

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Станкуса Сергея Всеволодовича, руководителя научного направления ФГБУН ИТ СО РАН на диссертационную работу Смирнова Алексея Лельевича «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 для физико-математических наук

Диссертационная работа А.Л. Смирнова «Теплофизические свойства твердых сплавов систем цирконий-ниобий и никель-ванадий при высоких температурах» посвящена комплексному исследованию теплофизических свойств (температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности, электрического сопротивления, термического расширения) сплавов систем цирконий-ниобий (Zr-Nb) и никель-ванадий (Ni-V) в широком диапазоне температур вплоть до значений, близких к температуре плавления.

Актуальность темы

Актуальность работы обусловлена стратегическими задачами развития ядерной и тепловой энергетики России, сформулированными в Энергетической стратегии страны до 2050 года. Сплавы Zr-Nb являются основными конструкционными материалами изделий в активных зонах ядерных реакторов (оболочки твэлов), а сплавы Ni-V перспективны для применения в газотурбинных установках. Систематические данные об их теплофизических характеристиках при высоких температурах, особенно в зависимости от структурного состояния и состава, отсутствовали. Работа восполняет этот пробел, что важно как для проектирования и безопасной эксплуатации энергоустановок, так и для развития фундаментальных представлений о механизмах переноса тепла в переходных металлах и сплавах.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, содержащего основные выводы работы, списка цитируемой литературы и двух приложений. Она изложена на 134 страницах, содержит 10 таблиц и 46 рисунков. Список литературы включает 100 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы проводимых исследований, сформулирована цель и задачи исследования, обоснована новизна, научная и практическая ценность данной работы.

В первой главе приведен краткий обзор литературных данных по физическим свойствам переходных металлов (циркония, ниобия, никеля, ванадия) и особенностям фазовых равновесий в бинарных системах Zr-Nb и Ni-V. Указано на недостаточную изученность свойств и фазовых диаграмм сплавов, сформулированы цель и конкретные задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной техники, методик проведения измерений и подготовки образцов. Рассмотрены основные методы измерения теплофизических свойств металлов и их сплавов в области высоких температур, обоснован выбор метода плоских температурных волн, лежащий в основе используемых установок, подробно описана теория метода, методика проведения измерений и обработки результатов, выбраны оптимальные режимы проведения измерений, выполнена оценка неопределенности измерений. Проведена верификация установки и методики измерения температуропроводности на образцах чистого железа. Также в главе кратко рассмотрена установка и методика измерений удельного сопротивления 4-зондовым методом на постоянном электрическом токе, а также измерители теплового расширения и теплоемкости фирм Linseis и Netzsch. После прочтения этой главы у оппонента есть уверенность в достоверности полученных в этой работе экспериментальных данных и значений их неопределенности, что делает полученные данные надежной базой для разработки теории и различных обобщений.

В третьей главе приведены результаты исследований фазовых превращений, а также температуропроводности, удельного электрического сопротивления и относительного удлинения сплавов цирконий-ниобий (в том числе с субмикро- и нанокристаллической структурой), описана методика подготовка образцов и результаты их аттестации. Данные по свойствам представлены в графическом виде и в виде таблиц приложения А. Показано, что влияние СНК-структуры на свойства наиболее заметно проявляется при малых концентрациях ниобия; для чистых циркония и ниобия различия в значениях температуропроводности поликристаллических и СНК образцов выше 1700 К становятся сравнимы с погрешностью измерений.

В четвертой главе приведены результаты измерений фазовых превращений и теплофизических свойств сплавов никель-ванадий (в том числе субмикро- и нанокристаллической структурой), обоснован выбор состава сплавов, описана методика подготовка образцов и результаты их аттестации. Данные представлены в графическом виде и в виде таблиц приложения Б. Показана согласованность температурных кривых температуропроводности, удельного электросопротивления и относительного удлинения, несмотря на то, что сам вид политерма различается для разных сплавов. Установлено, что процессы закалки и отжига неодинаково влияют на свойства сплавов. Наиболее сильное влияние они оказывают на свойства промежуточных фаз и практически не сказываются на свойствах твердых растворов.

В пятой главе анализируются процессы накопления и переноса тепла в исследованных сплавах. Из анализа температурной зависимости теплоемкости в интервале 400-1000 К сделан вывод об определяющем влиянии гармонического вклада в теплоемкость сплавов. Показано, что для сплавов цирконий-ниобий при высоких температурах доминирующую роль играет электронный механизм теплопереноса. Выполнен анализ полученных данных по транспортным свойствам

сплавов цирконий-ниобий с использованием двухзонной модели Мотта. Изучено влияние закалки и отжига на кинетические свойства сплавов никель-ванадий. Дана физическая интерпретация различного влияния термической обработки на свойства сплавов Ni-V. Рассмотрено влияние СНК-структуры на свойства сплавов системы цирконий-ниобий.

В заключении обобщены результаты исследования. Сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна диссертационной работы

- Получены новые экспериментальные данные о комплексе теплофизических характеристик сплавов Zr-Nb и Ni-V (температуропроводность, теплоемкость, удельное электрическое сопротивление, термическое расширение) в диапазонах средних и высоких температур. Значительная часть данных была получена впервые и они остаются единственными.
- Впервые построены концентрационные зависимости кинетических характеристик сплавов в областях существования твердых растворов.
- Изучено влияние закалки и отжига на кинетические свойства сплавов никель-ванадий.
- Показано, что электронный механизм переноса тепла в исследованных материалах является доминирующим.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные подробные экспериментальные данные по комплексу свойств сплавов систем цирконий-ниобий и никель-ванадий при высоких температурах могут быть использованы для развития теории металлов, создания новых материалов и прогнозирования их свойств, а также включены в отечественные базы данных для использования в организациях атомной и металлургической отраслей.

Надежные систематизированные данные по теплофизическим свойствам исследованных металлов и сплавов могут быть использованы для разработки и оптимизации технологий производства данных материалов.

Модернизированная методика температурных волн для изучения нестабильных материалов может быть использована в научных и производственных организациях для расширения возможностей экспериментов.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждается тремя Ноу-хау (секрет производства, Решение Министерства промышленности и торговли Российской Федерации №391 от 18.09.2019 г).

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием апробированных экспериментальных установок и методик, высокоточными измерительными приборами, процедурой подготовки образцов,

детальным анализом погрешностей измерений, поверкой установки и методики на эталонном материале, а также воспроизводимостью результатов экспериментов.

Работа соответствует паспорту специальности кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника для физико-математических наук.

Замечания

1. Излишне кратко сделан обзор литературы. Складывается впечатление, что для исследованных сплавов нет никакой информации. Тем не менее, в последующих главах, приводятся ссылки как на экспериментальные, так и на теоретические источники.
2. Из текста в подразделе 5.1 неясно, для каких сплавов проведен анализ фононного и электронного вкладов в теплоемкость.
3. При расчете теплопроводности по формуле (5.4) величина плотности рассчитывалась по правилу аддитивности и плотности чистых компонентов. Однако, если состав сплава попадает в область концентраций, которая ограничивается (хотя бы с одной стороны) промежуточным соединением, следовало бы брать плотность этого промежуточного соединения, а не чистого компонента, т.к. иначе рассчитанная плотность может заметно отличаться от реальной.
4. В приложении А приведены таблицы результатов измерений свойств сплавов Zr-Nb и Ni-V в зависимости от температуры. Значения свойств даны при «круглых» температурах с шагом в 50 К (..500 К, 550 К, 600 К и т.д.). Из графиков с результатами измерений в 3 и 4 главах видно, что экспериментальные точки идут с разным шагом по температуре и при некоторых «круглых» температурах вообще нет экспериментальных точек. Возникает вопрос: как были получены значения свойств при круглых температурах? В тексте диссертации нет упоминаний о такой процедуре.
5. Нет ссылки на рисунок 5.4.

Отмеченные замечания, которые в основном связаны с представлением полученных результатов, не снижают научной и практической ценности данной работы и не влияют существенным образом на ее в целом общую положительную оценку. Диссертантом представлено серьезное и комплексное научное исследование с широким перечнем новых интересных и практически значимых научных результатов. Выводы и основные положения диссертации, содержащиеся в Заключение, являются обоснованными.

Результаты и выводы диссертации будут полезны для организаций атомной и металлургической промышленности, а также занимающихся разработкой новых перспективных жаропрочных и радиационно-стойких материалов. Целесообразно включение полученных результатов в базы данных по свойствам материалов для

использования в специализированных исследовательских центрах, институтах Минобрнауки РФ и ВУЗов РФ соответствующего профиля.

Автореферат верно отражает содержание, основные положения и выводы диссертационной работы. Результаты диссертации достаточно полно опубликованы в 13 печатных работах, в том числе, в 4 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Работа докладывалась на 10 отечественных и международных конференциях.

Диссертация Смирнова А.Л. имеет внутреннее единство и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований содержатся решение важных задач, вносящих вклад в развитие теплофизики и теоретической теплотехники. В целом, по объему и научному уровню, актуальности и новизне полученных результатов, их научной и практической ценности, диссертационная работа Смирнова А.Л. «Теплофизические свойства твердых сплавов систем цирконий-ниобий и никель-ванадий при высоких температурах» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор Смирнов Алексей Лельевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника для физико-математических наук.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
профессор
руководитель научного направления
"Теплофизические свойства веществ"
ФГБУН ИТ СО РАН
Станкус Сергей Всеволодович

Отзыв подписан 5 июня 2026 г.

Рабочий телефон: (383) 336-07-06, почтовый адрес: 630090, Россия,
г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1,
e-mail: stankus@itp.nsc.ru

ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН)
630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика
Лаврентьева, д. 1, тел.: (383) 336-07-06,
электронная почта: stankus@itp.nsc.ru

Подпись С.В. Станкуса удостоверяю
Ученый секретарь ИТ СО РАН
к.ф.-м.н.



Ягодницына А.А.