

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 538.91

ЛЕСОТА
Анна Викторовна

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СПЛАВАХ TiNi ПРИ ПРЯМОМ
ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Минск, 2019

Работа выполнена
в ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси».

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

Рубаник Василий Васильевич,
доктор технических наук, доцент,
директор ГНУ «Институт технической
акустики НАН Беларуси».

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Углов Владимир Васильевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики твердого тела
Белорусского государственного университета;

Тявловский Константин Леонидович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры «Информационно-
измерительная техника и технологии»
Белорусского национального технического
университета.

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**УО «Полоцкий государственный
университет».**

Защита состоится **14 июня 2019 года в 14.00** на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: *Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-57-09.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « ___ » мая 2019 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор физ.-мат. наук профессор

А.К. Федотов

ВВЕДЕНИЕ

Движение локальной зоны нагрева в ряде материалов способно вызывать возникновение термокинетической электродвижущей силы (ЭДС). Необходимым условием инициирования данной ЭДС является фазовый переход в локальной зоне нагрева. Термин термокинетическая ЭДС был введен профессором Е.Ф. Фурмаковым, который наблюдал данное явление в однородной вольфрамовой пленке и железной проволоке при перемещении участка нагрева (с температурой выше 700°C). Известны исследования по наведению термокинетической ЭДС при более низких температурах (вплоть до 100°C) в сплаве никелида титана эквиатомного состава (находящемся при комнатной температуре в мартенситном состоянии) в результате термоупругого фазового превращения мартенсита в аустенит (в результате обратного фазового превращения). Однако в литературе отсутствуют сведения об исследованиях по наведению термокинетической ЭДС в сплавах никелида титана обогащенных никелем.

В связи с этим целью данной диссертационной работы является исследование процесса наведения термокинетической ЭДС при прямом фазовом превращении в сплаве TiNi, а также выявление особенностей данной ЭДС (влияние термоциклирования, скорости движения зоны охлаждения, а также величины прикладываемой деформации).

Уникальные свойства никелида титана находят обширное применение в инженерной практике, медицине, робототехнике и т.д. Конструирование изделий с эффектом памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности имеет определенные требования к однородности физико-механических и функциональных свойств, в результате появляется необходимость создания дополнительных способов и устройств контроля качества протяженных TiNi изделий. Известно, что наличие структурных неоднородностей, таких, как дефекты, примеси, поля упругих напряжений, оказывает сильное влияние как на физические свойства металлов, так и на электронные. Так как эффект термокинетической ЭДС основан на изменении электронных свойств в результате фазовых превращений, это создает предпосылки для исследования влияния дефектов и упругих напряжений на величину термокинетической ЭДС с целью разработки новых методов и устройств контроля однородности физико-механических и функциональных свойств TiNi сплавов. Таким образом, исследование термокинетической ЭДС при прямом фазовом переходе (в результате перемещения локального участка охлаждения) в сплавах никелида титана обогащенных никелем (находящихся при комнатной температуре в аустенитном фазовом состоянии) является актуальным направлением исследований в физике конденсированного состояния, как с научной точки

зрения, так и с целью практического применения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Результаты диссертационной работы получены в рамках выполнения заданий Государственной программы прикладных научных исследований «Материалы в технике» (ГР 20142561 от 14.10.2014, сроки выполнения 2014-2015 гг.); «Высокоэффективные материалы и технологии» (ГР 20141730 от 11.08.2014, сроки выполнения 2014-2015 гг.); «Плазменные и пучковые технологии» (ГР 20161470 от 06.05.2016, сроки выполнения 2016-2018 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является исследование процесса наведения термокинетической ЭДС при прямом фазовом превращении в сплаве TiNi, а также выявление особенностей данной ЭДС (влияние термоциклирования, скорости движения зоны охлаждения, а также величины прикладываемой деформации).

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные задачи:

- выявить возможность инициирования термокинетической ЭДС при прямом фазовом превращении в никелиде титана, посредством перемещения зоны охлаждения с температурой ниже M_n (температуры начала прямого фазового превращения) или зоны деформирования (с величиной относительной деформации меньше 7%);
- выявить влияние пластической деформации TiNi материала на величину наводимой термокинетической ЭДС;
- разработать физико-математическую модель инициирования термокинетической ЭДС в сплаве никелида титана, а также влияния пластической деформации материала на значение наводимой ЭДС;
- экспериментально исследовать влияние условий наведения термокинетической ЭДС в TiNi сплаве на ее величину;
- на основе результатов исследований предложить способы и устройства контроля качества протяженных изделий из сплавов с памятью формы.

Объектом исследования служили проволочные образцы никелида титана (Ti-50,8 ат.% Ni и Ti-50,0 ат.% Ni). Выбор в качестве объекта исследования данных материалов обусловлен тем, что при комнатных температурах первый сплав находится в аустенитном состоянии, а второй в мартенситном, что

позволяет проводить сравнительный анализ влияния фазового состава TiNi образцов на результаты исследований.

Предметом исследования являлись термоэлектрические явления в никелиде титана при фазовых превращениях, инициированные перемещением границ раздела фаз.

Научная новизна

1. Экспериментально обнаружен эффект термокинетической ЭДС при прямом фазовом превращении в никелиде титана, в результате перемещения зоны охлаждения или деформации, соответствующей фазовому пределу текучести.

2. Предложена модель, объясняющая возникновение термокинетической ЭДС в образцах сплава никелида титана при термоупругих фазовых переходах, а также влияние величины предварительно заданной деформации сплава на значение данной ЭДС.

3. Установлена зависимость величины термокинетической ЭДС от температуры в зоне охлаждения, позволяющая определять температурный интервал существования термокинетической ЭДС. Показано, что ЭДС возникает при достижении температуры в зоне охлаждения M_n (температуры начала прямого фазового превращения) и возрастает до M_k (температуры окончания прямого фазового превращения), дальнейшее уменьшение температуры на величину ЭДС не влияет.

4. В результате анализа и расчета на основе физико-математической модели влияния предварительной деформации материала на величину термокинетической ЭДС установлено, что при перемещении зоны охлаждения через деформированные участки изменяется величина ЭДС, на которую влияет величина предварительной пластической деформации материала, а также соотношение длин зоны охлаждения и участка деформации.

5. Экспериментально установлено влияние условий наведения термокинетической ЭДС (скорости перемещения зоны охлаждения, температуры в зоне охлаждения, величины приложенного к материалу механического напряжения, предварительного термоциклирования) на ее величину.

Положения, выносимые на защиту

1. Эффект термокинетической ЭДС в никелиде титана при инициировании прямого фазового перехода в локальной зоне охлаждения, перемещаемой вдоль никелида титана, который заключается в возникновении термо-ЭДС (до 0,23 мВ) на двухфазных участках находящихся по обе стороны от перемещаемой зоны охлаждения, а также установленная экспериментально

зависимость изменения значения термокинетической ЭДС от величины предварительной пластической деформации материала (в диапазоне 1,2 – 18 %).

2. Модель возникновения наведенной термокинетической ЭДС на участках с прямым и обратным фазовыми переходами в результате движения зоны охлаждения вдоль TiNi образца. Модель учитывает изменение электронных характеристик материала (коэффициент термо-ЭДС, удельное электрическое сопротивление, коэффициент теплопроводности) при фазовом переходе, условия теплообмена между TiNi образцом и окружающей средой и позволяет прогнозировать величину термокинетической ЭДС в зависимости от температуры в зоне охлаждения и значения характеристических температур фазовых переходов.

3. Экспериментально установленные зависимости наведения термокинетической ЭДС в образцах сплава никелида титана при прямом фазовом переходе, описывающие влияния скорости движения зоны охлаждения (0,5 – 4 см/с) вдоль образца, термоциклирования (до 70 циклов), а также величины прикладываемой деформации (до 10 %) к образцам никелида титана на величину наводимой термокинетической ЭДС.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные научные и практические результаты диссертации получены лично соискателем. Автором экспериментально обнаружена термокинетическая ЭДС в сплавах никелида титана при прямом фазовом превращении; разработаны методики и проведены эксперименты по влиянию условий наведения термокинетической ЭДС на ее величину; сформулирована математическая модель, позволяющая рассчитать величину наводимой термокинетической ЭДС в сплавах TiNi, а также влияние предварительной деформации материала на величину наводимой ЭДС; установлен эффект термокинетической ЭДС в сплаве никелида титана при прямом фазовом превращении в результате движения зоны деформирования (в которой достигается фазовый предел текучести) вдоль TiNi сплава, разработаны способы и устройства контроля качества протяженных изделий из сплава с памятью формы.

Участие соавторов в совместных работах: В.В. Рубаник мл. как научный руководитель оказывал практическую помощь и содействие на всех этапах выполнения настоящей работы, принимал участие в анализе результатов экспериментов. В.В. Рубаник принимал участие в выборе методик и в анализе результатов исследований. Легкоступов С.А., Шадурский А.В., Пряхин С.С. занимались изучением вопросов, не затрагивающих тему диссертационной работы.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих симпозиумах, конференциях и семинарах: международной научной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» (ЭПФ-2014), 26-30 мая 2014 г., Витебск, Беларусь; международной - научно технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», 16-17 октября 2014 г., Могилев, Беларусь; международной научно-технической конференции «Новые технологии и материалы, автоматизация производства», 29-30 октября 2014 г., Брест, Беларусь; международной конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении», 4-5 февраля 2015 г., Минск, Беларусь; международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии», 27-29 мая 2015 г., Витебск, Беларусь; 8-ой международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2015», 25-27 ноября 2015 г., Минск, Беларусь; 8-й Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур ПРОСТ-2016», 19-21 апреля 2016 г., Москва, Россия; II-й международной научной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы» к 85-летию со дня рождения В.А. Лихачева, 20-23 сентября 2016 г., Санкт-Петербург, Россия; международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии», 22-26 мая 2017 г., Витебск, Беларусь; 8-ой международной школе с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение», 03 – 12 сентября 2017 г., Тольятти, Россия; LIX международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 05 - 08 сентября 2017 г., Тольятти, Россия; III-й международной научной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы», 16-20 августа 2018 г., Челябинск, Россия, и других.

На основании результатов диссертации разработана методика и изготовлены опытные образцы установки для контроля однородности физико-механических свойств проволоки из никелида титана в ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси» (1 акт изготовления установки) и ГП «НТП БНТУ «Политехник» (1 акт внедрения (использования) устройства).

Результаты диссертации внедрены в учебный процесс в УО «Витебский государственный технологический университет» (1 акт о внедрении результатов НИР в учебный процесс).

Возможность практического применения результатов подтверждается актом испытаний в ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», Москва (результаты приняты к внедрению).

По результатам диссертации получены 2 патента на изобретение.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 26 научных работах, из которых: 4 - статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 1,7 авторского листа), 3 - статьи в других научных изданиях, 13 - статьи в сборниках материалов научных конференций, 6 - тезисы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертационной работы составляет 125 страниц, включая 92 рисунка на 69 страницах, 1 таблицу на 1 странице, 1 приложения на 5 страницах. Библиографический список содержит 137 источников, в том числе 28 публикаций автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

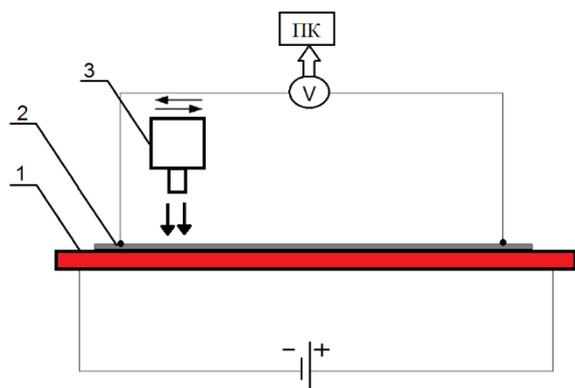
Первая глава содержит аналитический обзор литературы, в котором приведены данные о термоупругих мартенситных превращениях, эффектах сверхупругости и памяти формы в сплавах никелида титана; рассмотрены модели расчета изменения теплопроводности, электрического сопротивления, коэффициента Зеебека при прямом и обратном фазовом переходе в никелиде титана, а также влияние предварительной пластической деформации на данные физические величины; рассмотрено наведение термокинетической ЭДС в материалах претерпевающих фазовые превращения при воздействии температуры (железная проволока, вольфрамовая пленка), а также в образцах сплава TiNi при обратном фазовом превращении (нагреве); приведен обзор существующих методов и способов контроля деформационных участков в сплавах TiNi.

Анализ работ показал, что исследование термокинетической ЭДС в образцах никелида титана является не полным, остается открытым вопрос о возможности наведения термокинетической ЭДС при прямом фазовом превращении, в результате движения зоны охлаждения вдоль образца с температурой меньше M_n , а также при реализации эффекта сверхупругости, при движении зоны деформации вдоль TiNi образца. Не изучен вопрос влияния предварительной пластической деформации на величину наводимой термокинетической ЭДС.

На основании анализа литературных источников, рассмотренных в первой главе, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию используемых при проведении исследований материалов и оборудования, а также методик исследования и обработки экспериментальных данных.

Наведение термокинетической ЭДС при прямом фазовом переходе



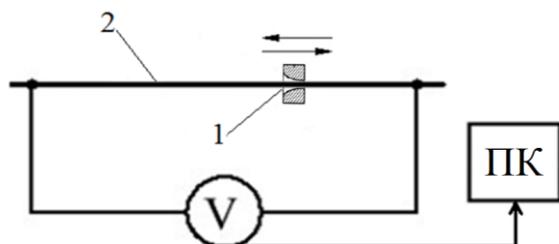
1 - нагревательный элемент; 2 - образец TiNi; 3 - устройство охлаждения

Рисунок 1. — Структурная схема измерительного комплекса

осуществляли на проволочных TiNi образцах (50,8ат.%Ni и Ti-50,0ат.%Ni) длиной от 10 до 40 см. Образцы закрепляли в зажимы с помощью ползунów на специальной установке, позволяющей перемещать устройство охлаждения (жидкий азот или пары жидкого азота) вдоль TiNi образца с заданной скоростью реверсивно. Термокинетическую ЭДС регистрировали с помощью цифрового милливольтметра В7-72, данные (ЭДС и время) с которого поступали на персональный компьютер (рисунок 1).

Погрешность милливольтметра при измерении ЭДС $\approx 0,2$ мВ, составляет $\pm 2\%$. Места контакта TiNi образца с подводщими проводами милливольтметра термоизолировали.

При необходимости наведения термокинетической ЭДС при прямом фазовом переходе в образцах находящихся при комнатной температуре в мартенситном фазовом состоянии, в измерительном комплексе предусмотрен равномерный нагрев образца, за счет теплопередачи от нагревательного элемента.



1 - фильера; 2 - проволочный TiNi образец

Рисунок 2. — Структурная схема измерительного комплекса

Методика наведения термокинетической ЭДС в образце сплава никелида титана в результате реализации фазовых превращений по механизму сверхупругости заключается в закреплении образцов на установке (рисунок 2) и движении вдоль них зоны деформации (алмазной фильеры), с постоянной скоростью.

Локальное деформирование проволочных образцов изгибом осуществляли на оправках различного диаметра при комнатной температуре. После снятия образца с оправки определяли значения наведенной деформации ε_i и рассчитывали упругую деформацию $\varepsilon_y = \varepsilon_t - \varepsilon_i$, где ε_t — полная наводимая деформация.

В третьей главе изложены результаты модельных исследований позволяющие рассчитать влияние температуры в зоне температурного воздействия на значение термокинетической ЭДС при перемещении зоны температурного воздействия вдоль TiNi образца, а также влияние предварительной пластической деформации материала на величину наводимой ЭДС.

Согласно разработанной физико-математической модели в процессе перемещения зоны температурного воздействия (в которой происходит прямой или обратный фазовый переход) вдоль TiNi образца по обе стороны от данной зоны находятся участки с прямым и обратным фазовыми превращениями. На данных участках возникает контактная разность потенциалов, обусловленная различием значений плотности электронных состояний на уровне Ферми в аустенитном и мартенситном фазовом состоянии. Таким образом, при перемещении зоны охлаждения вдоль проволочного TiNi образца, на участках с прямым и обратным фазовыми превращениями, за счет возникновения контактной разности потенциалов между аустенитом и мартенситом, а также диффузии носителей заряда в результате отличия температуры данных участков от комнатной, будет возникать термо-ЭДС. Величина возникающей термо-ЭДС на участках с прямым и обратным фазовым превращением будет зависеть от значений температур мартенситных переходов этих превращений. Таким образом, результирующая величина термокинетической ЭДС, возникающая в результате перемещения зоны охлаждения ($T < M_c$) вдоль TiNi образца, равна разнице значений термо-ЭДС возникающих на участках с прямым и обратным фазовым переходами.

Основываясь на том, что величина термо-ЭДС (E'') между разнородными участками образца равна $E'' = \int_{T_1}^{T_2} (S_1 - S_2) dT$, для расчета величины термокинетической ЭДС (E) предложена следующая формула:

$$E(t, T_{min}) = \int_{x=0}^{x=x_0+vt} \left[\left(\frac{\partial S_{пр.}(T(x,t))}{\partial x} \right) \cdot (T(x,t) - T^0) \right] dx - \int_{x=x_0+vt}^x \left[\left(\frac{\partial S_{обр.}(T(x,t))}{\partial x} \right) \cdot (T(x,t) - T^0) \cdot \gamma_{пр.}(T_{min}) \right] dx, \quad (1)$$

где x_0 – координата источника охлаждения в начальный момент времени; t – время; $T(x,t)$ – температура проволочного образца в точке с координатой x в момент времени t ; v – скорость движения участка охлаждения; T^0 – температура проволочного TiNi образца в невозмущенном (равномерно нагретом) состоянии; $S_{пр.}, S_{обр.}$ – коэффициенты термо-ЭДС при прямом и обратном переходах; $\gamma_{пр.}$ – доля мартенсита при прямом фазовом превращении, T_{min} – температура в зоне охлаждения.

Для расчета распределения температуры вдоль образца при движении зоны охлаждения использовали уравнение теплового баланса, в котором принимали

следующие допущения: движение источника охлаждения вдоль проволоочного образца происходит с постоянной скоростью; перенос тепловой энергии по длине образца осуществляется вследствие теплопроводности; конвективный теплообмен с окружающей средой.

Так как ЭДС возникает при контакте двух веществ с разными электрическими свойствами, то при перемещении зоны охлаждения с температурой выше температуры начала прямого фазового перехода ($T \geq M_n$), термокинетическая ЭДС в проволоочном образце возникать не будет (т.к. весь образец находится в аустенитном состоянии).

При перемещении зоны охлаждения вдоль проволоочного образца TiNi с температурой ниже температуры окончания прямого фазового перехода ($T \leq M_k$), участок охлаждения будет находиться в мартенситном состоянии. В данном случае, уменьшение температуры охлаждения влияет только на градиент температур этого участка проволоки.

В результате расчетов по формуле 1 установлено (рисунок 3), что если в локальной области образца температура охлаждения не достигает M_k , то есть область охлаждения находится в двухфазном состоянии, то на участке прямого фазового перехода величина контактной разности потенциалов зависит от температуры охлаждения, а контактная разность потенциалов, возникающая на участке обратного фазового перехода ($M \rightarrow A$), - от доли мартенсита, образованного при прямом переходе.

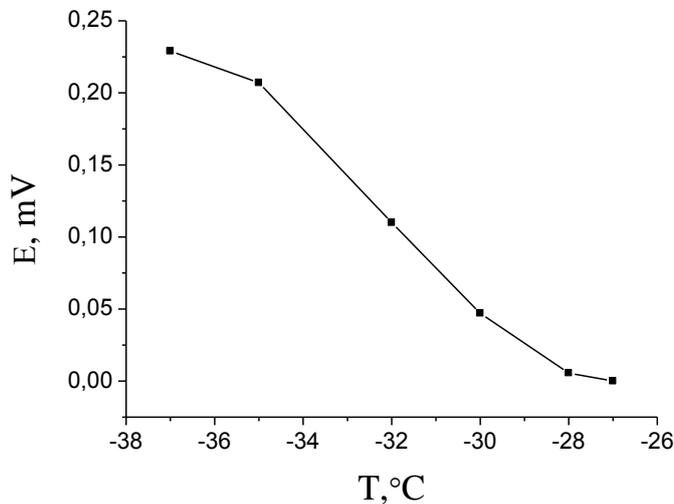


Рисунок 3. — Зависимость термокинетической ЭДС от температуры охлаждения в сплаве TiNi (теория)

В данной главе, также разработана модель влияния предварительной пластической деформации образца на величину термокинетической ЭДС. Данная модель основана на том, что на участке деформации появляются различного рода дефекты (дислокации, мартенсит деформации, фазовый наклеп и др.), которые существенно влияют на значение коэффициента термо-ЭДС. Таким образом, при перемещении зоны охлаждения

через деформированный участок, на его границах возникает разность потенциалов, которая обусловлена контактом материалов с различным коэффициентом термо-ЭДС и различием температуры проволоочного TiNi образца по обе стороны от участка деформирования.

Согласно предложенной модели получена формула для расчета изменения величины термокинетической ЭДС при прохождении участка деформирования ($\Delta E'$):

$$\Delta E' = \int_{t_0}^t [(S_1(T(x_L, t)) - S_2)(T(x_L, t)) - (S_1(T(x_R, t)) - S_2)(T(x_R, t))] dt, \quad (2)$$

где x_L, x_R – координаты границ зоны деформации, $S_1(T(x_L, t))$ – коэффициент термо-ЭДС проволочного TiNi образца, S_2 – коэффициент термо-ЭДС деформированного участка проволочного образца.

Необходимо отметить, что $S_1(T(x_L, t))$ является функцией температуры и существенно изменяется на участках фазовых переходов, значение S_2 – определяется экспериментально и не зависит от температуры данного участка. Значение температуры $T(x, t)$ находили в результате расчетов уравнения теплового баланса по формуле 2, в данной формуле также задается скорость движения зоны охлаждения и ее ширина.

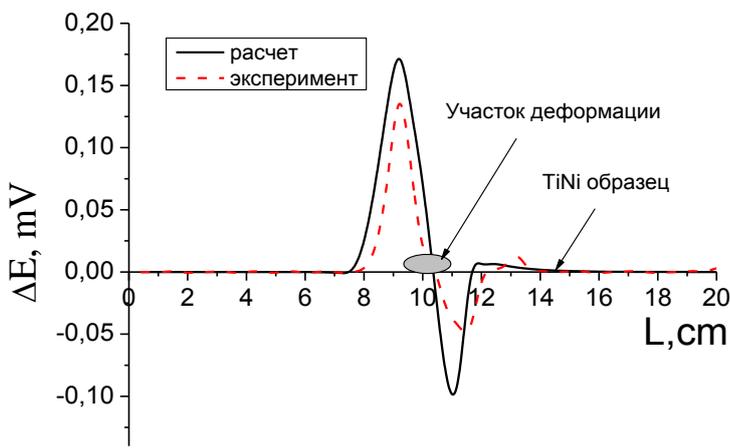


Рисунок 4. — Изменение величины термокинетической ЭДС при прохождении деформированного участка длиной 0,18 см (теория и эксперимент)

В результате расчетов по формуле 2 установлено, что в процессе перемещения зоны охлаждения со скоростью 0,4 см/с через локально деформированный участок возникает два последовательных пика термо-ЭДС противоположного знака (рисунок 4). При этом первый пик возникает при перемещении зоны с прямым фазовым переходом (находящейся возле участка охлаждения), через участок

деформации, соответственно второй пик возникает при перемещении зоны с обратным фазовым переходом через участок деформации.

При расчете по формуле 2 выявлено, что на значение термокинетической ЭДС должно влиять соотношение длин зоны охлаждения и участка деформации, так как при увеличении данного соотношения возрастает градиент температур между границами деформированного участка в момент перемещения через него зоны охлаждения. Установлено, что изменение величины термокинетической ЭДС растет с увеличением длины участка деформирования до 1,3 см (длина зоны охлаждения 1 см), при дальнейшем увеличении длины изменение ЭДС остается постоянным и появляются два одинаковых по значению и противоположных по знаку пика ЭДС.

В результате расчетов по формуле 2, выявлена зависимость изменения величины термокинетической ЭДС, при перемещении зоны охлаждения через участок деформирования, от степени предварительной

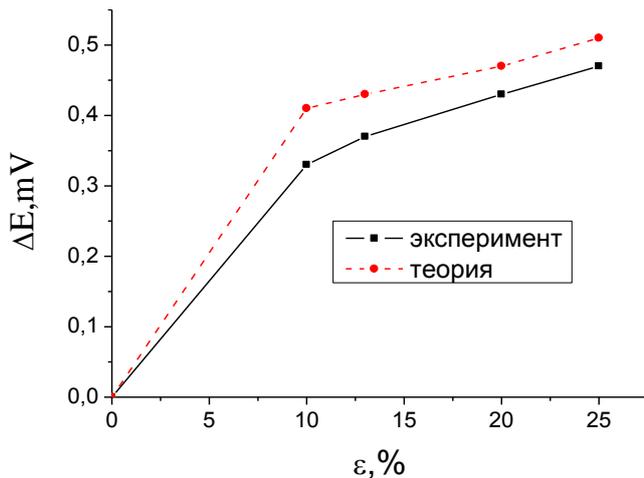


Рисунок 5. — Зависимость величины изменения термокинетической ЭДС от величины пластической деформации волочением (теория, эксперимент)

пластической деформации материала (рисунок 5). При расчете длина деформированного участка составляла половину длины проволочного TiNi образца. В результате расчетов можно наблюдать единичный пик ЭДС. При расчетах учитывалось влияние величины ЭДС возникающей на участке обратного фазового перехода, так как при достижении участком деформации минимальной температуры участка охлаждения,

дополнительный вклад в изменение ЭДС будет вносить участок с обратным фазовым превращением.

Результаты расчетов величины термокинетической ЭДС инициированной в сплаве TiNi при перемещении вдоль него зоны температурного воздействия, а также влияния деформированных участков проволочного TiNi образца на величину наводимой термокинетической ЭДС хорошо согласуются с экспериментальными данными (погрешность составляет от 4% до 16%). Данные исследования позволяют прогнозировать изменение величины термокинетической ЭДС в никелиде титана содержащем пластически деформированные участки.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию термокинетической ЭДС в образцах никелида титана при прямом фазовом превращении.

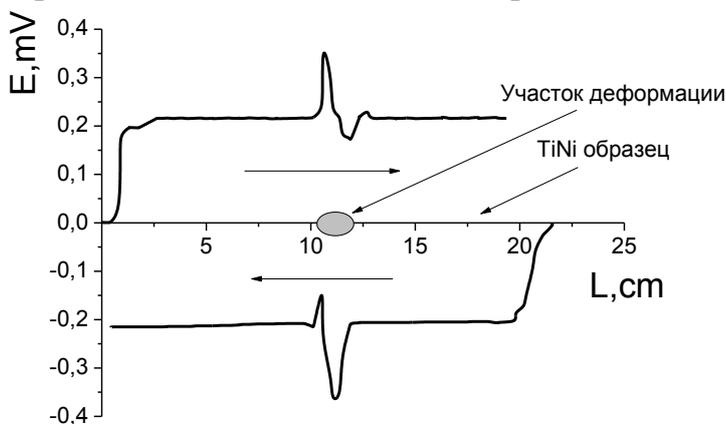


Рисунок 6. — Зависимость величины термокинетической ЭДС от местоположения зоны охлаждения в протяженном TiNi образце содержащем участок деформации

При перемещении вдоль образца сплава никелида титана зоны охлаждения с температурой $\approx -195^{\circ}\text{C}$ с постоянной скоростью 0,4 см/с в материале возникает термокинетическая ЭДС величиной $\approx 0,23$ мВ (рисунок б), знак наводимой ЭДС зависит от направления перемещения зоны охлаждения. В случае предварительной локальной

пластической деформации TiNi образца, в месте деформации величина термокинетической ЭДС резко возрастает.

В данной главе экспериментально установлено, что на величину наводимой термокинетической ЭДС скорость движения зоны охлаждения (в диапазоне от 0,5 до 4 см/с) и диаметр проволочного образца не влияет (рисунок 7 а, б). Исследование по влиянию диаметра проволочного TiNi образца на величину термокинетической ЭДС проводили на проволочном образце Ti-50,8 ат.% Ni исходным диаметром 0,6 мм. Проволочный образец подвергали волочению до диаметра 0,28 мм по маршруту: 0,6→0,52→0,45→0,38→0,33→0,28. На каждом этапе проводили промежуточный отжиг при температуре 700°C в течении тридцати минут и измеряли величину термокинетической ЭДС.

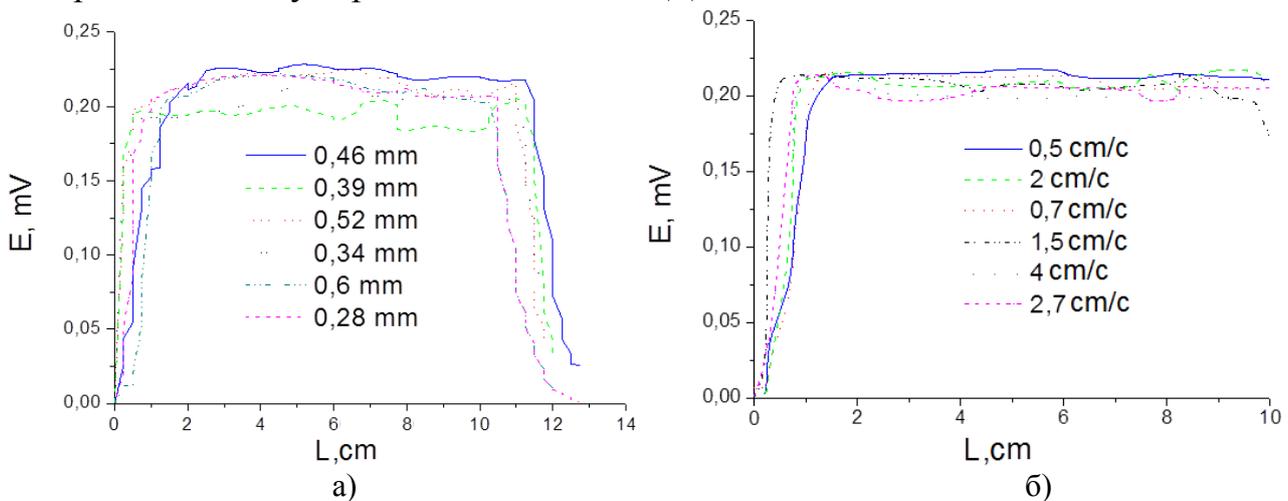
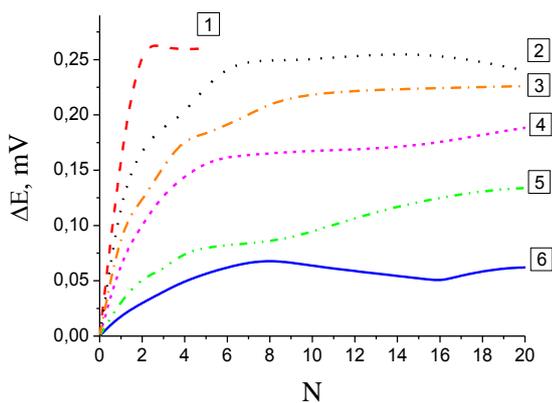


Рисунок 7. — Зависимость термокинетической ЭДС по длине, при различных скоростях движения зоны охлаждения (а) и диаметре (б) проволочного образца TiNi

В данной главе экспериментально исследовано влияние величины пластической деформации на изменение термокинетической ЭДС (рисунок 8). При проведении исследования проволочный образец никелида титана локально деформировали изгибом через оправки различного диаметра, разгибали и измеряли величину термокинетической ЭДС, данное исследование повторяли 20 раз, осуществляя, таким образом, в месте изгиба механическое циклирование. В результате исследования установлено, что изменение величины термокинетической ЭДС (ΔE) при



1-0,11 см (31%); 2-0,26 см (13,4%); 3-0,35 см (10%); 4-0,49 см (7,1%); 5-0,68 см (5,1%); 6-1,2 см (2,9%)

Рисунок 8. — Зависимость изменения величины ЭДС от количества механоциклов через оправки диаметром

пластической деформации на изменение термокинетической ЭДС (рисунок 8). При проведении исследования проволочный образец никелида титана локально деформировали изгибом через оправки различного диаметра, разгибали и измеряли величину термокинетической ЭДС, данное исследование повторяли 20 раз, осуществляя, таким образом, в месте изгиба механическое циклирование. В результате исследования установлено, что изменение величины термокинетической ЭДС (ΔE) при

прохождении участка деформации с увеличением количества механоциклов вначале увеличивается (от 1 до 6 механоциклов), после чего происходит ее насыщение и дальнейшее механоциклирование на величину ΔE не влияет.

Следует отметить наличие зависимости между величиной единичной деформации при механическом циклировании и величиной термокинетической ЭДС. Так при механическом циклировании через оправку диаметром 1,2 см (задаваемая деформация в первом цикле 2,9 %) величина термокинетической ЭДС стабилизируется при значениях 0,07 мВ, в то время как при механическом циклировании через оправку 0,68 см (величина единичной деформации 5,1%) величина насыщения ЭДС достигает 0,12 мВ. Таким образом, чем больше значение задаваемой единичной деформации при механическом циклировании, тем больше величина насыщения ЭДС.

В данной главе впервые экспериментально установлена возможность наведения термокинетической ЭДС в процессе прямого фазового превращения посредством движения вдоль проволочного TiNi образца участка деформации. Данный участок перемещали через образцы сплавов TiNi с разным химическим составом: Ti-50,0 ат.%Ni и Ti-50,8 ат.%Ni.

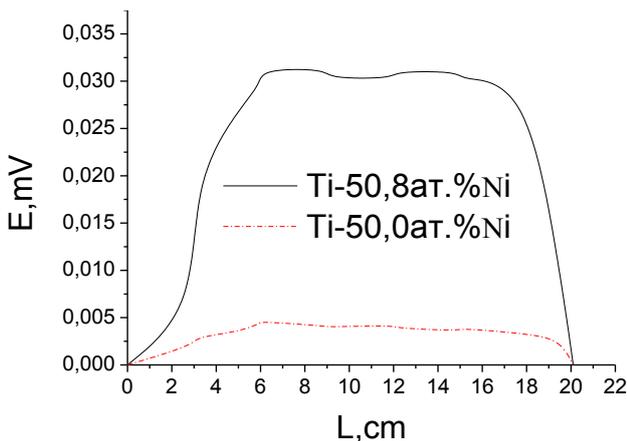


Рисунок 9. — Зависимость величины термокинетической ЭДС от длины TiNi образца при движении фильеры ($\epsilon=4\%$)

На рисунке 9 показано, что величина наводимой ЭДС в сплаве Ti-50,8 ат.%Ni $\approx 0,03$ мВ, что в шесть раз больше, чем в сплаве Ti-50,0 ат.%Ni.

Данное различие в значениях наводимой ЭДС объясняется тем, что образцы Ti-50,8 ат.%Ni и Ti-50,0 ат.%Ni при комнатной температуре находятся в разном фазовом состоянии, так что ЭДС в данных сплавах будет осуществляться за счет разных физических процессов. Так в образце сплава Ti-50,8 ат.%Ni

ЭДС возникает в результате изменения температуры материала при его деформировании, а также контакте аустенитной и мартенситной фаз. На участке деформирования мартенсит появляется в результате деформации материала в диапазоне от 1,2% до 7%, что соответствует фазовому пределу текучести. В образце сплава Ti-50,0 ат.%Ni ЭДС возникает при изменении температуры в результате деформации материала.

В пятой главе рассмотрена возможность практического применения полученных результатов, предложен способ и устройство контроля однородности физико-механических свойств протяженных TiNi изделий. Способ заключается в перемещении протяженного TiNi изделия, изначально

находящегося в аустенитном фазовом состоянии, через устройство, в котором оно локально подвергается охлаждению ниже температуры перехода материала в мартенситное состояние (M_K), с непрерывным измерением термокинетической ЭДС, возникающей в изделии. При прохождении неоднородных участков в проволоочном образце происходит резкий скачок значения термокинетической ЭДС. При этом, чем больше неоднородная зона отличается физико-механическими свойствами от основной части TiNi изделия, тем больше скачок термокинетической ЭДС. Таким образом, по изменению значения термокинетической ЭДС определяют неоднородные участки TiNi изделия, которые подлежат выбраковке или повторному отжигу. Устройство, реализующее предложенный способ контроля состоит из подающего и принимающего блоков, термостатной камеры, а также вольтметра с двумя роликовыми контактами, соединяющими его с протяженным изделием из никелида титана.

В данной главе, также предложен способ реализации контроля физико-механических свойств изделия из сплава с памятью формы, протяженной формы, находящегося при комнатной температуре в аустенитном фазовом состоянии и обладающим эффектом сверхупругости. Данный способ заключается в подаче изделия через участок деформирования, например через ролик с заданным усилием натяжения и скоростью движения и одновременным фиксированием величины наводимой термокинетической ЭДС (деформация TiNi изделия при прохождении через ролик не должна превышать 6-7%, чтобы не допустить пластическую деформацию TiNi изделия). По изменениям величины термокинетической ЭДС определяют участки изделия, отличающиеся физико-механическими свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлен эффект возникновения термокинетической ЭДС в TiNi сплавах при перемещении локального участка охлаждения с температурой, ниже температуры начала прямого фазового превращения M_n , вдоль проволоочного TiNi образца, которая увеличивается до 0,23 мВ при снижении температуры в зоне охлаждения до M_n . При этом, знак термокинетической электродвижущей силы меняется на противоположный при изменении направления движения зоны охлаждения [1, 2, 5, 7, 8, 12, 13, 22–26].

2. Предложен механизм наведения термокинетической ЭДС в сплаве TiNi в результате прямого фазового перехода, учитывающий скорость движения и температуру в зоне охлаждения. Согласно данному механизму, термокинетическая ЭДС является суммой термо-ЭДС, возникающей на

участках с прямым и обратным фазовым превращением, которые образуются по обе стороны от движущейся зоны охлаждения. Термокинетическая ЭДС возникает при температуре охлаждения меньше M_n и увеличивается до M_k , дальнейшее уменьшение температуры на величину ЭДС не влияет [1, 2, 5, 12, 13, 16].

3. Предложены математические модели, позволяющие рассчитать величину термокинетической электродвижущей силы в зависимости от температуры в зоне охлаждения (нагрева), характеристических температур никелида титана, а также изменение данной ЭДС при перемещении зоны температурного воздействия через пластически деформированный участок. В результате расчетов установлено, что значение термокинетической ЭДС растет с увеличением длины участка деформации до 1,3 см ($L_{\text{охл.}} = 2$ см), при дальнейшем увеличении длины изменение ЭДС остается постоянным и появляется два одинаковых по значению и противоположные по знаку пика ЭДС. При увеличении величины пластической деформации, увеличивается изменение ЭДС при перемещении зоны охлаждения через деформированный участок вследствие увеличения количества дефектов (дислокации, вакансии и т.д.), которые влияют на изменение коэффициента термо-ЭДС [1–5, 7, 12, 16].

4. Экспериментально установлены особенности наведения термокинетической ЭДС в образцах сплава никелида титана при прямом фазовом переходе, заключающиеся в установлении влияния скорости перемещения зоны охлаждения вдоль TiNi образца (в диапазоне от 0,5 до 4 см/с), термоциклирования (до 70 термоциклов), а также величины деформирования (до 10%) TiNi образцов на величину наводимой ЭДС. Полученные результаты важны для разработки способов и методов контроля качества протяженных TiNi изделий [1, 6, 13].

5. Экспериментально установлены зависимости влияния пластической деформации на величину ЭДС. Показано, что в случае пластической деформации изгибом при увеличении степени деформации (в диапазоне от 1,2% до 18%) увеличивается величина изменения термокинетической ЭДС в момент перемещения зоны охлаждения через участок деформации. В случае повторяющейся пластической деформации (деформация изгибом) проволочных TiNi образцов установлено, что с увеличением количества циклов до 2-6 (в зависимости от величины задаваемой единичной деформации) величина изменения термокинетической ЭДС растет, после чего происходит ее насыщение, и при дальнейшем механоциклировании значение термокинетической ЭДС стабилизируется [1, 6, 8, 10, 11, 13, 15, 23, 26].

6. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований по наведению термокинетической ЭДС в сплавах TiNi предложены способ и устройство контроля однородности физико-механических

и функциональных свойств протяженных TiNi изделий, находящихся в аустенитном фазовом состоянии. Необходимым условием для предложенного способа является реализация прямого фазового превращения в зоне охлаждения [1, 6, 9, 10, 11, 13, 15, 23, 26].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований термокинетической ЭДС в никелиде титана при перемещении зоны охлаждения с температурой ниже M_n предложен способ определения неоднородных участков протяженного изделия из сплава с памятью формы [27]. Данный способ основан на перемещении протяженного TiNi изделия, находящегося при комнатной температуре в аустенитном фазовом состоянии, через зону охлаждения с температурой ниже M_n и фиксацией величины наводимой термокинетической ЭДС, по изменениям данной величины определяют неоднородные участки протяженного TiNi изделия, которые подлежат выбраковке или повторному отжигу.

2. На основании результатов исследований наведения кинетической ЭДС при перемещении участка деформирования (с величиной деформации в диапазоне сверхупругих свойств) вдоль никелида титана, предложены способ и устройство для непрерывного контроля деформированных участков в сплавах с эффектом памяти формы [28].

3. Разработанные способ и устройство контроля однородности протяженных TiNi изделий приняты к внедрению на ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» для контроля качества TiNi проволоки, находящейся в аустенитном состоянии (1 акт испытаний).

4. Разработанное устройство контроля однородности физико-механических свойств протяженных изделий из сплава с памятью формы принято к внедрению в ГП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (1 акт внедрения).

5. По результатам исследований наведения термокинетической ЭДС в никелиде титана в ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси» разработан опытный образец установки для контроля физико-механических свойств проволоки из никелида титана, которая используется при проведении научно-технических работ (1 акт изготовления установки).

6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по наведению термокинетической ЭДС в сплаве TiNi при термоупругих фазовых превращениях внедрены в учебный процесс УО «Витебский государственный технологический университет» в курс лекций дисциплины «Физика» (1 акт о внедрении результатов НИР в учебный процесс).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Рубаник, В.В. Термокинетическая ЭДС в сплаве TiNi при инициировании прямого фазового перехода / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – Т.20, вып.2. – С. 490–493.
2. Рубаник, В.В. Расчет термокинетической ЭДС при обратном фазовом переходе в никелиде титана / В.В. Рубаник, А.В. Лесота, В.В. Рубаник мл. // Письма о материалах. – 2017. – Т.7, №2. – С.96–100.
3. Лесота, А.В. Термокинетическая ЭДС в медицинском сплаве никелида титана Ti-50,8 ат.%Ni / А.В. Лесота, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навукі (матэматыка, фізіка, біялогія). – 2018. – №2 (52). – С.79–86.
4. Lesota, A.V. Calculation of the effect of plastic deformation on thermo-kinetic electromotive force in TiNi alloy / A.V. Lesota, V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr. // Letters on Materials. – 2018. – Vol.8, №4. – P.390–394.

Статьи в других научных изданиях

5. Рубаник, В.В. Неразрушающий метод и устройство контроля однородности физико-механических свойств TiNi изделий / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – 2014. – №4. – С.33–35.
6. Рубаник, В.В. мл. Влияние пластической деформации TiNi проволоки на термокинетическую ЭДС / В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2017. – №3 (41). – С.97–102.
7. Лесота, А.В. Расчет термокинетической ЭДС в сплавах никелида титана (глава 20) / А.В. Лесота, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Актуальные проблемы прочности: монография, в 2 т. / Под ред. В.В. Рубаника. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2018. – Т.1. – С. 373–384.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

8. Термоэлектрические явления при прямом фазовом превращении в TiNi сплаве / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., С.А. Легкоступов, А.В. Лесота // Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы: материалы Междунар. конф., Витебск, 26-30 мая 2014 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2014. – С.33–35.

9. Рубаник, В.В. Устройство и метод контроля протяженных TiNi изделий из сплава с памятью формы / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В.Лесота // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 16-17 октября 2014 г. / УО «БРУ». – Могилев, 2014. – С.193.

10. Рубаник, В.В. Контроль протяженных TiNi изделий из сплава с памятью формы / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы международной научно-технической конференции, Брест, 29-30 октября 2014 г./ УО «БрГТУ». – Брест, 2014. – С.91–93.

11. Рубаник, В.В. Устройство и способ контроля деформационных свойств протяженных TiNi изделий / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В.Лесота // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы III международной научно-практической конференции, Минск, 4-5 февраля 2015 г./ Бизнесофсет. – Минск, 2015. – С.128.

12. Рубаник, В.В. Термокинетическая ЭДС в сплаве TiNi при прямом фазовом переходе: эксперимент и расчет / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В.Лесота // Перспективные материалы и технологии: сборник материалов симпозиума, Витебск, 27-29 мая 2015 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2015. – С.16–20.

13. Рубаник, В.В. Термоэлектрические явления при прямом фазовом превращении в TiNi сплаве / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // Приборостроение - 2015: материалы 8-й международной научно-технической конференции, Минск, 25–27 ноября 2015 г./ УО «БНТУ». – Минск, 2015. – Т.1. – С.24–26.

14. Поэтапная реализация эффекта памяти в протяженных проволочных образцах никелида титана / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота, А.В.Шадурский // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: сборник материалов XXIII Уральской школы металловедов-термистов, посвященная 100-летию со дня рождения профессора А.А. Попова, Тольятти, 2-6 февраля 2016 г. – Тольятти: изд-во ТГУ, 2016. – С.164–166.

15. Лесота, А.В. Контроль деформационного состояния протяженных TiNi изделий с помощью термокинетической ЭДС/ А.В. Лесота, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Физическое материаловедение: сборник конкурсных докладов VII Межд. школы с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 31 января - 5 февраля 2016 г. / отв. ред. А.Ю. Виноградов, Д.Л.Мерсон. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. – С.237–242.

16. Rubanik, V.V. Thermokinetic EMF under direct phase transformation /

V.V. Rubanik, A.V. Lesota, V.V. Rubanik Jr. // *Materials today (Proceedings of the Second Conference “Shape Memory Alloys”, Saint Petersburg, September 20-23, 2016).* – 2017. – Vol.4. – P. 4712–4716.

17. Рубаник, В.В. Влияние пластической деформации TiNi сплава на величину термокинетической ЭДС / В.В. Рубаник, А.В. Лесота, В.В. Рубаник мл. // *Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» посвящен Году науки: материалы симпозиума, Витебск, 22-26 мая 2017 г. / УО «ВГТУ».* – Витебск, 2017. – Ч.2. – С.310–312.

18. Пряхин, С.С. Модельные функции теплосодержания для нитинола / С.С. Пряхин, А.В. Лесота // *Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» посвящен Году науки: материалы симпозиума, Витебск, 22-26 мая 2017 г. / УО «ВГТУ».* – Витебск, 2017. – Ч.2. – С.227–229.

19. Рубаник, В.В мл. Инициирование термокинетической ЭДС в сплавах никелида титана в процессе непрерывной пластической деформации волочением / В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота, В.В. Рубаник // *Актуальные проблемы прочности: сборник материалов, Тольятти, 5-8 сентября 2017 г. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – С.19–20.*

20. Рубаник, В.В. Инициирование кинетической ЭДС в сплавах никелида титана / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // *Сплавы с эффектом памяти формы. Третья международная научная конференция: сборник материалов конференции, Челябинск, 16-20 августа 2018 г. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2018. – С.50.*

Тезисы научных конференций

21. Рубаник, В.В. Термокинетическая ЭДС при прямом фазовом превращении в TiNi / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // *Фазовые превращения и прочность кристаллов: сборник тезисов VIII международной конференции, Черногоровка, 27-31 октября 2014 г. – Черногоровка, 2014. – С.53.*

22. Рубаник, В.В. Наведение термокинетической ЭДС в сплавах TiNi при прямом фазовом превращении / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // *Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тезисы докладов, Гомель, 4-6 ноября 2014 г. / ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси».* – Гомель, 2014. – С.101–102.

23. Rubanik, V.V. Influence of deformation on thermokinetic EMF under direct phase transformation in TiNi alloys / V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr., A.V.Lesota // *8-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures, Augustow, Poland, may 31– june 3, 2015. – Augustow, 2015. – P.141.*

24. Рубаник, В.В. Разработка способов контроля деформационных участков протяженных TiNi изделий / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В.Лесота // Тезисы докладов 48 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 50-летию университета, Витебск, 29 апреля 2015 г. / Министерство образования Республики Беларусь; ВГТУ. – Витебск, 2015. – С.84–85.

25. Рубаник, В.В. Термокинетическая ЭДС при прямом фазовом превращении / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // Сплавы с эффектом памяти формы: тезисы докладов второй международной научной конференции, Санкт-Петербург, 20-23 сентября 2016 г. – Санкт-Петербург: СПб, 2016 г. – С.47.

26. Рубаник, В.В. Термоэлектрические явления в никелиде титана / В.В.Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.В. Лесота // Тезисы докладов 49 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, Витебск, 27 апреля 2016 г. / Министерство образования Республики Беларусь; ВГТУ. – Витебск, 2016. – С.86–87.

Патенты

27. Способ определения неоднородных участков протяженного изделия из сплава с памятью формы : заявка ВУ 201500243 / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), А.В. Лесота. – Оpubл. 29.07.2016.

28. Способ и устройство для непрерывного контроля деформированных участков в сплавах с эффектом памяти формы : заявка ВУ 201500679 / В.В.Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), А.В. Лесота. – Оpubл. 30.11.2016.

РЭЗІЮМЭ

Лясота Ганна Віктараўна

Тэрмаэлектрычныя з'явы ў сплавах TiNi пры прамым фазавым пераходзе

Ключавыя словы: эфект памяці формы, нікелід тытана, термоупругіе мартэнсітныя ператварэння, тэрмакінецічная ЭРС.

Мэта працы: тэарэтычнае і эксперыментальнае даследаванне працэсу навядзення тэрмакінецічнай ЭРС пры прамым фазавым ператварэнні ў сплаве TiNi, а таксама выяўлення асаблівасцяў навядзення дадзенай ЭРС, распрацоўка на аснове дадзеных даследаванняў новых метадаў кантролю якасці вырабаў з памяццю формы на аснове нікеліду тытана.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: мілівольтметар В7-72, дыферэнцыяльная сканавальная каларыметрыя (Mettler Toledo 822e), цеплавізійныя вымярэння (NEC9100), мадэляванне працэсаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Упершыню ўсталяваны эфект ўзнікнення тэрмакінецічнай ЭРС ў TiNi сплавах пры перамяшчэнні лакальнага ўчастка астуджэння з тэмпературай ніжэй тэмпературы пачатку прамога фазовага ператварэння M_n ўздоўж драцянога TiNi образца. Прапанаваная мадэль навядзення тэрмакінецічнай ЭРС ў сплаве TiNi ў выніку прамога фазовага пераходу, якая ўлічвае хуткасць перамяшчэння і тэмпературу зоны астуджэння. Згодна з дадзенай мадэлі термокінетічная ЭРС з'яўляецца сумай тэрма-ЭРС якая ўзнікае на участках з прамым і зваротным фазавым ператварэннем, якія ўтвараюцца па абодва бакі ад руху зоны астуджэння. Прапанаваны матэматычныя залежнасці, якія дазваляюць разлічыць змяненне велічыні термокінетічнай ЭРС пры перамяшчэнні зоны астуджэння праз пластычна дэфармаваны ўчастак, выяўлена, што дадзенае змяненне ЭРС залежыць як ад ступені дэфармацыі, так і ад даўжыні ўчастка дэфармацыі. Эксперыментальна ўстаноўлены залежнасці ўплыву пластычнай дэфармацыі на велічыню ЭРС. Эксперыментальна ўстаноўлены асаблівасці навядзення тэрмакінецічнай ЭРС, якія складаюцца ва ўсталяванні ўплыву хуткасці перамяшчэння зоны астуджэння ўздоўж TiNi ўзору, тэрмацікліравання, а таксама велічыні прыкладаемай дэфармацыі да образца нікеліда тытана на велічыню наводнай ЭРС.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёныя ў навучальны працэс УА «Віцебскі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт», а таксама ў вытворчасць ТАА «Прамысловы цэнтр МАТЭК-СПФ»; навукова-тэхналагічным парку БНТУ «Палітэхнік»; ДНУ «Інстытут тэхнічнай акустыкі НАН Беларусі».

Вобласць прымянення: машынабудаванне, прыборабудаванне, робататэхніка.

РЕЗЮМЕ

Лесота Анна Викторовна

Термоэлектрические явления в сплавах TiNi при прямом фазовом переходе

Ключевые слова: эффект памяти формы, никелид титана, термоупругие мартенситные превращения, термокинетическая ЭДС.

Цель работы: теоретическое и экспериментальное исследование процесса наведения термокинетической ЭДС при прямом фазовом превращении в сплаве TiNi, а также выявления особенностей наведения данной ЭДС, разработка на основе данных исследований новых методов контроля качества изделий с памятью формы на основе никелида титана.

Методы исследования и использованная аппаратура: милливольтметра В7-72, дифференциальная сканирующая калориметрия (Mettler Toledo 822e), тепловизионные измерения (NEC9100), моделирование процессов.

Полученные результаты и их новизна. Впервые установлен эффект возникновения термокинетической ЭДС в TiNi сплавах при перемещении локального участка охлаждения с температурой ниже температуры начала прямого фазового превращения M_n вдоль проволочного TiNi образца. Предложена модель наведения термокинетической ЭДС в сплаве TiNi в результате прямого фазового перехода, учитывающая скорость перемещения и температуру зоны охлаждения. Согласно данной модели термокинетическая ЭДС является суммой термо-ЭДС возникающей на участках с прямым и обратным фазовым превращением, которые образуются по обе стороны от движущейся зоны охлаждения. Предложены математические зависимости, позволяющие рассчитать изменение величины термокинетической ЭДС при перемещении зоны охлаждения через пластически деформированный участок, выявлено, что данное изменение ЭДС зависит как от степени деформации, так и от длины участка деформации. Экспериментально установлены зависимости влияния пластической деформации на величину ЭДС. Экспериментально установлены особенности наведения термокинетической ЭДС, заключающиеся в установлении влияния скорости перемещения зоны охлаждения вдоль TiNi образца, термоциклирования, а также величины прикладываемой деформации к образцам никелида титана на величину наводимой ЭДС.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс УО «Витебский государственных технологический университет», а также в производство ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ»; Научно-технологическом парке БНТУ «Политехник»; ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси».

Область применения: машиностроение, приборостроение, робототехника.

ABSTRACT

Hanna Liasota

Thermoelectric phenomena in TiNi alloys at direct phase transformation

Key words: shape memory effect, titanium nickelide, thermoelastic martensitic transformations, thermokinetic electromotive force.

Work objective: theoretical and experimental study of the process of guidance of thermokinetic electromotive force at direct phase transformation in TiNi alloy, as well as definition of peculiarities of guidance of this electromotive force, development on the basis of the this research of new methods of quality control of products with shape memory on the basis of titanium nickelide.

Research methods and used equipment: millivoltmeter V7-72, differential scanning calorimetry (Mettler Toledo 822e), thermal-imaging measurements (NEC9100), process modeling.

Obtained results and their novelty. For the first time is established the effect of emergence of thermokinetic electromotive force in TiNi alloys during the moving of the local cooling section with the temperature below the temperature of the beginning of the direct phase transformation of M_s along the wire TiNi sample. A model of guidance of thermokinetic electromotive force in TiNi alloy as a result of direct phase transformation taking into account the displacement speed and the temperature of cooling zone is suggested. In accordance with this model thermokinetic electromotive force is a sum of thermokinetic electromotive force which appears at the sections with direct and reverse phase transformation which arise on both sides from the moving cooling zone. Mathematical relations are proposed which allow to calculate the change in thermokinetic electromotive force value during the moving of the cooling zone through a plastically deformed section, it is revealed that this change in the electromotive force depends both on the degree of deformation and on the length of the deformation section. The dependences of the effect of plastic deformation on the value of the electromotive force have been established experimentally. The features of guidance of thermokinetic electromotive force have been established experimentally which consist in the determination of the influence of speed of movement of the cooling zone along the TiNi sample, thermal cycling, as well as the value of the applied to the titanium nickelide samples deformation on the value of the induced electromotive force.

Extent of application: the results are implemented into the teaching process of Educational Institution “Vitebsk State Technological University”, and into the manufacture of OOO “Industrial center MATEK-SPF”; Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”; State Scientific Institution “Institute of Technical Acoustics of National Academy of Sciences of Belarus”.

Field of application: machine-building, instrument engineering, robotechnics.