

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Повзнера Александра Александровича на диссертационную работу Смирнова Алексея Лельевича на тему: «Теплофизические свойства твердых сплавов систем цирконий-ниобий и никель-ванадий при высоких температурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

1. Актуальность темы исследования

Цели и задачи рассматриваемой работы вытекают из стратегических задач развития энергетики РФ, сформулированных в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года. Важным аспектом работ, вытекающим из сформулированной стратегии, является разработка новых эффективных материалов атомной энергетики и теплоэнергетики.

Постановка задач данного диссертационного исследования связана с отсутствием систематических данных о теплофизических свойствах группы сплавов переходных металлов, к которым относятся конструкционные материалы изделий, используемых в активных зонах ядерных реакторов (Zr-Nb), и сплавов перспективных для применения в газотурбинных установках (Ni-V). Устранение этого пробела представляется важным для дальнейшего проектирования энергоустановок. При этом возникает необходимость развития фундаментальных представлений о механизмах переноса и накопления тепла в данной группе материалов, и о влиянии на их теплофизические свойства атомной структуры и химического состава.

Таким образом тема диссертационной работы А. Л. Смирнова, посвященной всестороннему исследованию комплекса высокотемпературных теплофизических свойств сплавов систем цирконий-ниобий и никель-ванадий является актуальной.

2. Научная новизна полученных результатов

В диссертационном исследовании изучен комплекс теплофизических свойств перспективных для энергетики систем цирконий-ниобий и никель-ванадий.

1. На основе проведенной модернизации измерительных установок, получены новые экспериментальные данные о температуропроводности, теплоемкости, тепловом расширении и удельном электрическом сопротивлении сплавов цирконий-ниобий и никель-ванадий.

2. Полученные с использованием динамических методов сведения о теплофизических свойствах позволили установить влияние субмикро- и нанокристаллических (СНК) структур на теплофизические свойства сплавов цирконий-ниобий, которое как оказалось, весьма заметно проявляется при малых концентрациях ниобия.

3. Подтверждено, что доминирующим механизмом переноса тепла в изученных материалах является электронный.

4. Установлено сильное влияние термообработки на теплофизические свойства интерметаллидных фаз в Ni-V, тогда как твердые растворы ведут себя типично для переходных металлов.

5. Показано, что температурные зависимости электросопротивления и температуропроводности твердых растворов качественно верно описываются моделью Мотта.

3. Обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации

Достоверность и обоснованность результатов диссертации, обеспечиваются корректной постановкой задач исследования, использованными методами их решения, применением высокоточного экспериментального оборудования, сравнением с данными других экспериментальных и теоретических исследований, использованием высокоэффективных современных методов математической обработки экспериментальных данных.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Результаты проведенных исследований образцов Zr-Nb и Ni-V имеют научно-практическую значимость, поскольку вносят ощутимый вклад в формирование надежной справочной базы по теплофизическим свойствам перспективных для энергетики материалов.

Учет полученных экспериментальных результатов представляется важным для разработки новых функциональных материалов ядерной и тепловой энергетики.

Полученные экспериментальные результаты существенно расширяют фундаментальный аспект представлений о накоплении и переносе тепла в сплавах переходных металлов при высоких и средних температурах, а также вблизи температуры плавления.

5. Оценка содержания диссертации и ее оформления

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, двух приложений. Она изложена на 133 страницах, содержит 10 таблиц, 46 рисунков и 100 наименований цитируемой литературы.

Текст диссертации написан достаточно последовательно и логично в соответствие с требованиями, предъявляемыми к научно-квалификационным работам.

Во введении сформулированы актуальность диссертационного исследования, степень ее разработанности, объект и предмет исследования, цель и задачи работы, методология и методы исследования, научные положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных результатов, научная новизна, теоретическая и практическая значимость

результатов работы, соответствие паспорту специальности 1.3.14, описаны апробация результатов и личный вклад автора.

В первой главе обсуждается имеющаяся информация о физических свойствах циркония, ниобия, никеля и ванадия, а также о фазовых равновесиях в бинарных системах цирконий-ниобий и никель-ванадий. На основе проведенного анализа известных из литературы результатов формулируются цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе описана экспериментальная база планируемого исследования температуропроводности, удельного электросопротивления, теплоемкости и теплового расширения при высоких температурах. Обсуждается метод температурных волн и его динамическая модификация.

Рассмотрена выполненная модернизация автоматизированного комплекса определения температуропроводности, и разработанное программное обеспечение. Обсуждается вопрос об оценке погрешностей определения теплофизических свойств.

Третья глава диссертации посвящена результатам исследований теплофизических свойств системы цирконий-ниобий.

Проводится анализ фазовой диаграммы и результатов исследования теплофизических свойств системы Zr-Nb. Показано, что рассматриваемые сплавы разделяются на две группы. В первой группе с малым содержанием Nb наблюдается скачкообразная аномалия температуропроводности $\alpha(T)$ вблизи температурного ГПУ-ОЦК перехода. Во второй группе сплавов с содержанием Nb, больше 10% данная аномалия отсутствует.

Представлены результаты измерений температурных зависимостей удельной электропроводности $\rho(T)$ и относительного удлинения. Изучаются политермы температуропроводности и влияние СНК структур, формируемых при сдвиговой пластической деформации.

Далее в **четвертой главе** приводятся результаты исследования системы никель-ванадий. Проводится анализ фазовой диаграммы и полученных данных о температуропроводности, удельном электросопротивлении и тепловом расширении.

Изучается влияние термообработки на теплофизические свойства сплавов системы никель-ванадий в зависимости от концентрации. Показано, что их твердые растворы ведут себя аналогично переходным металлам, а в интерметаллидах системы Ni-V возникают особенности политерм теплофизических характеристик. Отжиг снижает интенсивность рассеяния на структурных неоднородностях и фононный механизм рассеяния становится определяющим.

В пятой главе проводится анализ механизмов накопления и переноса тепла в сплавах цирконий-ниобий и никель-ванадий. Обсуждаются электронный и решеточный

вклады в теплоемкость. Отмечаются трудности разделения электронного и решеточного вкладов в теплоемкость, возникающие при высоких температурах.

С использованием данных по температуропроводности и теплоемкости рассчитывается коэффициент теплопроводности. Результаты этого расчета подтверждают доминирующую роль в формировании коэффициента теплопроводности электронной системы. Качественный анализ наблюдаемых зависимостей $\rho(T)$ и $\alpha(T)$ проводится в рамках двухполосной модели Мотта.

Здесь же детально обсуждается влияние закалки, отжига и возникновения СНК структуры, что приводит к рассеянию на статических дефектах.

Построенные изотермы концентрационных зависимостей Zr-Nb близки к прямой линии, а в сплавах Ni-V демонстрируют куполообразный вид, близкий к описываемому правилом Нордгейма. Такое различие отражает разный характер структурного беспорядка и требует дальнейшего исследования.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

6. Замечания и вопросы по работе

По диссертационной работе А. Л. Смирнова имеются следующие замечания и вопросы:

1. В диссертационной работе недостаточно детально рассмотрены фазовые переходы в изучаемых сплавах. Практически не обсуждаются фазовые переходы, наблюдаемые в интерметаллидных фазах.

2. Сопоставление с двухполосной моделью Мотта указывает на важную роль в формировании удельного электросопротивления соотношения плотностей состояний s - и d -электронов при энергии Ферми. Однако конкретной информации об особенностях электронной структуры не приводится. Между тем в области изучения электронной структуры подобных объектов за последние десятилетия достигнут значительный прогресс.

3. При анализе решеточного вклада в теплоемкость Zr-Nb и Ni-V обсуждается роль фононного ангармонизма. В этом случае также не предпринимается каких-либо попыток обратиться к результатам первопринципного моделирования фононных спектров.

4. Не вполне ясны возможные причины исчезновения аномалий зависимостей $\alpha(T)$, возникающие в Zr-Nb с ростом содержания ниобия?

5. Непонятно с чем конкретно связаны отклонения от правила Нордгейма обнаруженные на концентрационных зависимостях удельного электросопротивления?

Отмеченные замечания и вопросы не снижают достоинства проведенного обширного экспериментального исследования комплекса теплофизических свойств систем цирконий-ниобий и никель-ванадий.

Результаты диссертационного исследования получили широкую апробацию на профильных российских и международных конференциях. По теме диссертационного исследования опубликованы статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК и Аттестационным советом УрФУ. Получены 3 патента. Опубликовано монография.

7. Заключение по работе

Диссертационная работа А. Л. Смирнова соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (отрасль науки - физико-математические) и требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям.

Диссертация в полной мере отвечает требованиям по актуальности работы, научной новизне, практической значимости, личному вкладу автора, апробации и отражению результатов в публикациях; является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные выводы.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Автор проведенного диссертационного исследования Смирнов Алексей Лельевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,

Доктор физико-математических наук, профессор,

заведующий кафедрой физики Института фундаментального образования,

Федерального государственного автономного

Образовательного учреждения высшего образования

«Уральский федеральный университет имени

первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Тел. +7 (343) 375-47-46

E-mail: a.a.povzner@urfu.ru

Адрес: 620062, Россия, г.Екатеринбург, ул. Мира, 19

Повзнер Александр Александрович

Дата «09» июня 2026 года

Подпись Повзнера А.А. заверяю:

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УРФУ
МОРОЗОВА В.А.

