

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Дубинского Сергея Михайловича на тему «Механизмы аномалий термомеханического поведения сплавов с памятью формы на основе Ti-Ni и Ti-Nb-Zr и возможности управления ими», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» и состоявшейся в НИТУ МИСИС 19 сентября 2024 года.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 20.05.2024, протокол № 20.

Диссертация выполнена на кафедре обработки металлов давлением федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Научный консультант – д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением НИТУ МИСИС Прокошкин Сергей Дмитриевич.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 20 от 20.05.2024) в составе:

1. Мухин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС - председатель комиссии;
2. Штанский Дмитрий Владимирович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ МИСИС;
3. Ховайло Владимир Васильевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС;
4. Реснина Наталья Николаевна, д.ф.-м.н., профессор кафедры общей математики и информатики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»;
5. Гундеров Дмитрий Валерьевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики твердого тела Института физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук;
6. Столяров Владимир Владимирович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории узлов трения для экстремальных условий федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения;
7. Сундеев Роман Вячеславович, д.ф.-м.н., доцент кафедры нанoeлектроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет».

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем работ сформировано научное направление микроскопических физических исследований явления памяти формы в металлических сплавах на основе титана:

- **экспериментально проанализированы и описаны** все возможные структурные состояния высокотемпературных фаз, получаемых в ходе термомеханической обработки сплавов с памятью формы систем Ti-Ni и Ti-Zr-Nb, включая нанокристаллические: нанозеренные, наносубзеренные и их смесь. В том числе получены структурные состояния с предельно малым размером зерна высокотемпературной фазы для каждого сплава;
- **предложена градация нанокристаллических структур**, образовавшихся в ходе термомеханической обработки в зависимости от величины холодной деформации;
- **определен тип механизма** сдвигового (мартенситного) превращения под напряжением в наноструктурных СПФ Ti-Ni и Ti-Zr-Nb с критически малым размером зерна;
- **экспериментально определено** влияние размера зерна в нанозеренной высокотемпературной фазе на особенности протекания мартенситного превращения в СПФ Ti-Ni и Ti-Zr-Nb: показано существование минимального критического размера зерна высокотемпературной фазы для мартенситного превращения под напряжением и определен этот критический размер;
- **проверено существование** временной и температурно-скоростной зависимостей аномалии теплового расширения/сжатия кристаллических решеток низкотемпературных фаз СПФ Ti-Ni и Ti-Zr-Nb, определена их стабильность и сохранение (степень совершенства) их принадлежности к определенной сингонии;
- **обоснован атомный механизм** аномалии упругого поведения высокотемпературной фазы в СПФ Ti-Zr-Nb – нетипичного элинварного эффекта, и предложен вариант управления данным эффектом;
- **определен механизм и особенности $\beta \rightarrow \omega$ превращения** в СПФ Ti-Zr-Nb: показано единство изотермической и атермической ω -фаз, определены механизм и кинетика образования изотермической ω -фазы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

обоснована теоретически и экспериментально подтверждена результатами статистического анализа темнопольных электронномикроскопических изображений и

особенностей электронной дифракции градиция нанокристаллических структур, образовавшихся в результате термомеханической обработки сплавов с памятью формы систем Ti-Ni и Ti-Zr-Nb, на преимущественно нанозеренную, преимущественно наносубзеренную и смешанную: наносубзеренную - нанозеренную структуры. Определены термомеханические условия образования тех или иных типов наноструктур.

обосновано теоретически и экспериментально подтверждено существование минимального критического размера зерна аустенита для мартенситного превращения под напряжением (СПФ Ti-Ni и Ti-Zr-Nb) и при охлаждении (СПФ Ti-Zr-Nb), и определена его величина. Критический размер зерна для превращения под напряжением оказался на порядок меньшим, чем для превращения при охлаждении. Установлено, что деградация функциональных свойств СПФ Ti-Ni в нижней части нанометрового диапазона размеров зерен аустенита обусловлена затруднением, а затем и подавлением мартенситного превращения под напряжением по мере приближения размера зерна к критическому.

экспериментально подтверждено сохранение нормального мартенситного («дискретного») механизма превращения решетки мартенсита в решетку аустенита под напряжением во всем нанометровом диапазоне размеров зерен, где это превращение возможно в СПФ Ti-Ni и СПФ Ti-Zr-Nb. Признаков непрерывного и неоднородного механизма превращения решетки аустенита в решетку мартенсита в этих условиях не обнаружено.

экспериментально подтверждено, что параметры решеток мартенсита при нагреве не только стремятся к соответствующим параметрам решеток высокотемпературных фаз B2 в СПФ Ti-Ni и β в СПФ Ti-Zr-Nb, но и не зависят от скоростей нагрева-охлаждения и длительности изотермических выдержек, даже при температурах потери стабильности мартенситом (выше A_n). Кристаллические решетки мартенсита в СПФ Ti-Ni и СПФ Ti-Zr-Nb сохраняют свою сингонию неизменной и неискаженной при изменении их параметров во всем интервале температур существования. При этом решетка мартенсита претерпевает однородную деформацию и в ней отсутствуют локальные атомные смещения (предпереходные явления) перед началом обратного превращения в аустенит.

обнаружено нетипичное элинварное поведение, реализующееся в СПФ Ti-22Nb-6Zr; экспериментально и с помощью численного моделирования определен механизм этого поведения – уникально низкая температурная зависимость межатомного упругого взаимодействия в ОЦК решетке высокотемпературной β -фазы.

экспериментально подтверждено, что атермическая и изотермическая ω -фазы в СПФ Ti-Zr-Nb – это разновидности одной и той же фазы, с ведущим сдвиговым

механизмом образования, одинаковыми параметрами решетки, но различающиеся степенью релаксации микронапряжений. Диффузионный механизм играет второстепенную роль и участвует только в случае образования изотермической ω_{iso} -фазы при повышенных температурах старения.

Методология научного исследования в рамках диссертации заключается в комплексном использовании физических методов исследований особенностей строения и свойств кристаллических фаз и закономерностей фазовых и структурных (внутрифазовых) превращений для объяснения атомных механизмов аномальных явлений, оказывающих значимое влияние на физические и функциональные свойства сплавов с памятью формы систем Ti-Ni и Ti-Zr-Nb.

Практическая значимость работы заключается в том, что определен критический размер зерна, при приближении к которому затрудняется, а затем и блокируется протекание мартенситного превращения под напряжением, а следовательно, и реализация эффектов сверхупругого поведения и памяти формы, а также генерация реактивного напряжения. Предложена и успешно применена методика деформационной стабилизации мартенсита при $T_{комн.}$ в сплавах с памятью формы Ti-Ni и Ti-Zr-Nb с точками M_n ниже комнатной температуры, позволяющая определять параметры решетки мартенсита и кристаллографический ресурс обратимой деформации выше M_n без использования криогенной техники или тензометрии. Выявлены температурно-скоростные условия получения воспроизводимого двухстороннего (при нагреве и охлаждении) элинварного эффекта нового типа в СПФ Ti-22Zr-6Nb, и показана возможность существования такого поведения в других парамагнитных титановых стабильных β -сплавах, как, например, Ti-50Nb. Обоснована возможность практического применения этого эффекта в результате высокотемпературных механических испытаний.

Оценка достоверности результатов исследования выявила следующее:

Для экспериментальных исследований использованы современное оборудование и методики, в том числе созданные с участием автора, а сами результаты исследований отвечают на поставленные вопросы и прямо подтверждают выдвинутые гипотезы.

Личный вклад соискателя обусловлен тем, что результаты, изложенные в работе, получены лично автором или под руководством автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, проведении экспериментальных исследований, обработке, описании и анализе результатов, формулировке положений и выводов диссертационной работы, а также в написании статей и других трудов.

Результаты опубликованы в 25 печатных работах, из которых 17 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и базы Web of Science/Scopus, и доложены на 25

международных конференциях. Автор диссертации принимал непосредственное участие в написании статей, тезисов и подготовке презентаций.

Пункт 2.6 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС» соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Дубинского Сергея Михайловича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании результатов экспериментальных исследований сформулированы теоретические положения, квалифицируемые как **значимое научное достижение** в области сплавов с памятью формы на основе титана, что приводит к существенному углублению понимания особенностей строения и свойств кристаллических фаз и закономерностей фазовых и структурных превращений, оказывающих значимое влияние на физические и функциональные свойства этих сплавов.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Дубинскому Сергею Михайловичу ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в составе 7 человек, участвовавших в заседании, из 7 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 7, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



Мухин Сергей Иванович

19.09.2024