

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ ИМЕНИ
В.А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 661.882:537.322

ПЕТРОВА-БУРКИНА
Ольга Александровна

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ В $TiNi$ СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Гомель 2023

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель: **Рубаник Василий Васильевич,**
доктор технических наук, доцент, директор
Государственного научного учреждения
«Институт технической акустики
Национальной академии наук Беларуси»

Официальные оппоненты: **Гольдаде Виктор Антонович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиофизики и
электроники Учреждения образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Зеленин Виктор Алексеевич,
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник Государственного
научного учреждения «Физико-технический
институт Национальной академии наук
Беларуси»

**Оппонирующая
организация:** Государственное научно-производственное
объединение «Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси по
материаловедению», г. Минск

Защита состоится «17» октября 2023 года в 14⁰⁰ на заседании
совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при Государственном научном
учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени
В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 246050,
г. Гомель, ул. Кирова, 32а, e-mail: mprgi@mail.ru; тел.: +375 (0232) 34-17-12,
факс: +375 (0232) 34-17-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного
научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем
имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси» Д 01.14.01, по
адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

Автореферат разослан «1» сентября 2023 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций



Н. С. Винидиктова

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с классическими термоэлектрическими явлениями на границе раздела между различными металлами, возможны и термоэлектрические явления, наблюдаемые в однородных металлических образцах. К таким явлениям можно отнести эффект возникновения термокинетической электродвижущей силы (ЭДС) и эффект Бенедикса. Первый заключается в возникновении термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) при нестационарном нагревании однородного металлического участка разомкнутой электрической цепи, вызванной движением границы раздела фаз в материале. Второй эффект возникает при стационарном нагреве однородного металлического участка разомкнутой электрической цепи и заключается в возникновении потенциала между двумя точками образца, находящимися при одинаковой температуре, но отделенных двумя различными и противоположно направленными температурными градиентами.

В настоящее время в различных областях науки и техники широко используют материалы, претерпевающие термоупругие фазовые превращения, среди которых никелид титана является одним из наиболее востребованных в инженерной практике, в медицине, робототехнике и других областях. В данном сплаве обнаружено явление возникновения термокинетической ЭДС за счет реализации прямого фазового превращения на локальном участке охлаждения при его перемещении вдоль проволочного образца, а исследования возникновения ЭДС Бенедикса практически не проводились.

Таким образом, недостаточно изучен вопрос возникновения эффекта Бенедикса в сплавах с эффектом памяти формы (ЭПФ), в частности никелиде титана. Так же не выявлена возможность генерации термокинетической ЭДС при обратном фазовом переходе в движущейся локальной зоне нагрева в никелиде титана и при переходе материала с ЭПФ из аморфно-кристаллического в кристаллическое состояние. Важность исследования ЭДС в металлах обусловлена высокой чувствительностью к упругим напряжениям. Это позволяет использовать ее изменение для изучения и контроля структурных неоднородностей, возникающих в ходе различного вида термической и механической обработки металлов, что важно при проектировании и изготовлении новых изделий из сплавов с памятью формы.

В связи с этим исследование выше перечисленных термоэлектрических явлений при обратном фазовом превращении в материалах с памятью формы на основе никелида титана является актуальным и создает предпосылки для создания новых способов контроля однородности их физико-механических свойств, а также для проектирования низкопотенциальных источников энергии и устройств записи и считывания информации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы (п. 4. – машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы). Результаты диссертационной работы получены в рамках выполнения: задания 4.1.04 (№ ГР 20113673, 2011–2013 гг.) ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», подпрограммы «Материалы в технике»; аспирантского гранта НАН Беларуси по теме «ТермоЭДС при нестационарном нагреве в никелиде титана» (№ ГР 20121448, 2012 г.); заданий 4.4.02 (№ ГР 20161470, 2016–2018 гг.) и 4.2.22 (№ ГР 20190284, 2019–2020 гг.) ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Плазменные и пучковые технологии».

Цель, задачи, объект и предмет исследования. Целью диссертационной работы являлось исследование термоэлектрических явлений и особенностей их проявления в сплавах с памятью формы на основе никелида титана.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- установить закономерности наведения термокинетической ЭДС при обратном фазовом превращении в никелиде титана;
- экспериментально исследовать влияние температуры, скорости перемещения зоны нагрева, циклического температурного воздействия, величины деформации никелида титана на термокинетическую ЭДС;
- изучить закономерности наведения электросопротивления при обратном фазовом превращении в локальной области нагрева и ее перемещении вдоль протяженного образца никелида титана от количества теплосмен и величины деформации материала;
- исследовать закономерности наведения ЭДС Бенедикса при фазовом превращении в никелиде титана;
- установить возможность генерации термокинетической ЭДС в аморфно-кристаллическом материале при его переходе в кристаллическое состояние;
- разработать способы определения неоднородных участков протяженных изделий из сплавов с памятью формы и целенаправленного задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС.

Объекты исследования: проволоочные образцы никелида титана состава Ti – 50 ат.% Ni и тонкие аморфные ленты Ti – 25 ат.% Ni – 25 ат.% Cu.

Предмет исследования: термоэлектрические явления, возникающие в материалах с памятью формы на основе никелида титана при фазовом превращении.

Научная новизна:

1. Установлена возможность генерации термокинетической ЭДС при переходе ленты $\text{Ti} - 25 \text{ ат.}\% \text{ Ni} - 25 \text{ ат.}\% \text{ Cu}$ из аморфно-кристаллического в кристаллическое состояние.

2. Получена зависимость величины термокинетической ЭДС от температуры в зоне нагрева, позволяющая определять температурный интервал появления термокинетической ЭДС при обратном фазовом переходе в $\text{Ti} - 50 \text{ ат.}\% \text{ Ni}$. Показано, что ЭДС наводится при достижении температуры в зоне нагрева равной температуре начала обратного фазового превращения A_n и достигает своего максимального значения при температуре равной или выше температуры окончания обратного фазового превращения A_k .

3. Экспериментально установлены зависимости термокинетической ЭДС в $\text{Ti} - 50 \text{ ат.}\% \text{ Ni}$ от скорости и направления перемещения зоны нагрева, температуры в зоне нагрева, способа термообработки материала, количества теплосмен, величины деформации материала.

4. Экспериментально установлены зависимости электросопротивления при обратном фазовом превращении в локальной области нагрева и ее перемещении вдоль протяженного образца никелида титана состава $\text{Ti} - 50 \text{ ат.}\% \text{ Ni}$ от количества теплосмен и величины деформации материала.

5. Разработаны и запатентованы способы определения неоднородных участков протяженного изделия из сплавов с памятью формы, позволяющие по изменению термокинетической ЭДС или электросопротивления проводить выбраковку участков материала, которые не соответствуют заданным физико-механическим свойствам.

6. Предложен способ целенаправленного задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС в пределах от 0,04 до 0,6 мВ за счет термоциклирования, деформирования и изменения температуры в зоне нагрева.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальная нелинейная зависимость термокинетической ЭДС в никелиде титана состава $\text{Ti} - 50 \text{ ат.}\% \text{ Ni}$ от температуры в зоне нагрева, определяющая температурный интервал процесса инициирования термокинетической ЭДС и температуру, необходимую для достижения ей максимального значения 0,22 мВ, позволившая предложить устройство преобразования термомеханической энергии в электрическую.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния деформации на величину термокинетической ЭДС в никелиде титана состава Ti – 50 ат.% Ni при тепловом инициировании обратного фазового перехода, позволяющие разработать и предложить новое устройство для контроля однородности физико-механических свойств протяженных изделий из сплавов с памятью формы.

3. Экспериментальные зависимости термокинетической ЭДС в образцах никелида титана состава Ti – 50 ат.% Ni при обратном фазовом переходе от многократных теплосмен в полном и неполном интервале мартенситных превращений и режимов термообработки, обеспечивающие необходимые условия для регулирования значения термокинетической ЭДС.

4. Способ целенаправленного задания локальным участкам протяженного Ti – 50 ат.% Ni образца определенных значений термокинетической ЭДС в диапазоне от 0,04 до 0,6 мВ за счет термоциклирования, деформирования и изменения температуры в зоне нагрева, что найдет практическое применение при проектировании устройств записи и считывания информации.

Личный вклад соискателя ученой степени. Соискателем лично: экспериментально обнаружено явление инициирования термокинетической ЭДС в сплавах никелида титана состава Ti – 50 ат.% Ni при обратном фазовом превращении [3]; разработаны оборудование, методики и проведены эксперименты по наведению термокинетической ЭДС и ЭДС Бенедикса [2–9]; разработаны методика и устройства определения неоднородных участков протяженного изделия из сплавов с памятью формы [6; 34; 35], способ задания локальным участкам протяженного TiNi образца значений термокинетической ЭДС [1; 9] и устройство преобразования термомеханической энергии в электрическую [1; 33].

Вклад соавторов совместных публикаций по теме диссертации состоял в обсуждении полученных результатов и практической помощи при проведении конкретных исследований. Автор принимала непосредственное участие в интерпретации экспериментальных данных и подготовке научных публикаций [1–32], патентовании разработок [33–35].

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и опубликованы в материалах и тезисах докладов международных и республиканских научных и научно-технических конференциях, школах и симпозиумах: «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2009); преподавателей и студентов УО «ВГТУ» (Витебск, 2010–2012, 2019); «Поликомтриб» (Гомель, 2011); «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2010, 2012, Уфа, 2012, Екатеринбург, 2022);

«Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2011, Брест, 2019, Минск, 2021); «Инновации в науке, промышленности и образовании» (Витебск, 2010); «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (Тольятти, 2011); «Физическое материаловедение» (Тольятти, 2011); ISOMAT (Osaka, Japan, 2011); «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, 2012); ESOMAT (Санкт-Петербург, 2012); «Приборостроение» (Минск, 2018); SMST (Konstanz, Germany, 2019); «Молодежь в науке» (Минск, 2020); «Сплавы с памятью формы» (Москва, 2021).

Основные результаты исследования, изложенные и обобщенные в публикациях, приняты к внедрению в ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» (РФ, г. Москва), в Республиканском инновационном унитарном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»», в ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси» (г. Витебск), а также в учебном процессе кафедры «Физика и техническая механика» УО «Витебский государственный технологический университет» в лекциях «Строение кристаллов и тепловые свойства твердых тел», «Элементы зонной теории кристаллов», «Элементы квантовой теории кристаллов», «Полупроводники» по курсу физика.

Опубликование результатов диссертации. По материалам диссертации опубликованы 32 научные работы, в том числе: 1 глава в коллективной монографии, 8 статей в научных изданиях, из них 6 в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 3,0 авторских листа), 14 статей в сборниках материалов научных конференций, 9 тезисов докладов научных конференций. По результатам исследований получены 2 патента Республики Беларусь на изобретение и 1 патент Республики Беларусь на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, перечня сокращений и обозначений, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 150 страницах, из которых 62 страницы занимает текст, 40 страниц – 93 рисунка, 8 страниц – список использованных источников, включающий 107 источников, 5 страниц – список опубликованных работ автора из 35 наименований, содержит 12 приложений на 35 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена общая характеристика работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна и положения, выносимые на защиту.

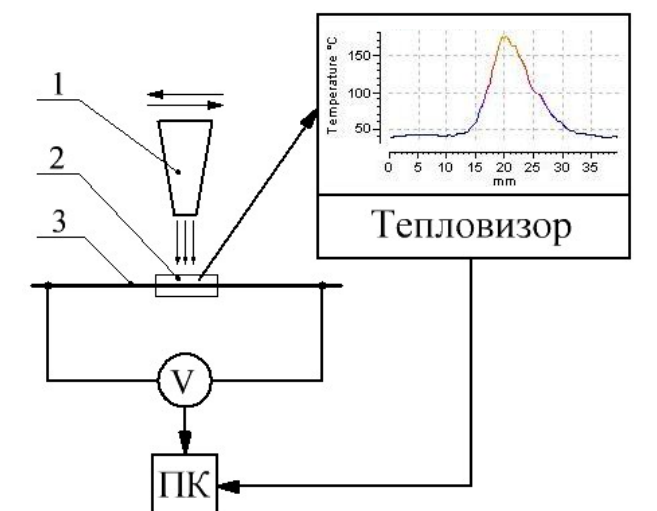
В первой главе проведен аналитический обзор публикаций, в котором рассмотрены функциональные и электрические свойства материалов, обладающих ЭПФ на основе никелида титана, и термоэлектрические явления, возникающие в однородных материалах, в том числе с памятью формы. Показана возможность наведения термокинетической ЭДС в сплавах TiNi при прямом фазовом превращении. Проведен анализ существующих моделей термоэлементов, в основе работы которых лежит эффект Бенедикса и эффект термокинетической ЭДС. Рассмотрены существующие способы непрерывного контроля качества протяженных изделий из материалов с ЭПФ.

Анализ литературных источников показал, что остается открытым вопрос о возможности наведения термокинетической ЭДС и ЭДС Бенедикса в сплавах никелида титана при обратном фазовом переходе, а также возможности генерации термокинетической ЭДС при переходе материала с ЭПФ из аморфно-кристаллического в кристаллическое состояние. Эти исследования послужат основой для создания новых способов для контроля однородности их физико-механических свойств в сплавах с ЭПФ, а также для проектирования низкопотенциальных источников энергии и устройств записи и считывания информации. На основе проведенного анализа определены основные направления, цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию объектов, методов и средств исследований, которые были использованы для диссертационного исследования с целью решения поставленных задач.

Исследования по наведению термокинетической ЭДС, электросопротивления при обратном фазовом переходе в локальной области нагрева и ее перемещении и ЭДС Бенедикса осуществляли на проволоочных образцах никелида титана состава Ti – 50 ат.% Ni диаметром 0,6 мм, а при переходе материала из аморфного в кристаллическое состояние – на тонких аморфных лентах Ti – 25 ат.% Ni – 25 ат.% Cu толщиной 40 мкм и шириной 4 мм.

Испытания проводили на разработанном измерительном комплексе (рисунок 1), конструкция которого позволяет реверсивно перемещать область нагрева (2) по образцу (3) со скоростью в диапазоне от 0,02 до 10 см/с.



1 – нагреватель; 2 – область нагрева;
3 – образец; ПК – персональный компьютер
Рисунок 1 – Структурная схема
измерительного комплекса для
исследования термокинетической ЭДС

Термокинетическую ЭДС и электросопротивление измеряли прямым способом цифровым милливольтметром МНИПИ В7-72 с точностью $\pm 2\%$ при измерении ЭДС $\approx 0,2$ мВ, с регистрацией и отображением данных на персональном компьютере (ПК). Источником нагрева (1) служила станция Lukey 702 с возможностью регулировки температуры потока воздуха, обдувающего участок образца, с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Температуру на поверхности образца контролировали тепловизором Thermo Tracer TH9100WV (NEC San-ei Instruments) с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Места контакта образца с измерительными медными проводами термоизолировали.

В случае измерения термокинетической ЭДС, одним из условий инициирования которой является протекание фазового превращения в процессе перемещения зоны нагрева с постоянной скоростью вдоль протяженного TiNi образца, температурный фронт представляет собой участок нагрева (A), по обе стороны от которого протекают фазовые превращения (M+A) (рисунок 2). На переднем фронте за счет нагрева – обратное фазовое превращение, на заднем фронте в результате охлаждения нагретого участка посредством теплообмена с окружающей средой – прямое фазовое превращение.

В случае измерения ЭДС Бенедикса, условием появления которой является асимметричное распределение температур вдоль образца TiNi, температурный фронт представляет собой два разных по значению противоположно направленных градиента температур ∇T и $\nabla_1 T$ в центре образца (рисунок 3), а область нагрева не перемещается вдоль образца.

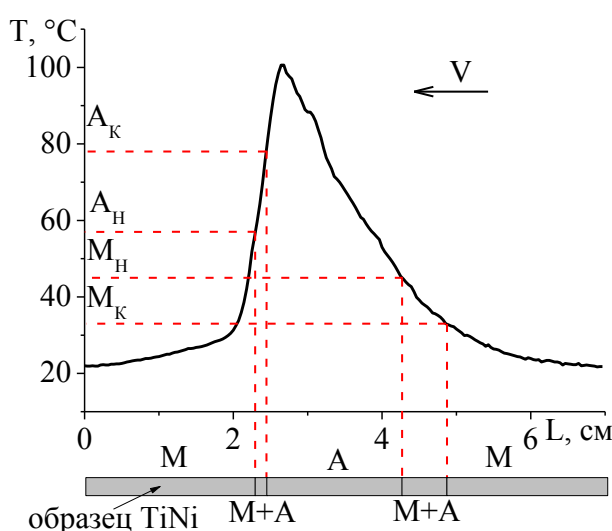


Рисунок 2 – Распределение температур в зоне нагрева образца Ti – 50 ат.% Ni при инициировании термокинетической ЭДС

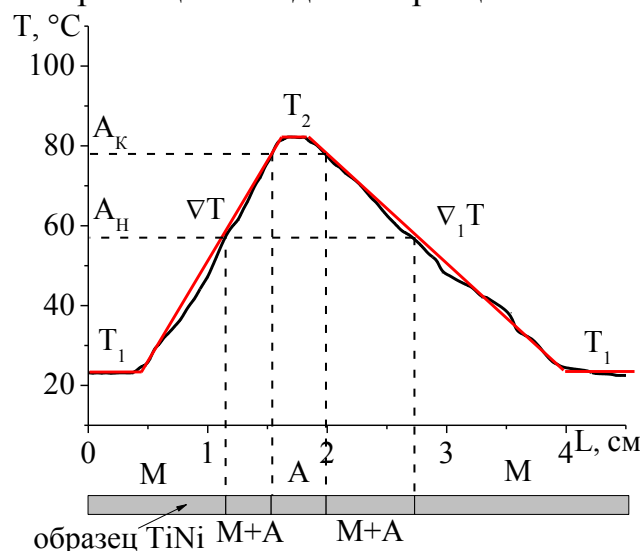


Рисунок 3 – Распределение температуры по образцу Ti – 50 ат.% Ni при инициировании ЭДС Бенедикса

Деформирование участков образцов никелида титана состава Ti – 50 ат.% Ni диаметром 0,6 мм производили одноосным растяжением на

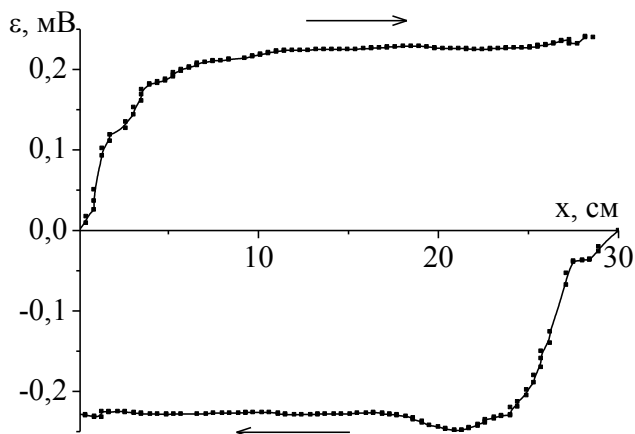
испытательной машине ИП 5158-5 при нормальных условиях окружающей среды, когда весь объем материала находился в мартенситном состоянии. Исследование кинетики и температур мартенситных превращений проводили методами изменения удельного электросопротивления сплава и дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием установки DSC822e (Mettler Toledo, Швейцария). Рентгеноструктурное исследование образцов Ti – 50 ат.% Ni после термической обработки проводили на дифрактометре ДРОН-2 в FeK α излучении при нормальных условиях окружающей среды. Исследование микроструктуры поперечного сечения образцов Ti – 50 ат.% Ni после отжига проводили на сканирующем электронном микроскопе CamScan 4 с энергодисперсионным микрорентгеноспектральным анализатором INCA 350 (Oxford Instruments, Англия).

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию термокинетической ЭДС и электросопротивления при обратном фазовом превращении в локальной области нагрева и ее перемещении вдоль протяженного образца никелида титана состава Ti – 50 ат.% Ni и ЭДС Бенедикса при обратном фазовом превращении посредством формирования двух различных противоположно направленных температурных градиентов в области нагрева. Изложены результаты по наведению термокинетической ЭДС на тонких аморфных лентах Ti – 25 ат.% Ni – 25 ат.% Cu при переходе материала из аморфно-кристаллического состояния в кристаллическое.

Установлено, что при движении зоны нагрева вдоль проволоочного образца никелида титана состава Ti – 50 ат.% Ni (при условии протекания в зоне нагрева обратного фазового перехода) возникает постоянная по величине и направлению термокинетическая ЭДС, которая составляет до 0,22 мВ. Наведение термокинетической ЭДС в никелиде титана обусловлено протеканием термоупругих фазовых превращений в области нагрева, и, как следствие, возникновением контактной разности потенциалов между участками TiNi материала, находящимися в разных фазовых состояниях. Знак наводимой ЭДС зависит от направления перемещения зоны нагрева (рисунок 4). Поскольку в материалах на основе никелида титана количество мартенситной фазы определяется температурой образца, то величина термокинетической ЭДС зависит от температуры в области нагрева (рисунок 5). Она возникает при температуре начала обратного фазового превращения ($T \geq A_n$) и достигает максимального значения 0,22 мВ при температуре окончания обратного фазового превращения ($T \geq A_k$).

Установлено, что величина наводимой термокинетической ЭДС не зависит от скорости движения зоны нагрева в диапазоне от 0,3 до 2 см/с. Отжиг образцов Ti – 50 ат.% Ni в интервале температур 400 ÷ 800 °C в

течение 0,5 ч на воздухе приводит к росту термокинетической ЭДС до 0,25 мВ только при температурах 500 и 800 °С. В других случаях величина термокинетической ЭДС не изменяется и составляет порядка 0,22 мВ, что обусловлено видом диаграммы состояния TiNi. Длительный отжиг при температуре 700 °С в течение 20 часов на воздухе, после которого наружный темный слой образца состоит преимущественно из диоксида титана TiO₂, приводит к снижению значения термокинетической ЭДС до 0,16 мВ. При отсутствии оксидного слоя термокинетическая ЭДС достигает значения 0,26 мВ.



Стрелкой указано направление перемещения зоны нагрева
Рисунок 4 – Изменение термокинетической ЭДС от местоположения зоны нагрева образца Ti – 50 ат.% Ni

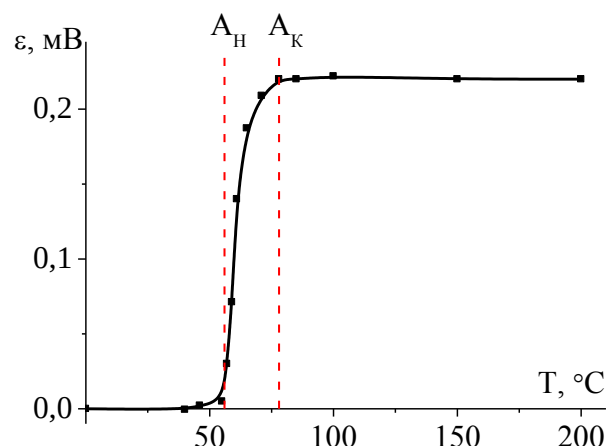
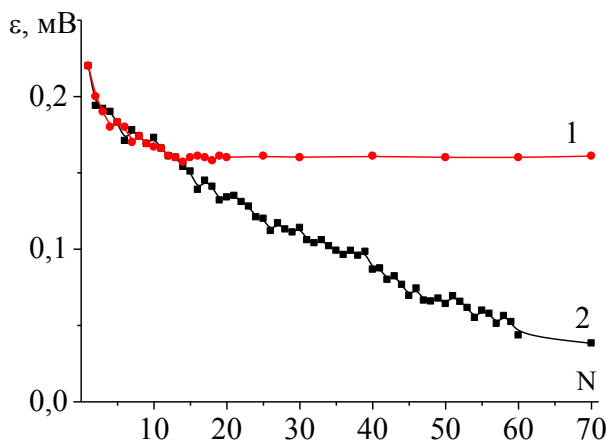


Рисунок 5 – Зависимость термокинетической ЭДС от температуры в зоне нагрева образца Ti – 50 ат.% Ni

Экспериментально установлено, что термоциклирование образцов Ti – 50 ат.% Ni приводит к изменению величины термокинетической ЭДС и электросопротивления при нестационарном нагреве локального участка образца. Такие изменения термокинетической ЭДС и электросопротивления связаны с увеличением плотности дефектов в образце при термоциклировании. Это, согласно проведенному анализу фазовых переходов, приводит к снижению характеристических температур фазового перехода и изменению стадийности превращений.

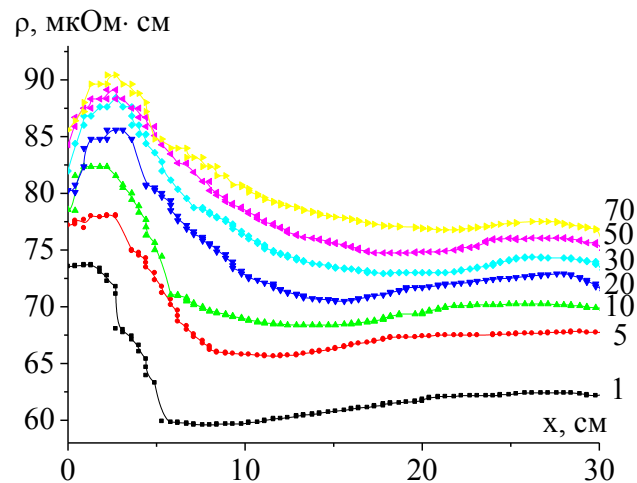
Термоциклирование в интервале температур полного мартенситного превращения (0 ÷ 100 °С) приводит к падению термокинетической ЭДС только в первых 15 циклах измерения до 0,16 мВ (рисунок 6), что связано со стабилизацией температур и стадийности фазовых переходов к 15-ому термоциклу. Тогда как при термоциклировании в интервале температур 20 °С ÷ 100 °С в течение 70-и термоциклов величина термокинетической ЭДС уменьшается с 0,22 до 0,04 мВ. В этом случае, материал, начиная с 15-ого термоцикла, при охлаждении полностью не переходит в мартенситное состояние, а доля материала, претерпевающая мартенситное превращение,

уменьшается по мере роста количества теплосмен. Охлаждение образца ниже температуры окончания прямого фазового перехода M_k позволяет в следующем 71-ом термоцикле восстановить значение термокинетической ЭДС до 0,16 мВ, что соответствует значению термокинетической ЭДС в 15-ом цикле измерений.



1 – в интервале температур $0 \div 100^\circ\text{C}$;
2 – в интервале температур $20^\circ\text{C} \div 100^\circ\text{C}$

Рисунок 6 – Изменение термокинетической ЭДС при термоциклировании

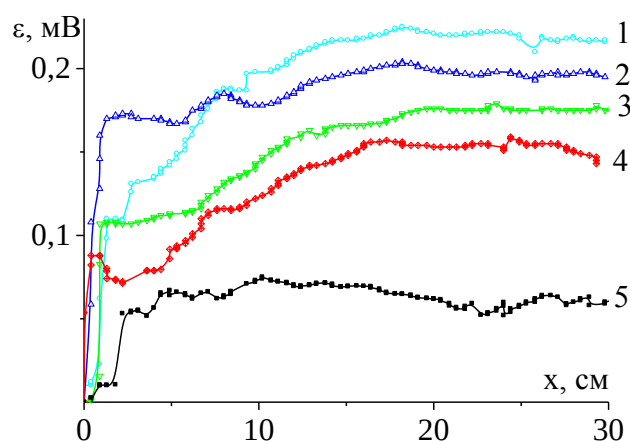


Сбоку указано количество термоциклов

Рисунок 7 – Изменение электросопротивления образца в процессе нестационарного нагрева

Характер поведения электросопротивления при нестационарном нагреве локального участка образца схож с поведением термокинетической ЭДС (рисунок 7). Однако термоциклирование в интервале неполного прямого фазового перехода мартенситного превращения за счет нестационарного нагрева приводит к изменению значений электросопротивления как в высокотемпературной B2, так и в мартенситной B19'-фазе.

Показано (рисунок 8), что после термоциклирования за счет увеличения температуры до 240°C в зоне нагрева образца Ti – 50 ат.% Ni можно восстановить значение термокинетической ЭДС до 0,22 мВ. Повышение температуры оказывает влияние на дефектную структуру никелида титана и на параметры мартенситных переходов. При высоких температурах дефектная структура изменяется необратимо,



1, 2, 3, 4 – 72-ой термоцикл после нагрева образца до 240°C , 220°C , 180°C и 160°C , соответственно; 5 – 70-ый термоцикл

Рисунок 8 – Зависимость термокинетической ЭДС от местоположения зоны нагрева образца Ti – 50 ат.% Ni

как это наблюдается в обычных сплавах.

Исследовано поведение термокинетической ЭДС и электросопротивления при нестационарном нагреве локального участка образца Ti – 50 ат.% Ni, содержащего зоны деформации (рисунки 9, 10). Деформирование приводит к изменению свойств сплава, что влечет за собой, согласно калориметрическим исследованиям, смещение характеристических температур фазового перехода и изменение термокинетической ЭДС и электросопротивления при прохождении области нагрева через зону деформации. Установлено, что в 1-ом термоцикле в процессе перемещения области нагрева вдоль образца, на участке деформации резко возрастает величина термокинетической ЭДС. Увеличение относительной деформации от 1 до 30 % приводит к изменению термокинетической ЭДС ($|\Delta E|$) от 0,01 до 0,37 мВ. Во 2-ом термоцикле, если образец испытывал деформацию до 2 %, величина термокинетической ЭДС в области деформации соответствует значению на недеформированных участках. При деформации от 2 до 10 % значение $|\Delta E|$ увеличивается до 0,1 мВ и при увеличении деформации до 30 % не изменяется. Характер поведения электросопротивления при перемещении области нагрева по длине проволочного образца Ti – 50 ат.% Ni в зоне деформации от 2 до 15 % схож с поведением термокинетической ЭДС. В 1-ом термоцикле на участке деформации величина электросопротивления резко возрастает. С ростом деформации до 15 % электросопротивление увеличивается на 25 $\mu\text{Ом}\cdot\text{см}$. Во 2-ом термоцикле в зоне деформации до 2 % величина электросопротивления не изменяется, в остальных случаях – падает. При деформации от 5 до 15 % электросопротивление уменьшается на $5 \div 20 \mu\text{Ом}\cdot\text{см}$.

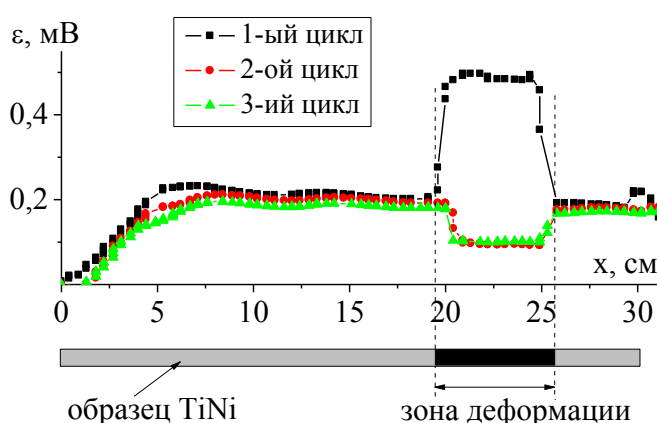


Рисунок 9 – Изменение термокинетической ЭДС от местоположения области нагрева образца Ti – 50 ат.% Ni ($\varepsilon \approx 11\%$)

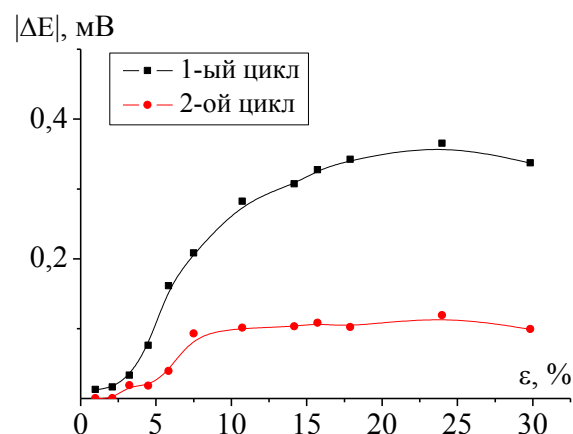


Рисунок 10 – Зависимость изменения термокинетической ЭДС от величины деформации образца Ti – 50 ат.% Ni

Исследовано возникновение ЭДС Бенедикса в проволочных образцах Ti – 50 ат.% Ni. Существование в зоне нагрева образца двух градиентов

температуры противоположного направления $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$ и $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$ (рисунок 3), приводит к возникновению постоянной по величине термоЭДС 140 мкВ (рисунок 11). Ее наведение обусловлено существованием температурных градиентов в зоне нагрева, что способствует созданию неравновесной концентрации носителей электрического заряда в материале

и формированию разности потенциалов на концах образца, находящихся при одинаковой температуре. Термоциклирование, как и в случае с термокинетической ЭДС, приводит к уменьшению значения термоЭДС, и в 15 цикле составляет 70 мкВ . При этом прекращение нагрева сопровождается двумя резкими пиками значения термоЭДС. Такое поведение термоЭДС связано с изменением стадийности и характеристических температур при термоциклировании образца $\text{Ti}-50\text{ ат.}\% \text{Ni}$. К 15 циклу в материале появляется R-фаза, и образец при охлаждении до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ полностью не переходит в низкотемпературную мартенситную фазу $\text{B}19'$, то есть не происходит полного фазового превращения. Первый пик отвечает за реализацию в материале прямого фазового превращения $\text{B}2 \rightarrow \text{R}$, а второй соответствует температуре, при которой начинается прямое фазовое превращение $\text{R} \rightarrow \text{B}19'$.

Установлена возможность генерации термокинетической ЭДС при переходе ленты $\text{Ti}-25\text{ ат.}\% \text{Ni}-25\text{ ат.}\% \text{Cu}$ из аморфно-кристаллического в кристаллическое состояние (рисунок 12, а, в). Величина термокинетической ЭДС достигает 6 мВ и остается постоянной до прекращения нагрева. Дальнейший нагрев ленты выше температуры обратного фазового перехода приводит к возникновению термоЭДС на границе раздела

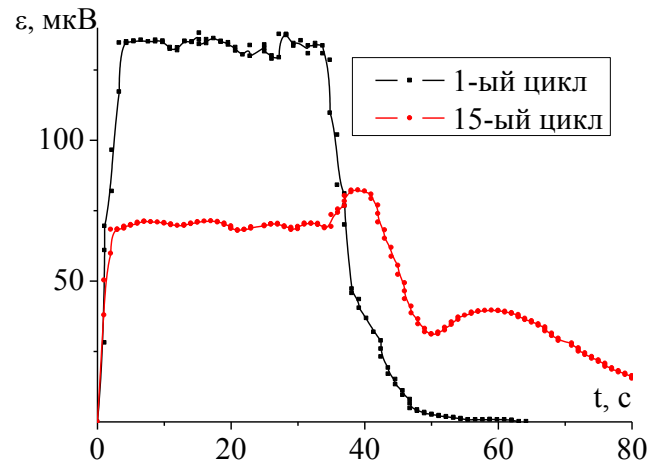


Рисунок 11 – Изменение ЭДС Бенедикса от времени нагрева для образца $\text{Ti}-50\text{ ат.}\% \text{Ni}$

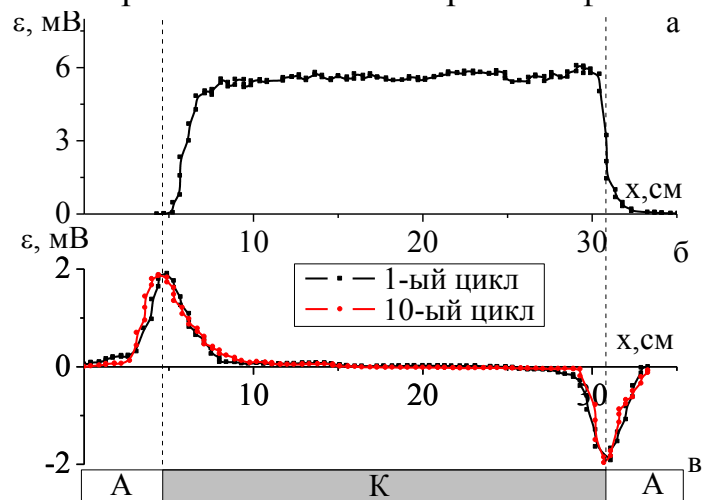
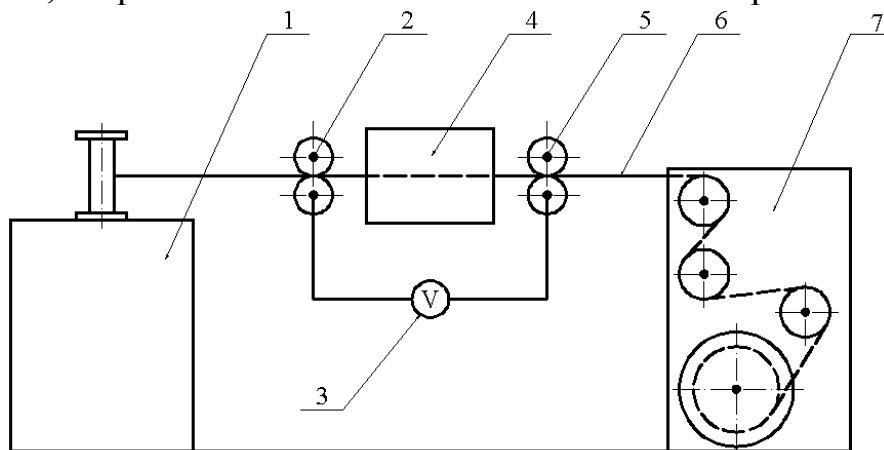


Рисунок 12 – Зависимости величины термокинетической ЭДС от местоположения зоны нагрева на ленточном образце $\text{Ti}-25\text{ ат.}\% \text{Ni}-25\text{ ат.}\% \text{Cu}$: а – во время кристаллизации (нагрев до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$), б – после кристаллизации; в – схематичное изображение образца

кристаллической (К) и аморфной фаз (А) (рисунок 12, б, в). Полярность термоЭДС зависит от направления перехода из аморфного в кристаллическое состояние, а величина – от температуры нагрева. Данная термоЭДС связана с существованием областей с различными химическими потенциалами и подобна термоЭДС, возникающей в термопаре.

Четвертая глава посвящена разработке новых способов и устройств на основе проведенных исследований.

Разработаны и запатентованы устройства (рисунок 13) для измерения термоЭДС и электросопротивления на участке протяженного изделия из сплава с памятью формы и способы определения неоднородных участков протяженного изделия из сплавов с памятью формы. Методика определения неоднородных участков протяженного TiNi изделий заключается в непрерывной регистрации в процессе перемотки проволоки значений термокинетической ЭДС или электросопротивления при нагреве участка выше температур обратного фазового перехода. По изменению термокинетической ЭДС или электросопротивления определяют участки материала, которые отличаются физико-механическими свойствами. Преимуществом данных способов и устройств по сравнению с существующими аналогами является получение более высокого технического результата путем расширения области применения, снижения трудоемкости, энергоемкости и повышения качества контроля.



1, 7 – принимающие блоки; 2, 5 – роликовые контакты; 3 – вольтметр (омметр);
4 – термостатная камера; 6 – изделие

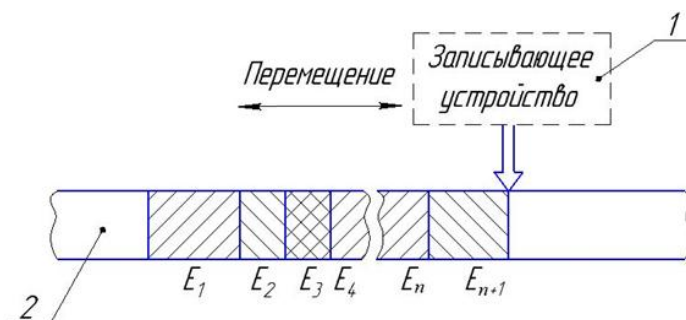
Рисунок 13 – Устройство для измерения термоЭДС (электросопротивления) на участке протяженного изделия из сплава с памятью формы

Разработано и запатентовано устройство преобразования термомеханической энергии в электрическую за счет явления возникновения термокинетической ЭДС, работающее на основе ЭПФ. Предложенное устройство может быть использовано в качестве низкопотенциального источника энергии для питания приборов, которые должны работать без

замены источника питания, а также беспроводных датчиков, переключателей, разнообразных электронных устройств.

Предложен способ целенаправленного задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС в пределах от 0,04 до 0,6 мВ за счет термоциклирования, деформирования и изменения температуры в зоне нагрева. Длина таких участков ограничена только длиной всего изделия. Для решения поставленной задачи (рисунок 14) предлагается с

помощью термического или деформационного воздействия записывать информацию на носитель, выполненный из материала с эффектом памяти формы. Таким образом, на информационной дорожке можно формировать элементарные источники термокинетической ЭДС, значение которой будет пропорционально амплитуде записываемого сигнала. Длина



1 – записывающее устройство;

2 – информационная дорожка

Рисунок 14 – Схема способа целенаправленного задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС

информационных участков соответствует размеру области воздействия. Для возврата изделия в исходное состояние, то есть стирания информации, достаточно нагреть необходимую область изделия выше 240 °С. Предлагаемое техническое решение может быть использовано при проектировании устройств записи и считывания информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлены закономерности возникновения термокинетической ЭДС в сплавах Ti – 50 ат.% Ni при перемещении локального участка нагрева вдоль проволоочного образца с инверсией знака при изменении направления движения зоны нагрева. Определено условие инициирования такой термокинетической ЭДС, согласно которому термокинетическая ЭДС возникает при перемещении зоны нагрева вдоль образца, температура в которой выше температуры начала обратного фазового перехода A_n . При этом значение термокинетической ЭДС увеличивается с ростом температуры в зоне нагрева до температуры окончания обратного фазового перехода A_k и достигает своего максимальное значение 0,22 мВ. Полученные результаты использованы для разработки устройства преобразования термомеханической энергии в электрическую [1; 3; 8; 10–13; 15; 16; 19; 22; 25; 26; 28; 33].

2. Установлено, что величина наводимой термокинетической ЭДС образцов Ti – 50 ат.% Ni не зависит от скорости движения зоны нагрева, температуры отжига в интервале $400 \div 800$ °С в течение 0,5 ч на воздухе и определяется полнотой фазовых превращений. Термоциклирование в интервале температур полного мартенситного превращения к 15-ому термоциклу приводит к стабилизации термокинетической ЭДС до 0,16 мВ. Термоциклировании в интервале температур неполного мартенситного превращения уменьшает значение термокинетической ЭДС до 0,04 мВ к 70-ому термоциклу. При этом увеличение температуры в зоне нагрева до 240 °С и выше позволяет восстановить значение термокинетической ЭДС до максимального значения 0,22 мВ. Полученные результаты использованы для разработки способа целенаправленного задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС [1; 3; 5; 7–9; 13; 15–17; 21–23; 26; 28; 29; 31; 32].

3. Экспериментально установлены закономерности наведения термокинетической ЭДС при нестационарном нагреве протяженных проволочных образцов Ti – 50 ат.% Ni, содержащих участки, подвергнутые деформации в диапазоне от 1 до 30 %, заключающиеся в резком росте величины термокинетической ЭДС на участке деформации в 1-ом термоцикле и в резком падении ее величины во 2-ом термоцикле. Полученные результаты использованы для разработки способов определения неоднородных участков протяженного изделия из сплавов с памятью формы и целенаправленного задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС [1; 6; 8; 9; 20; 23; 30; 31; 32; 34].

4. Исследованы закономерности изменения электросопротивления проволочных образцов Ti – 50 ат.% Ni при нестационарном нагреве, заключающиеся в уменьшении и стабилизации значения электросопротивления при перемещении локального участка нагрева вдоль проволочного образца, нагретого выше температуры начала обратного фазового перехода A_n . Установлено, что термоциклирование в интервале температур 20 °С $\div$ 100 °С за счет нестационарного нагрева приводит к изменению значений электросопротивления как в высокотемпературной B2, так и в мартенситной B19'-фазе. При перемещении области нагрева вдоль проволочного образца Ti – 50 ат.% Ni, содержащего участки, подвергнутые деформации в диапазоне от 2 до 15 % величина электросопротивления на участке деформации в 1-ом термоцикле резко возрастает, а во 2-ом термоцикле падает. Полученные результаты использованы для разработки способа определения неоднородных участков протяженного изделия из сплавов с памятью формы [4; 6; 8; 17; 27; 35].

5. Экспериментально установлена возможность наведения ЭДС Бенедикса в однородных проволочных образцах $\text{Ti} - 50 \text{ ат.}\% \text{ Ni}$ за счет асимметричного распределения температур вдоль образца. Существование в зоне нагрева образца двух градиентов температуры противоположного направления $50^\circ\text{C}/\text{см}$ и $30^\circ\text{C}/\text{см}$, приводит к возникновению постоянной по величине термоЭДС 140 мкВ . Термоциклирование, как и в случае с термокинетической ЭДС, приводит к уменьшению значения термоЭДС. Установлена возможность генерации термокинетической ЭДС порядка 6 мВ при переходе изначально находящегося в аморфно-кристаллическом состоянии материала $\text{Ti} - 25 \text{ ат.}\% \text{ Ni} - 25 \text{ ат.}\% \text{ Cu}$ в кристаллическое состояние [1; 2; 5; 14; 18; 22; 24].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные способы и методику определения неоднородных участков протяженных изделий из сплавов с памятью формы проволоки рекомендуется использовать для исследования и контроля физико-механических свойств сплавов TiNi в испытательных центрах, научно-исследовательских лабораториях и на предприятиях, специализирующихся на изготовлении изделий из сплавов с памятью формы. Данные результаты нашли применение в ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», в ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», в Республиканском инновационном унитарном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»» на этапе входного контроля.

Разработанное устройство преобразования термомеханической энергии в электрическую может быть рекомендовано к использованию в качестве низкопотенциального источника энергии для питания приборов, работающих без замены источника питания, а также беспроводных датчиков, переключателей, разнообразных электронных устройств на предприятиях приборостроительной промышленности, в частности ОАО «ВЗЭП».

Разработанный способ целенаправленного задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС может быть рекомендован к применению при проектировании устройств записи и считывания информации на предприятиях электронной и электротехнической промышленности, в частности УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО».

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе кафедры «Физика и техническая механика» УО «Витебский государственный технологический университет» в лекциях «Строение кристаллов и тепловые свойства твердых тел», «Элементы зонной теории кристаллов», «Элементы квантовой теории кристаллов», «Полупроводники» по курсу физика.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Главы в коллективных монографиях

1. Петрова-Буркина, О. А. Термоэлектрические явления в сплавах с эффектом памяти формы при термоупругих фазовых превращениях / О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл. // Перспективные материалы и технологии / С. М. Алдошин [и др.]; под ред. В. В. Рубаника. – Минск: Изд. центр БГУ, 2021. – Гл. 38. – С. 547–569.

Статьи в научных изданиях

2. Рубаник, В. В. Проявление термоэлектрических явлений в NiTi / В. В. Рубаник, О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник // Научное издание под редакцией В. Е. Громова / Влияние электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов. – Новокузнецк, 2011. – С. 60–68.

3. Рубаник, В. В. Термокинетическая ЭДС в никелиде титана / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина // Материалы, технологии, инструменты. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 25–27.

4. Рубаник, В. В. Электросопротивление никелида титана при нестационарном нагреве / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2, № 2. – С. 71–73.

5. Rubanik, V. V. Peculiarities of thermoelectric force behaviour in nikelide titane upon non-stationary heating / V. V. Rubanik, V. V. Rubanik Jr., O. A. Petrova-Burkina // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 738–739. – P. 292–296.

6. Петрова-Буркина, О. А. Использование термокинетической ЭДС и электросопротивления для контроля качества протяженных изделий из сплава с памятью формы / О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник мл., В. В. Рубаник // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 422–426.

7. Петрова-Буркина, О. А. Влияние термообработки на величину термокинетической ЭДС при обратном фазовом переходе в никелиде титана / О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник мл., В. В. Рубаник, Т. В. Гамзелева // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 413–421.

8. Петрова-Буркина, О. А. Изменение термокинетической ЭДС и электросопротивления в TiNi сплавах при термоупругих фазовых превращениях / О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник мл., В. В. Рубаник // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов в 3 кн. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2020. – Кн. 1: Материаловедение. – С. 95–103.

9. Петрова-Буркина, О. А. Термокинетическая ЭДС при обратном фазовом переходе в никелиде титана как способ записи информации /

О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник мл., В. В. Рубаник // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 329–334.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

10. Буркина, О. А. Автоматизация измерения термоЭДС в сплавах с памятью формы / О. А. Буркина // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 19–20 ноября 2009 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Белорус.-Рос. ун-т.; редкол. И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2009. – С. 115.

11. Буркина, О. А. Измерительный комплекс для регистрации термокинетической ЭДС / О. А. Буркина, В. В. Рубаник // XLIII Республиканская научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета: материалы XLIII Респ. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, Витебск, 22 апреля 2010 г. / Витебский гос. технологический ун-т; редкол.: В. В. Пятов [и др.]. – Витебск, 2010. – С. 274–276.

12. Рубаник, В. В. Исследование ЭДС в никелиде титана, вызванной нестационарным нагревом / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Буркина // Актуальные проблемы прочности: материалы 50 Междунар. науч. конф., Витебск, 27 сентября – 1 октября 2010 г.: в 2 ч. / Витебский гос. технологический ун-т; редкол.: В. В. Рубаник [и др.]. – Витебск, 2010. – Ч. 2. – С. 208–209.

13. Буркина, О. А. Особенности наведения ЭДС в сплаве никелида титана / О. А. Буркина, В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл. // Инновации в науке, промышленности и образовании: материалы науч.-техн. конф. молодых ученых, Витебск, 28–29 октября 2010 г. / Ин-т техн. акустики НАН Беларуси. – Витебск, 2010. – С. 48–52.

14. Рубаник, В. В. Исследование ЭДС при градиенте температур в никелиде титана / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Буркина // Перспективные материалы и технологии: материалы Междунар. симпозиума, Витебск, 24–26 мая 2011 г. / Витебский гос. технологический ун-т. – Витебск, 2011. – С. 185–187.

15. Петрова-Буркина, О. А. ТермоЭДС в никелиде титана при нестационарном нагреве / О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник мл. // Физическое материаловедение: сб. конкурсных докладов V Междунар. школы, Тольятти, 26 сентября – 1 октября 2011 г. / Тольяттинский гос. ун-т; редкол.: А. А. Викарчук, Д. Л. Мерсон. – Тольятти, 2011. – С. 132–135.

16. Рубаник, В. В. Наведение термоЭДС в никелиде титана при нестационарном нагреве / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина // Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений: материалы IV Всероссийской молодежной конф., Тольятти, 26 сентября – 1 октября 2011 г. / Тольяттинский гос. ун-т; редкол.: А. А. Викарчук, Д. Л. Мерсон. – Тольятти, 2011. – С. 59–61.

17. Петрова-Буркина, О. А. Электросопротивление никелида титана при нестационарном нагреве / О. А. Петрова-Буркина // Актуальные вопросы физики и техники: материалы I Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 17 апреля 2012 г.: в 2 ч. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; редкол.: А. В. Рогачев [и др.]. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 45–47.

18. Рубаник, В. В. ТермоЭДС в тонких лентах $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ при переходе из аморфного в кристаллическое состояние / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина, Н. Н. Реснина, А. В. Шеляков // Актуальные проблемы прочности: материалы 53 Междунар. науч. конф., Витебск, 2–5 октября 2012 г.: в 2 ч. / Витебский гос. технологический ун-т. – Витебск, 2012. – Ч. 2. – С. 17–20.

19. Ижохина, Е. Д. Термоэлектрические явления / Е. Д. Ижохина, О. С. Дегтерева, В. И. Жидкевич, О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник мл., В. В. Рубаник // XLV Республиканская научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета: материалы XLV Респ. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, Витебск, 27 апреля 2012 г. / Витебский гос. технологический ун-т; редкол.: В. В. Пятов [и др.]. – Витебск, 2012. – С. 128–131.

20. Рубаник, В. В. Способ определения неоднородных участков протяженного изделия из сплава с памятью формы / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина // Приборостроение-2018: материалы 11 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14–16 ноября 2018 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2018. – С. 149–150.

21. Рубаник, В. В. Термокинетическая ЭДС в никелиде титана при обратном фазовом переходе / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина // Перспективные материалы и технологии: материалы Междунар. симпозиума, Брест, 27–31 мая 2019 г. / Витебский гос. технологический ун-т; редкол.: чл.-корр. В. В. Рубаник [и др.]. – Витебск, 2019. – С. 652–654.

22. Петрова-Буркина, О. А. Термоэлектрические явления в никелиде титана / О. А. Петрова-Буркина // 52 Республиканская научно-техническая конференция преподавателей и студентов: материалы 52 Респ. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, Витебск, 24 апреля 2019 г.: в 2 т. /

Витебский гос. технологический ун-т; редкол.: Е. В. Ванкевич [и др.]. – Витебск, 2019. – Т. 1. – С. 337–339.

23. Петрова-Буркина, О. А. Способ записи информации на проволочный образец никелида титана / О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл. // Перспективные материалы и технологии: материалы Междунар. симпозиума, Минск, 23–27 августа 2021 г. / Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации; редкол.: чл.-корр. В. В. Рубаник [и др.]. – Минск, 2021. – С. 415–417.

Тезисы докладов научных конференций

24. Шамшура, Я. Н. Эффект Бенедикса в никелиде титана / Я. Н. Шамшура, О. А. Буркина, В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл. // XLIV Республиканская научно-технической конференции преподавателей и студентов университета: респ. науч.-техн. конф., Витебск, 28 апреля 2011 г.: тез. док. / Витебский гос. технологический ун-т; редкол.: В. В. Пятов (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2011. – С. 42–43.

25. Рубаник, В. В. Термокинетическая ЭДС в никелиде титана / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Буркина // ПОЛИКОМТРИБ-2011: Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 27–30 июня 2011 г.: тез. док. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: В. Н. Адериша [и др.]. – Гомель, 2011. – С. 195.

26. Rubanik, V. EMF in TiNi under unsteady heating / V. Rubanik, V. Jr. Rubanik, O. Burkina // ICOMAT 2011: International Conference on Martensitic Transformation, Japan, 4–9 September 2011: abstracts. – Osaka, 2011. – P. 180.

27. Рубаник, В. В. Изменение электросопротивления в никелиде титана при нестационарном нагреве / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина // Актуальные проблемы прочности: LII Междунар. науч. конф., Уфа, Россия, 4–8 июня 2012 г.: тез. док. / Башкирский гос. ун-т; редкол.: А. А. Назаров. – Уфа, 2012. – С. 67.

28. Rubanik, V. V. Peculiarities of thermoelectric force behaviour in nikelide titane under unsteady heating / V. V. Rubanik, V. V. Rubanik Jr., O. A. Petrova-Burkina // ESOMAT 2012: European Symposium on Martensitic Transformations, Saint-Petersburg, Russia, 9–16 September 2012: abstracts. – Saint-Petersburg, 2012. – P. 40.

29. Rubanik, V. V. Thermokinetic EFM in nikelide titanium during reverse phase transformation / V. V. Rubanik, V. V. Rubanik Jr., O. A. Petrova-Burkina // Shape Memory & Superelastic Technology (SMST 2019), Konstanz, Germany, 13–17 May 2019: abstracts. – Konstanz, 2019. – P. 86–87.

30. Петрова-Буркина, О. А. Устройство и способ контроля деформационных свойств протяженных изделий с памятью формы / О. А. Петрова-Буркина // Молодежь в науке – 2020: XVII Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 сентября 2020 г.: тез. док. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых; редкол.: В. Г. Гусаков [и др.]. – Минск, 2020. – С. 442–444.

31. Петрова-Буркина, О. А. Влияние внешних факторов на термокинетическую ЭДС в никелиде титана / О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл. // Сплавы с памятью формы: четвертая Междунар. конф., Москва, 13–17 сентября 2021 г. / Нац. исследовательский технологический ун-т МИСиС. – Москва, 2021. – С. 61.

32. Петрова-Буркина, О. А. Способ задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС / О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл. // Актуальные проблемы прочности: LXIV Междунар. науч. конф., Екатеринбург, Россия, 4–8 апреля 2022 г.: тез. док. / Уральский гос. горный ун-т, отв. редактор Д. В. Зайцев. – Екатеринбург, 2022. – С. 173.

Патенты

33. Устройство преобразования термомеханической энергии в электрическую: полез. модель ВУ 8747 / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина. – Оpub. 30.12.12.

34. Устройство для измерения термоЭДС на участке протяженного изделия из сплава с памятью формы и способ определения неоднородных участков протяженного изделия из сплавов с памятью формы: пат. ВУ 19012 / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина. – Оpub. 28.02.15.

35. Устройство для измерения электросопротивления на участке протяженного изделия из сплава с памятью формы и способ определения неоднородных участков протяженного изделия из сплавов с памятью формы: пат. ВУ 19017 / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина. – Оpub. 28.02.15.

РЭЗІЮМЭ
Пятрова-Буркіна Вольга Аляксандраўна

**Асаблівасці праявы тэрмаэлектрычных з'яў
у TiNi сплавах з памяццю формы**

Ключавыя словы: тэрмакінетычная электрарухаючая сіла (ЭРС), эффект памяці формы (ЭПФ), нікелід тытана, тэрмапругкія мартэнсітныя ператварэнні, зваротны фазавы пераход

Мэта працы: даследаванне тэрмаэлектрычных з'яў і асаблівасцяў іх праяўлення ў сплавах з памяццю формы на аснове нікеліда тытана.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: мілівальтметр В7-72, выпрабавальная машына ІІ 5158-5, дыферэнцыяльная сканавальная каларыметрыя (Mettler Toledo 822e), рэнтгенаструктурныя (ДРОН-2) і мікраструктурныя даследаванні (сканавальны электронны мікраскоп CamScan 4), цеплавізійныя вымярэння (цеплавізар Thermo Tracer TH9100WV).

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Устаноўлена магчымасць ініцыявання тэрмакінетычнай ЭРС у сплавах Ti–50 ат.% Ni пры перамяшчэнні лакальнага ўчастка нагрэву ўздоўж драцянога ўзору з інверсіяй знака пры змене кірунку руху зоны нагрэву. Даследаваны заканамернасці ўплыву тэмпературы, хуткасці перамяшчэння зоны нагрэву, цыклічнага тэмпературнага ўздзеяння, велічыні дэфармацыі нікеліду тытана на тэрмакінетычную ЭРС. Устаноўлена магчымасць навадзення ЭРС Бенедыкса ў сплавах Ti–50 ат.% Ni, за кошт асіметрычнага размеркавання тэмператур уздоўж драцянога ўзору і магчымасць генерацыі тэрмакінетычнай ЭРС ў Ti–25 ат.% Ni–25 ат.% Cu, які першапачаткова знаходзіцца ў аморфна-крышталічным стане, пры яго пераходзе ў крышталічны стан. На падставе вынікаў даследаванняў распрацаваны: спосабы вызначэння неаднародных участкаў працяглых вырабаў з сплаваў з памяццю формы, прылада пераўтварэння тэрмамеханічнай энергіі ў электрычную і спосаб мэтанакіраванага задання лакальным участкам працяглага ўзора TiNi тэрмакінетычнай ЭРС.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: Распрацаваныя спосабы вызначэння неаднародных участкаў працяглых вырабаў з сплаваў з памяццю формы могуць быць выкарыстаны ў выпрабавальных цэнтрах, навукова-даследчых лабараторыях для даследавання фізіка-механічных уласцівасцяў сплаваў TiNi, на прадпрыемствах пры ўваходным кантролі, а таксама пры праектаванні нізкапатэнцыяльных крыніц энергіі і прылад запісу і счытвання інфармацыі.

Сфера ўжывання: машынабудаванне, прыборабудаванне, робататэхніка, медыцына.

РЕЗЮМЕ

Петрова-Буркина Ольга Александровна

Особенности проявления термоэлектрических явлений в TiNi сплавах с памятью формы

Ключевые слова: термокинетическая электродвижущая сила (ЭДС), эффект памяти формы (ЭПФ), никелид титана, термоупругие мартенситные превращения, обратный фазовый переход

Цель работы: исследование термоэлектрических явлений и особенностей их проявления в сплавах с памятью формы на основе никелида титана.

Методы исследования и использованная аппаратура: милливольтметр В7-72, испытательная машина ИП 5158-5, дифференциальная сканирующая калориметрия (Mettler Toledo 822e), рентгеноструктурные (ДРОН-2) и микроструктурные исследования (сканирующий электронный микроскоп CamScan 4), тепловизионные измерения (тепловизор Thermo Tracer TH9100WV).

Полученные результаты и их новизна. Установлена возможность инициирования термокинетической ЭДС в сплавах Ti–50 ат.% Ni при перемещении локального участка нагрева вдоль проволочного образца с инверсией знака при изменении направления движения зоны нагрева. Исследованы закономерности влияния температуры, скорости перемещения зоны нагрева, циклического температурного воздействия, величины деформации никелида титана на термокинетическую ЭДС. Установлена возможность наведения ЭДС Бенедикса в сплавах Ti–50 ат.% Ni за счет асимметричного распределения температур вдоль проволочного образца и возможность генерации термокинетической ЭДС в Ti–25 ат.% Ni–25 ат.% Cu, изначально находящемся в аморфно-кристаллическом состоянии, при его переходе в кристаллическое. На основании результатов исследований разработаны: способы определения неоднородных участков протяженных изделий из сплавов с памятью формы, устройство преобразования термомеханической энергии в электрическую и способ целенаправленного задания локальным участкам протяженного TiNi образца термокинетической ЭДС.

Рекомендации по использованию: разработанные способы и устройства могут быть использованы в испытательных центрах, научно-исследовательских лабораториях для исследования физико-механических свойств сплавов TiNi, на предприятиях при входном контроле, а также при проектировании низкопотенциальных источников энергии и устройств записи и считывания информации.

Область применения: машиностроение, приборостроение, робототехника, медицина.

SUMMARY

Olga Petrova-Burkina

Peculiarities of the appearance of thermoelectric phenomena in TiNi shape memory alloys

Key words: thermokinetic electromotive force (EMF), shape memory effect, titanium nickelide, thermoelastic martensitic transformations, reverse phase transition.

Purpose of research: study of peculiarities of thermoelectric phenomena in titanium-nickelide-based shape memory alloy.

Research methods and used equipment: millivoltmeter B7-72, testing machine IP 5158-5, differential scanning calorimetry (Mettler Toledo 822e), X-ray diffraction analysis (DRON-2) and microstructural studies (scanning electron microscope CamScan 4), thermal imaging measurements (thermal imager Thermo Tracer TH9100WV).

Obtained results and their novelty. Initiating of a thermokinetic EMF in Ti-50at.%Ni alloys by moving a local heating area along a wire sample with sign inversion when the direction of movement of the heating zone changed was determined. The dependences of influence of the temperature, the speed of the heating zone movement, thermal cycling, and the deformation value of titanium nickelide on the thermokinetic EMF were studied. The inducing the Benedix thermokinetic EMF in the Ti-50at.%Ni alloys due to asymmetric temperature distribution along the wire sample was found. It was also observed that the generating thermokinetic EMF was possible in the initially amorphous-crystalline of the Ti-25at.%Ni-25at.%Cu alloy during its transition to the crystalline state. Based on the research results, the following methods were developed: a method for the determination of inhomogeneous sections of extended shape memory alloys products, a device which is used for converting thermomechanical energy into electrical energy, and a method for purposefully setting thermokinetic EMF to local sections of the extended TiNi sample.

Recommendations for use: the developed methods and devices can be used in testing centers, research laboratories to study physical and mechanical properties of TiNi alloys, at enterprises for input control, for designing low-potential energy sources and devices for recording and reading information.

Field of application: machine-building, instrument engineering, robotics, medicine.

Научное издание

Петрова-Буркина Ольга Александровна

**Особенности проявления термоэлектрических явлений
в TiNi сплавах с памятью формы**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Подписано в печать 22.08.2023 г. Формат бумаги 60×90 1/16.
Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс. Напечатано на ризографе.
Усл. Печ. Л. 1,6. Тираж 60 экз. Зак. № 192.

Выпущено редакционно-издательским отделом Витебского государственного
технологического университета, 210038, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12.02.2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30.05.2017 г.

