагреве и проверить ее применимость. Кроме того, автору удалось разработать оригинальную методику мониторинга эрозии поверхности керамики при импульсном ее нагреве. Успешное решение этих задач подчеркивает, что диссертант вырос до уровня опытного специалиста в данной области, и ему по плечу решение любых экспериментальных задач, в том числе, очевидно, и более высокой степени сложности.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы Черепанова Д.Е. также не вызывает сомнений. Разработка алгоритмов оценки деформации вольфрама и керамических материалов в неоднородных импульсных температурных полях далеко выходит за рамки представленной диссертационной работы и представляет собой самостоятельную научную ценность. Естественно, полученное в диссертации описание поведения первой стенки термоядерного реактора важно непосредственно для современной энергетики. Однако вне всякого сомнения полученные данные могут быть также весьма полезны при разработке высокотемпературной керамики в связи с ее структурой и свойствами. Исследование закономерностей деформации такого металла как вольфрам открывает пути к его использованию во многих критических технологиях.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики** определяется тем, что направление исследований в диссертационной работе полностью соответствует п. 1 «Изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально новых приборов и методов экспериментальной физики», п. 2. «Разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений», и п. 3. «Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики» паспорта данной специальности.

**Замечания** по диссертационной работе Черепанова Д.Е.

1. В качестве основного замечания приходится отметить несколько примитивные представления диссертанта о структуре и свойствах дефектов кристаллического строения, в частности, дислокаций. Представляется, что для уверенного использования этого понятия недостаточно было ознакомиться с его описанием в рамках теории упругости, данным А.М. Косевичем в курсе теоретической физики Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшица [90], а следовало бы воспользоваться более подробными монографиями, посвященными теории дислокаций (см., например, Ж. Фридель «Дислокации» и Дж. Хирт, И. Лоте «Теория дислокаций»), или, наконец, с написанной на основе главы в [90] подробной книгой А.М. Косевича «Дислокации в теории упругости». Это позволило бы диссертанту использовать более универсальные и реалистичные представления о дислокациях в кристаллах.

2. Представляется, что отсутствие в диссертации ясно выделенного литературного обзора, который мог бы проиллюстрировать положение, занимаемое настоящим исследованием в общем корпусе решаемых смежных задач, несколько затрудняет чтение и рецензирование диссертационной работы.

3. Обязательный раздел общей характеристики работы «Степень достоверности результатов» (автореферат, стр. 7) изложен неаргументировано и фактически

содержит лишь минимум необходимой информации, касающейся этой принципиально важной характеристики диссертационной работы Черепанова Д.Е. В то же время в тексте диссертации содержатся многочисленные указания на достоверность получаемых результатов, которые нетрудно и очень полезно было бы использовать с этой целью.

### **Заключение по диссертационной работе**

Приведенные замечания не затрагивают существа добротного и детально выполненной на высоком научном уровне работы и не снижают ценности и надежности полученных в ней результатов. Они подчеркивают сложность и многогранность проблемы, избранной соискателем для разработки.

По научной и практической ценности и своему уровню рассматриваемая диссертация соответствует пункту II. 9 Положения о присуждении ученых степеней и может быть квалифицирована как выполненная на высоком научном уровне научно-квалификационная работа, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний.

Диссертация представляет собой научное достижение в области создания материалов для новой ответственной техники. Автореферат и публикации автора в полной мере отражают содержание диссертации, а ее автор Черепанов Дмитрий Евгеньевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составил советник директора  
Института физики прочности  
и материаловедения СО РАН,  
заведующий лабораторией физики прочности,  
доктор физ.-мат. наук, профессор



Зуев Лев Борисович

Отзыв заслушан и обсужден на заседании Физического семинара Института физики прочности и материаловедения СО РАН 25.12.2024 г. Протокол № 647.