

На правах рукописи:

МОРОЗОВ Евгений Вячеславович

Термомеханические свойства и эластокалорический эффект в сплаве Ti_2NiCu в разных структурных состояниях

1.3.8. (01.04.07) Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

- Научный руководитель:** *Коледов Виктор Викторович*,
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник лаборатории магнитных явлений в
микроэлектронике ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
- Научный консультант:** *Шавров Владимир Григорьевич*
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный
сотрудник лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
- Официальные оппоненты:** *Ховайло Владимир Васильевич*
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры
ФНСиВТМ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС» (г. Москва)
Терешина Ирина Семеновна
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
кафедры физики твердого тела, ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва)
- Ведущая организация:** ФГБУН «Институт физики им. Х.И. Амирханова» Дагестанского
федерального исследовательского центра РАН (г. Махачкала)

Защита диссертации состоится «23» декабря 2022 г., в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.431.01 (Д212.296.03) при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Челябинский государственный университет» по адресу: 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» и на сайте <https://www.csu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.431.01 (Д212.296.03),
доктор физико-математических наук, доцент

М.А. Загребин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В современной науке и технике большое внимание уделяется поискам новых эффективных и экологически чистых способов охлаждения. Множество работ посвящено исследованиям по созданию твердотельных холодильников и тепловых насосов [1,2]. Для решения этой проблемы многие авторы предлагают использовать калорические эффекты (КЭ) в твердых телах [3]. КЭ обусловлены изменением температуры твердых тел при воздействии внешних полей. Примерами КЭ являются магнитокалорический (МКЭ), электрокалорический и эластокалорический (ЭКЭ) эффекты, заключающиеся в изменении температуры при воздействии на образец магнитным полем, электрическим полем или полем внешних одноосных механических напряжений, соответственно. Максимальные значения КЭ достигаются вблизи фазовых переходов (ФП) различной природы. Например: МКЭ – вблизи точки Кюри или магнитоструктурного фазового перехода, ЭКЭ – вблизи термоупругого мартенситного перехода и т.д. Не менее актуальной проблемой является создание быстродействующих миниатюрных актюаторов и сенсоров. Для решения этой задачи используются материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ), обладающие термоупругим мартенситным переходом [4,5]. Например, в работе [6], опубликованной в 2018 г., сообщается о разработке рекордного по быстродействию микроактюатора с эффектом памяти формы (ЭПФ), работающего с частотой 35 Гц. В этой и других работах применяются различные приемы для обеспечения высокоскоростной термомеханической активации, однако, ранее не применялся отвод тепла проточной водой.

ЭКЭ и ЭПФ можно охарактеризовать как обратные друг к другу эффекты. Если ЭПФ, это – обратимая деформация материала под нагрузкой при изменении температуры, то ЭКЭ – изменение температуры теплоизолированного сплава при механической деформации.

Для получения стабильных значений ЭКЭ требуются сплавы с повышенными прочностными характеристиками, такие, например, как сплавы семейства Ti-Ni. Ключевым параметром для холодильных систем является удельная мощность W , т.е. количество тепла, передаваемое для охлаждения в единицу времени на 1 грамм массы рабочего тела [7]. Для достижения максимальной мощности тепловых машин требуется повышать частоту циклов рабочего тела, из-за чего изучение кинетики ФП и КЭ приобретает большое значение.

В настоящей работе изучается сплав Ti_2NiCu . Добавление меди в $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ обеспечивает возможность изготовления сплава в виде прочных тонких (несколько десятков мкм) лент методом быстрой закалки из расплава [8]. Механическая стабильность быстрозакаленных лент и высокие значения ЭКЭ и ЭПФ, при толщине порядка 30 мкм обеспечивают этому материалу уникальное сочетание свойств, благоприятное для изучения кинетики термоупругого мартенситного ФП. Для

приготовления аморфных образцов лент сплава используется метод спиннингования [9]. Для получения поликристаллических лент используется метод отжига аморфных лент [10].

Как известно, максимум КЭ наблюдается вблизи фазовых переходов. Поэтому наибольший интерес при изучении ЭКЭ и ЭПФ в поликристаллическом сплаве Ti_2NiCu представляет температурный диапазон от 300 К до 365 К, включающий интервал термоупругого мартенситного ФП первого рода. Максимальное механическое напряжение при исследовании ЭКЭ в этом сплаве велико, но не превышает несколько сотен МПа из-за возможности разрушения образцов.

В литературе описаны экспериментальные исследования ЭКЭ в полимерах, в частности, в лентах латексной резины [11]. Например, показано, что в [12] ЭКЭ составляет 10 К при деформации 500% процентов. Представляет интерес сравнение проявлений ЭКЭ в полимерах, аморфных и поликристаллических сплавах и поиск кинетических эффектов, которые оказывают влияние на такие практически важные характеристики, как удельная мощность рабочего тела теплового насоса с ЭКЭ и быстродействие актюатора с ЭПФ.

В 2018 году был опубликован обзор [13] с анализом шести наиболее перспективных сплавов с ЭКЭ: NiTi, Ti-Ni-Cu, Ni-Fe-Ga, Co-Ni-Al, Cu-Zn-Al и Ni-Ti-Hf. Отмечено, что максимальная величина ЭКЭ достигается в сплаве NiTi и составляет 22 К [13]. Анализ современной литературы показывает, что, несмотря на обнаруженные вполне конкурентоспособные значения ЭКЭ [14], задача по эмпирическому изучению кинетики ЭКЭ практически не ставилась. В ряде работ, например, в [15] приводится попытка теоретического расчета ЭКЭ для материалов со структурным ФП. Однако, при теоретическом рассмотрении ЭКЭ, до сих пор не проводился вывода уравнений состояния рабочего тела вблизи термоупругого мартенситного перехода, учитывающего нелинейные члены разложения свободной энергии по параметру порядка (деформации). Описание механизма структурных ФП, возможность теоретического расчета ЭКЭ и умение использовать скрытую теплоту фазового перехода, как средство преобразования тепловой энергии в механическую и обратно, также являются актуальными темами в современной физике конденсированного состояния и альтернативной энергетике.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое изучение термомеханических свойств и ЭКЭ сплава Ti_2NiCu , находящегося в разных структурных состояниях: аморфном и поликристаллическом. Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

1. Экспериментальное изучение термомеханических свойств аморфных и поликристаллических лент быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu в температурном диапазоне, включающем интервал мартенситного структурного ФП.

2. Изучение ЭКЭ в аморфных и поликристаллических образцах быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu при периодическом воздействии растягивающих механических напряжений с частотой до 50 Гц.

3. Разработка теоретической модели для объяснения ЭКЭ с использованием разложения свободной энергии сплава до четвертого порядка по деформации и второго порядка по температуре.

4. Оценка возможности использования быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu в технологиях быстродействующих актюаторов и твердотельного охлаждения.

Научная новизна работы

Научная новизна работы определяется следующими результатами, полученными впервые:

1. Обнаружен и изучен эффект автоколебаний под действием нагрева постоянным электрическим током плотностью от 12 А/мм^2 до 17 А/мм^2 в подвешенной быстрозакаленной аморфной ленте сплава Ti_2NiCu толщиной 40 мкм при нагрузке от 0,4 до 0,9 МПа.

2. Механический отклик актюатора на основе быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu с термоупругим мартенситным ФП, в условиях охлаждения проточной водой, сохраняется при длительности возбуждающих (активирующих) электрических импульсов до 2 мс. Минимальная длительность механического отклика с учетом задержки составила 8 мс, что соответствует частоте колебаний 125 Гц при периодической активации.

3. Изучен ЭКЭ в аморфных быстрозакаленных лентах сплава Ti_2NiCu при воздействии внешними периодическими механическими напряжениями с частотой циклов до 10 Гц, механических нагрузках до 300 МПа в температурном диапазоне от 300 до 365 К. Максимальное значение ЭКЭ составляет -2 К при нагрузке 300 МПа.

4. Изучен ЭКЭ в поликристаллических быстрозакаленных лентах сплава Ti_2NiCu при частотах до 50 Гц, внешних механических нагрузках до 300 МПа и в температурном диапазоне от 300 К до 365 К. Максимальное значение ЭКЭ в сплаве Ti_2NiCu , составило +21 К при нагрузке 300 МПа и температуре 340 К, что соответствует температурной точке окончания обратного термоупругого мартенситного структурного ФП (A_f).

Научная и практическая значимость работы.

Результаты исследования адиабатического изменения температуры при периодическом одноосном воздействии внешних механических напряжений величиной до 300 МПа с частотами от 0 до 50 Гц в диапазоне температур (от 300 К до 365 К), включающим в себя область структурного ФП (от 325 К до 347 К) и две прилегающие температурные области ниже ФП (300 К до 325 К) и выше ФП (от 347 К до 360 К) позволяют оценить максимальную разность температур и количество тепла, передаваемое за один цикл охлаждения перспективных твердотельных холодильников и

тепловых насосов на основе ЭКЭ. Достигнутые в работе значения ЭКЭ в поликристаллическом сплаве Ti_2NiCu , а также относительная дешевизна (по сравнению с МКЭ) указывают на практическую возможность реализации экспериментального прототипа твердотельного холодильника, основанного на рабочем теле из быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu . Быстродействующие микроактюаторы на основе быстрозакаленных сплавов Ti_2NiCu могут найти применение в приборостроении.

Теоретическое описание процессов при термоупругом ФП дает возможность удовлетворительно количественно описать физические процессы при твердотельном охлаждении и решать расчётные инженерные задачи по разработке тепловых насосов на основе ЭКЭ и актюаторов с ЭПФ.

Методология и методы исследования.

В работе для проведения структурных исследований использовалась методика электронной микроскопии. Теплофизические измерения проводились методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Для термомеханических измерений и измерений ЭКЭ были созданы оригинальные экспериментальные установки, в которых измерение температуры в диапазоне от 300 К до 360 К проводилось пирометрическим и тепловизионным методами. Образец испытывал деформацию под действием внешней периодической нагрузки величиной до 300 МПа и частотой 50 Гц, которую развивал специально сконструированный актюатор.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для лент аморфных сплавов характерен эффект возникновения автоколебаний в плоскости вертикально подвешенной нагруженной ленты, под действием нагрева постоянным электрическим током.
2. Быстродействие актюатора на основе быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu с эффектом памяти формы, охлаждаемого проточной водой, составляет 125 Гц с учетом эффекта задержки механического отклика по отношению к возбуждающему электрическому импульсу.
3. При частоте циклов механического воздействия до 10 Гц в аморфных лентах сплава Ti_2NiCu , максимальное значение эластокалорического эффекта составило $\Delta T = -2$ К.
4. Величина эластокалорического эффекта в поликристаллических лентах сплава Ti_2NiCu не зависит от частоты внешнего механического воздействия до частот 50 Гц. Максимальное значение эластокалорического эффекта составило $\Delta T = +21$ К в температурной точке окончания обратного мартенситного перехода.
5. Теоретическая модель с разложением свободной энергии до четвертого порядка по деформации и второго порядка по температуре, описывающая величину и знак эластокалорического

эффекта в аморфных и поликристаллических лентах сплава Ti_2NiCu вблизи мартенситного фазового перехода.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность научных результатов подтверждается их воспроизводимостью при неоднократном повторении, а также надежностью примененных методов исследования. Полученные результаты были заслушаны на специализированных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах. Результаты докладывались на следующих конференциях и научных семинарах:

1) Конференция-конкурс молодых ученых им. И.В. Анисимкина, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва: 2015, 2017, 2018, 2019, 2020.

2) Семинар «Физика магнитных явлений» кафедры физики конденсированного состояния ЧелГУ, Челябинск: 2016, 2018.

3) Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов», Черноголовка: 2016, 2020.

4) Международный семинар «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», Махачкала: 2017, 2019.

5) Международная конференция TherMag, Дамстадт (Германия), 2018.

6) Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии», Брест (Беларусь), 2019; Минск (Беларусь), 2021.

7) Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», Тольятти, 2019.

8) Международная научная конференция «Донецкие чтения», Донецк, 2019.

9) Семинар «Дни калорики в Дагестане: мультикалорические материалы и их приложения», Гуниб, 2020.

10) Международная конференция «Химическая термодинамика и кинетика», Нижний Новгород, 2020.

11) Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния Вещества СПФКС, Екатеринбург, 2021.

12) Международный симпозиум ICFM, Алушта, 2021.

13) 2-й международный семинар: «Дни калорики в Челябинске: функциональные материалы и их приложения», Челябинск, 2021.

14) Международная конференция «Сплавы с памятью формы», Москва, 2021.

15) 3-й международный семинар «Дни калорики в Королеве: функциональные материалы и их приложения», г. Королев, 2022 г.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе: 9 – в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus [A1 – A9], 6 – в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ [A10 – A15], 1 – патент РФ на изобретение [A16]. Список основных публикаций [A1 – A16] приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора.

Изложенные в диссертации результаты получены автором лично либо совместно с сотрудниками лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Автором сделан определяющий вклад в постановку задач исследования, создание новых экспериментальных установок, проведение экспериментов, обработку результатов, выполнение теоретических выкладок и расчетов. Эксперименты по изучению эластокалорического эффекта методом высокоскоростной термографии проводились автором диссертации на кафедре молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Экспериментальная работа проводилась под руководством д.ф.-м.-н. В.В. Коледова. Теоретические результаты получены при научном консультировании проф. В.Г. Шаврова.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Содержание диссертации соответствует пункту 3. «Изучение экспериментального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния» и пункту 6. «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами» паспорта специальности 1.3.8. (01.04.07) – Физика конденсированного состояния.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, приложения, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка публикаций автора из 16 наименований и списка цитируемой литературы из 179 наименований. Работа изложена на 131 странице, включая 40 формул, 66 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая

значимость полученных результатов, методология и методы исследования, представлены данные об апробации работы и выносимые на защиту научные положения, раскрыта структура и объем диссертации по главам.

В **первой главе** приведен обзор современной научной литературы, посвященной исследованиям термомеханических свойств интерметаллидов с термоупругим ФП и ЭПФ под действием температуры и внешней механической нагрузки. Также приведены литературные данные о термодинамических основах функциональных свойств, КЭ и методах их изучения в твердых телах и полимерах. Особое внимание уделено ЭКЭ. Проанализированы работы по экспериментальному изучению и теоретическому описанию кинетики структурных ФП и ЭКЭ в материалах с ЭПФ.

Вторая глава является методической и посвящена описанию методов получения исследуемых образцов, а также методам их экспериментальных исследований.

Описаны экспериментальные методики для исследования термоупругих свойств, используемые для изучения аморфных и поликристаллических лент. Описана оригинальная методика прямого измерения ЭКЭ при внешнем периодическом воздействии нагрузки величиной до 300 МПа и частотой до 50 Гц.

В **третьей главе** изучались термомеханические свойства сплава Ti_2NiCu .

В **разделе 3.1** построены зависимости относительной деформации образца быстрозакаленных лент сплава Ti_2NiCu в аморфном состоянии от приложенного механического напряжения и температуры. Экспериментально показано, что для аморфного сплава Ti_2NiCu в исследованном диапазоне температур и механических напряжений справедливо понятие модуля Юнга и коэффициента теплового расширения $E = 128$ ГПа, $\alpha = 1,9 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

В **разделе 3.2** обнаружен новый эффект, заключающийся в возникновении автоколебаний в плоскости свободно подвешенной аморфной ленты, под действием постоянного электрического тока. В сплаве Ti_2NiCu эффект наблюдался при нагреве электрическим током плотностью от 12 А/мм² до 17 А/мм² под нагрузкой от 0,4 до 0,9 МПа. Эффект был, также, обнаружен и в аморфных лентах сплавов Ni-Fe-B, Ni-Fe-Co-Sr-B и $Co_{67}Fe_4V_{12}Si_{13}Cr_4$.

В ходе экспериментов замечено два типа колебаний, отличающихся по частоте (рис. 1.(а)). Экспериментально измерены параметры колебаний, построены амплитудные и частотные зависимости (рис. 1.(б)). Экспериментально отмечено, что в поликристаллической ленте колебания не появляются. Предложено качественное объяснение, описывающее эффект.

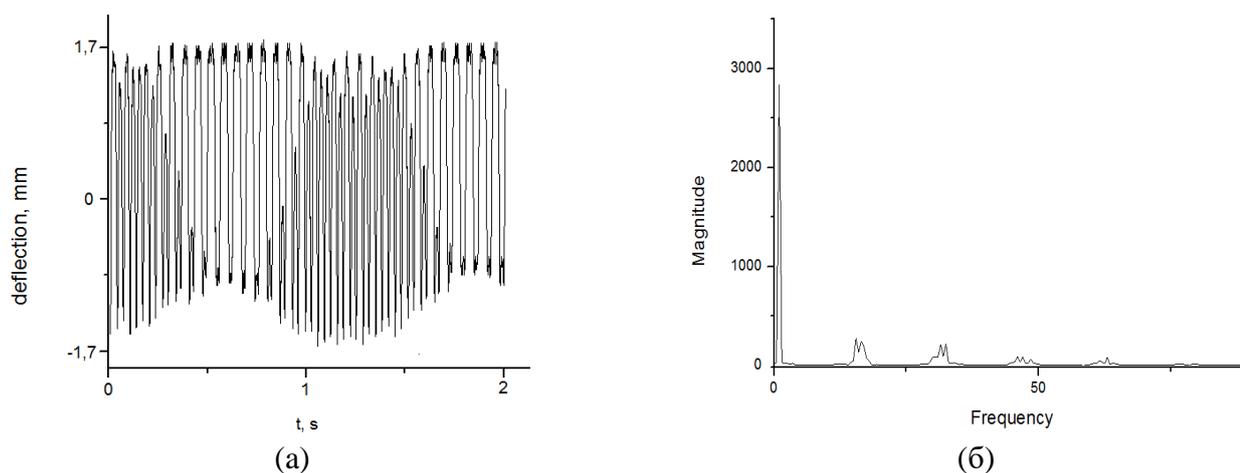


Рис. 1. Эффект возникновения автоколебаний быстроокаленной аморфной ленты сплава Ti_2NiCu при постоянном токе величиной 15 A/mm^2 . (а) Отклонения подвешенной ленты от положения. (б) Частотный спектр колебаний аморфной ленты.

При повышении тока происходит увеличение температуры образца, от чего аморфная лента нагревается до температуры появления нестабильных центров кристаллизации, аналогично эффекту кавитации в жидких средах, что и наблюдается как дрожание. Причина того, что колебания происходят в плоскости ленты, объясняется бернуллиевыми силами и воздушной конвекцией вокруг плоскостей ленты.

В разделе 3.3. приведены результаты исследования образцов быстроокаленных лент сплава Ti_2NiCu методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и методом исследования зависимости растяжения образца от температуры при разных значениях внешней механической нагрузки. Для поликристаллического сплава Ti_2NiCu , найдены характерные температуры начала и конца прямого и обратного мартенситного перехода, которые составляют $M_s = 335 \text{ K}$, $M_f = 325 \text{ K}$, $A_s = 332,8 \text{ K}$, $A_f = 340,5 \text{ K}$, соответственно, и скрытая теплота фазового перехода $\lambda = 11,5 \text{ Дж/г}$.

В разделе 3.4. изучен импульсный отклик актюатора на основе быстроокаленного сплава Ti_2NiCu , омываемого водой, с термоупругим мартенситным переходом и ЭПФ на одиночный импульс электрического тока. Показано, что механический отклик актюатора сохраняется при уменьшении длительности возбуждающих (активирующих) электрических импульсов до 2 мс. Высокоскоростная активация сопровождается задержкой механического импульса по сравнению с возбуждающим электрическим импульсом. Минимальная длительность механического импульса с учетом задержки составила 8 мс, что соответствует частоте периодических колебаний 125 Гц. Оценки показывают, что время задержки включает, как время механической инерции, так и время тепловой инерции, связанное с теплопередачей. Сделана оценка для возможного ограничения скорости активации за счет кинетических явлений при термоупругом мартенситном переходе. Наблюдается эффект задержки импульса активации по сравнению коротким импульсом возбуждающего электрического тока.

В четвертой главе изучался ЭКЭ в латексной резине и в сплаве Ti_2NiCu с аморфной и поликристаллической структурой.

В разделе 4.1. изучался ЭКЭ в латексной резине. Структура латексной резины представляет собой сеть полимерных цепей. При растяжении образца из латексной резины цепи образца растягиваются, принимая таким образом, наименее вероятную конфигурацию. Это означает уменьшение энтропии эластомера и свидетельствует об энтропийной природе упругости. Из вышесказанного можно заключить, что причиной нагрева образца при растяжении и охлаждения его при обратном сжатии является энтропийная упругость.

На рис. 2. изображена зависимость температуры образца от его деформации (ЭКЭ) при воздействии на него периодической нагрузки величиной 4 МПа.

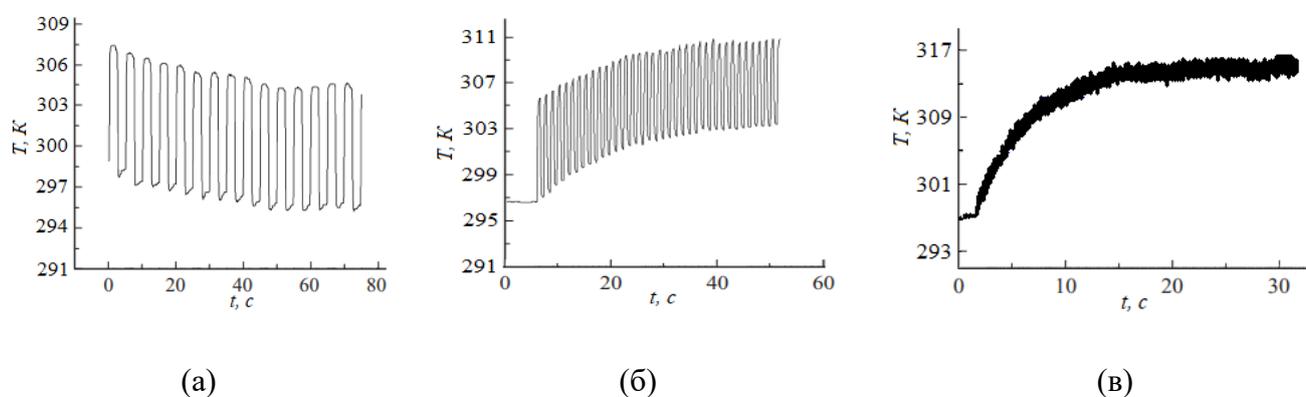


Рис. 2. Временные зависимости температуры в образце резины при периодическом растяжении с частотой: а) 0,2 Гц, б) 0,8 Гц, с) 4 Гц.

Из приведенных графиков видно, что в изучаемом частотном диапазоне (0,1 Гц – 4 Гц) имеют место три характерных интервала частот. Назовем их: низкие (0,1 Гц – 0,3 Гц), средние (0,4 Гц – 0,8 Гц) и высокие (1 Гц – 4 Гц).

При низких частотах средняя температура образца уменьшается (рис. 3а). Это объясняется тем, что при быстром (адиабатическом) растяжении эластомер нагревается. Далее, находясь в растянутом состоянии, он охлаждается, испытывая теплообмен с окружающей средой. После чего происходит быстрое (адиабатическое) сжатие, в результате которого, температура образца падает и, таким образом, становится ниже комнатной.

В среднечастотном диапазоне (рис. 2б) в эластомере виден эффект саморазогрева. Причиной этого эффекта является внутреннее трение, которое и повышает среднюю температуру образца, но в отличие от низких частот, времени теплообмена с окружающей средой недостаточно для того, чтобы средняя температура образца уменьшалась или оставалась постоянной.

Как видно из рис. 3а и рис. 3б, для частот низкого и среднего диапазона величина ЭКЭ почти не меняется. При высоких частотах циклов растяжения-сжатия величина ЭКЭ сильно падает (рис.

2в). Этот кинетический эффект объясняется тем, что, при малых и средних частотах, полимерные цепи, сшитые между собой перекрестными связями, из-за растяжения вытягиваются, вызывая изменение перекрестных связей, а при обратном сжатии приходят в исходное состояние. При больших частотах, сеть полимерных цепей и перекрестных связей, также изменяется при растяжении, но времени на их восстановление при сжатии оказывается недостаточным, что и является причиной уменьшения ЭКЭ при частотах растяжения-сжатия образца больше 1 Гц.

Для обсуждения возможности практического использования латексной резины для эластокалорического охлаждения построена зависимость удельной мощности эластомера, вычисленной по формуле (1) от частоты циклов растяжения-сжатия при относительной деформации равной 500% (рис. 3).

$$W = c \cdot f \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость, f – частота циклов «растяжение – сжатие» рабочего тела, ΔT – значение ЭКЭ.

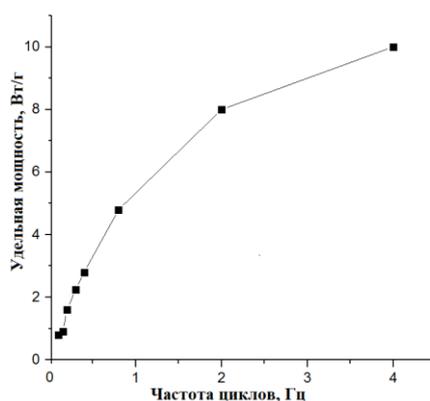


Рис. 3. Зависимость удельной мощности рабочего тела с ЭКЭ из эластомера, рассчитанной по формуле (1) от частоты циклов растяжения-сжатия при относительном удлинении 500%

Как видно из представленной зависимости, удельная мощность рабочего тела на основе эластомера увеличивается с увеличением частоты циклов и, при частоте равной 4 Гц, достигает 10 Вт/г. Основная проблема заключается в том, что при больших частотах имеет место очень сильный саморазогрев, от чего долговечность работы образца составляет менее 1000 циклов, что составляет менее 5 минут непрерывной работы. Для создания твердотельного холодильника необходим материал, способный выдержать такое количество циклов, чтобы время работы составляло не менее $10^7 - 10^8$ секунд.

В разделе 4.2. ЭКЭ в аморфных лентах сплава Ti_2NiCu изучался экспериментально путем воздействия на образец внешней периодической силой с разной частотой циклов.

При изучении ЭКЭ были получены и обработаны ИК- термограммы. Пример изображений, полученных скоростным ИК-термографом от нерастянутой и растянутой аморфной ленты сплава

Ti₂NiCu показаны на рис. 4а и рис. 4б. При растяжении лента охлаждается, что отражено изменением цвета элементов изображения (пикселей). Для количественного измерения ЭКЭ строились диаграммы распределения количества пикселей по температуре (рис. 4 в и рис. 4г). На каждой из диаграмм выделяется пик фона с комнатной температурой 300 К (показан черным цветом) и пик, отвечающий температуре образца.

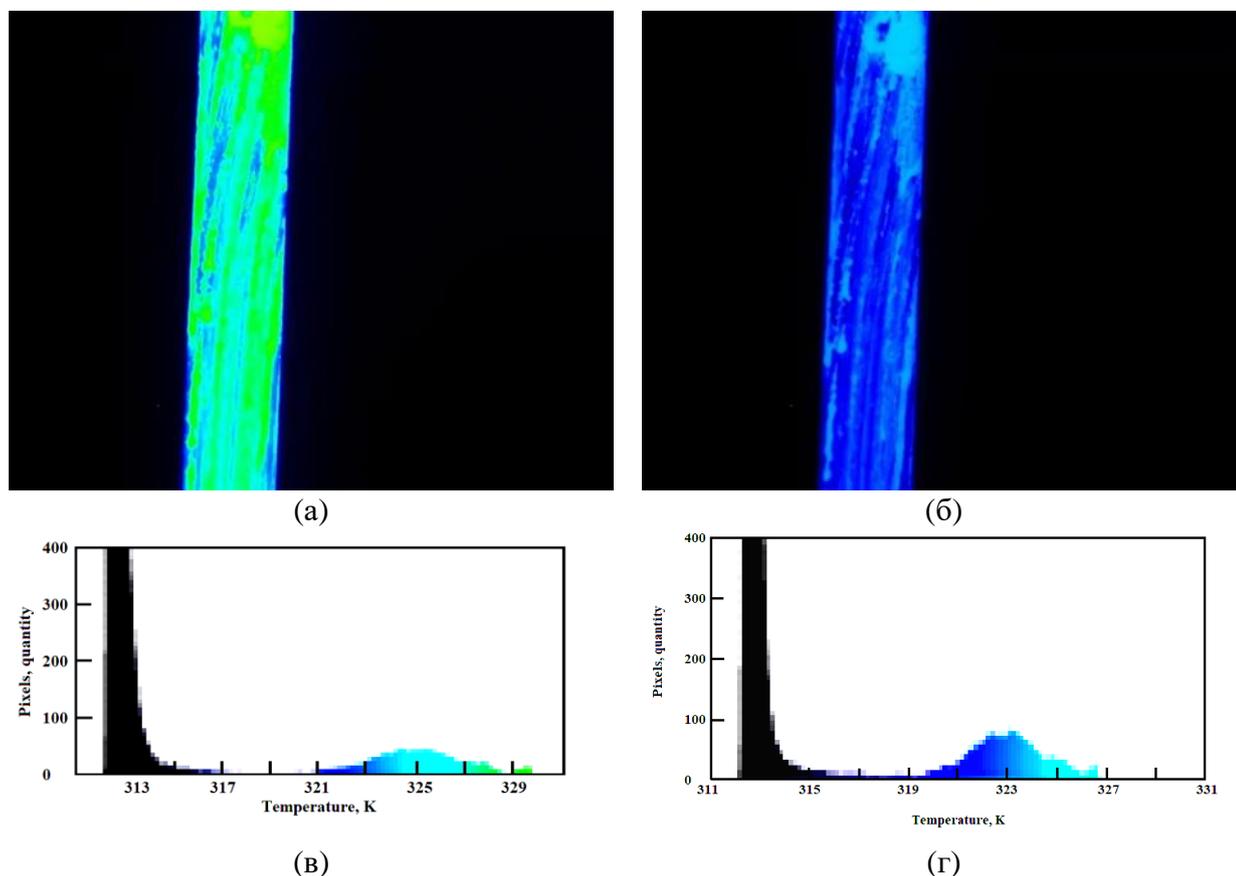


Рис. 4. ИК-термограммы для изучения ЭКЭ в аморфной ленте Ti₂NiCu. (а) недеформированная лента, (б) деформированная лента, (в) диаграмма температурного распределения в недеформированной ленте, (г) диаграмма температурного распределения в деформированной ленте.

При изменении частоты циклов внешней силы до 10 Гц, величина ЭКЭ не изменялась, что свидетельствует о том, что в данном диапазоне ЭКЭ не зависит от частоты воздействия.

Расчетное значение ЭКЭ аморфного сплава Ti₂NiCu ($\Delta T=2K$) полученное из выражения [16]:

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\alpha K}{c\rho} \times \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

где ΔT – ЭКЭ, T – температура образца, α – коэффициент теплового расширения, k – коэффициент всестороннего сжатия ($K=E/(3(1-2\nu))$), E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона), c – удельная теплоёмкость образца, ρ – плотность образца, $\Delta l/l$ – относительная деформация образца при растяжении (l – длина образца, Δl – линейная деформация образца), в соответствии экспериментально полученному значению ЭКЭ.

Для создания твердотельных холодильников основным параметром является удельная мощность (1). Таким образом, получим, что при $f = 10$ Гц и $\Delta T = 2$ К, $W = 10$ Вт/г. В указанном диапазоне частот удельная мощность для аморфных лент сплава близка к значению для резины. Однако в отличие от нее не испытывает насыщения при увеличении частоты циклов. Это указывает направление исследований по повешению W – увеличение частоты циклов f .

В разделе 4.3. ЭКЭ в поликристаллических лентах сплава Ti_2NiCu изучался экспериментально, путем воздействия на образец внешней периодической силой с разной частотой циклов, в зависимости от начальной температуры. Экспериментально показано (рис. 5), что максимальное значение ЭКЭ достигается в температурной точке $A_f = 340,5$ К.

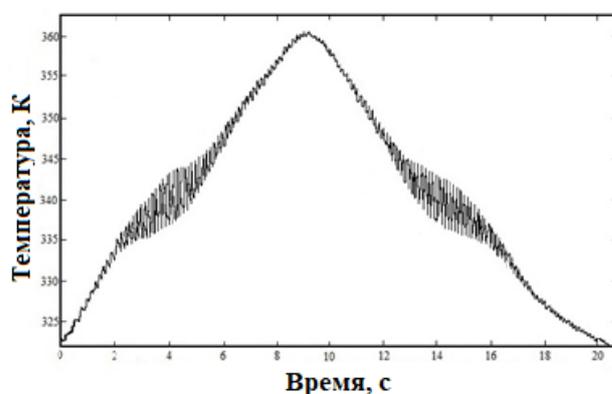


Рис. 5. Зависимость температуры образца от времени при нагреве и охлаждении при частоте циклов вынуждающей силы 7,5 Гц, максимальная нагрузка 100 МПа.

Достигнуто максимальное значение ЭКЭ в сплаве Ti_2NiCu (рис. 6) равное +21 К при нагрузке 300 МПа и частоте циклов деформации до 3 Гц.

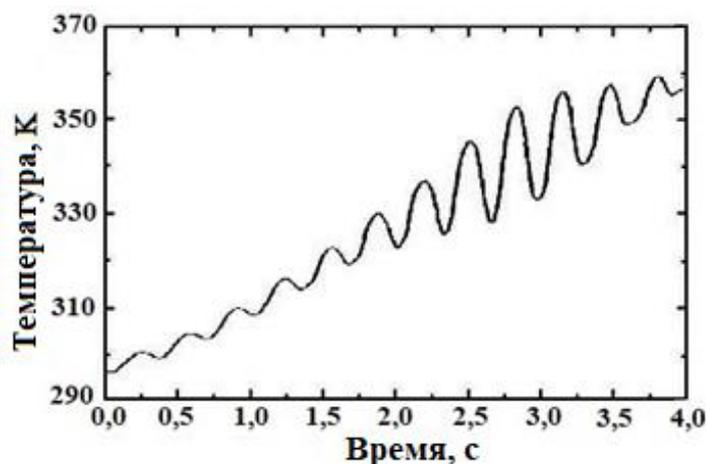


Рис. 6. Зависимость температуры образца от времени при постепенном нагреве под воздействием внешнего периодического механического напряжения частотой 3,6 Гц, максимальной величиной 300 МПа.

Обнаружено, что величина ЭКЭ не зависит от частоты циклов в интервале от 0 до 50 Гц. Максимальная удельная мощность, рассчитанная по формуле (1), составляет $W = 150$ Вт/г при

приложенном внешнем механическом периодическом напряжении величиной 100 МПа с частотой 50 Гц. ЭКЭ при этом составляет 6 К.

Формула (3), для оценки максимального значения ЭКЭ, приведенная в [15] также была экспериментально подтверждена.

$$\Delta T(S, 0 \rightarrow f = p, \sigma) \simeq \frac{T\Delta S(T_i, 0 \rightarrow f = -p, \sigma)}{c} \quad (3)$$

Подставив значения ($\lambda = 1,15 \cdot 10^4$ Дж/кг, $c \approx 550$ Дж/(кг·К)) и, учитывая, что $T\Delta S = \lambda m$, скрытой удельной теплоте термоупругого мартенситного перехода, и $C = cm$, где c – удельная теплоемкость, получаем $\Delta T \approx 20,5$ К.

В разделе 4.4. представлена теоретическая модель для описания ЭКЭ и мартенситного ФП [17]. Для теоретического описания ЭКЭ при структурном фазовом переходе используем разложение функции свободной энергии до четвертого порядка по деформации и второго порядка по температуре в окрестности точки T_c :

$$F = \frac{a}{2}\varepsilon^2 + \frac{b}{3}\varepsilon^3 + \frac{c}{4}\varepsilon^4 - \frac{A}{2}\Delta T^2 - \sigma\varepsilon \quad (4)$$

где $a = a_0(T - T_c)$; но b , c и A не зависят от температуры. T_c – температура фазового перехода. По определению:

$$dF = -pdV - Sd\Delta T \quad (5)$$

Поскольку изучаемый эффект подразумевает только одноосные деформации в области фазового перехода и учитывая, что $\sigma = -p$, получаем:

$$dF = \sigma\varepsilon - Sd\Delta T \quad (6)$$

Из (6) мы можем сделать вывод:

$$\frac{\partial F}{\partial(\Delta T)} = -\Delta S \quad (7)$$

Равновесное значение параметра порядка ε достигается при минимуме функции $F(\varepsilon)$. Следовательно:

$$\frac{\partial F}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (8)$$

Подставляя выражение (3) в (8), получаем тепловое уравнение состояния (9). График этого выражения изображен на рис. 6 [A9]. Коэффициенты, описывающие кубическую зависимость, взяты следующие: $a = 1,4 \cdot 10^{10}$ Па, $b = -1,5 \cdot 10^{12}$ Па и $c = 5,3 \cdot 10^{13}$ Па. Характерные точки максимума и минимума на красной кривой являются точками потери фазовой устойчивости (см. рис. 7). Участок кривой между ними не имеет физического смысла и в эксперименте наблюдаться не будет. Голубая кривая дает качественное изображение экспериментальной зависимости, соответствующей фазовому переходу первого рода с определенным гистерезисом.

$$\sigma = a\varepsilon + b\varepsilon^2 + c\varepsilon^3 \quad (9)$$

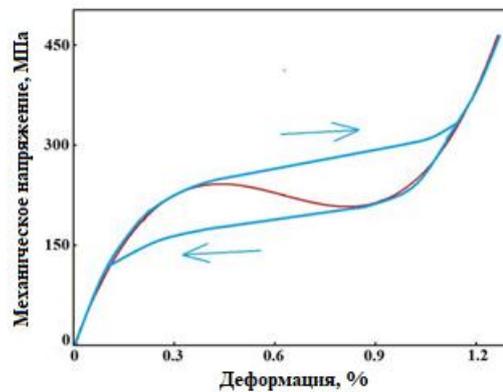


Рис. 7. Эффект сверхупругости: красная линия – теоретическая кривая, голубая линия – ожидаемая экспериментальная кривая (стрелками показаны направления изменения механического напряжения) [A9].

Изменение энтропии ΔS в твердом теле имеет вид:

$$\frac{\partial F}{\partial(\Delta T)} = -\Delta S \quad (10)$$

Подставляя выражение (4) в (10), получаем калорическое уравнение состояния:

$$\Delta S = A\Delta T - \frac{1}{2}a_0\varepsilon^2 \quad (11)$$

Поскольку деформация происходит в адиабатических условиях ($\Delta S = 0$), получаем:

$$\Delta T = \frac{a_0\varepsilon^2}{2A} \quad (12)$$

Полученное выражение для ЭКЭ (12) показывает квадратичную зависимость от деформации при фазовом переходе. Для оценки значения ΔT примем $a_0 = a/(T - T_c)$, $A = c_M \cdot \rho / T$, где $a = 1,4 \times 10^{10}$ Па; $(T - T_c) = 5$ К — половина ширины гистерезиса, $c_M = 500$ Дж/(кг·К) — удельная теплоемкость в мартенситном состоянии; $\rho = 7 \times 10^3$ кг/м³ — плотность; $T = A_f = 340$ К — температура образца. Тогда $a_0 = 2,8 \times 10^9$ Па/К; $\varepsilon = 1,2 \times 10^{-2}$; $A = 10^4$ Дж/(м³·К²). В результате получено соотношение для расчета ЭКЭ, а также два уравнения состояния для материалов с ЭПФ. Проверка на сплаве Ti₂NiCu показывает хорошее совпадение с экспериментальным результатом. $\Delta T_{\text{теор}} = 20,1$ К, $\Delta T_{\text{эксп}} = 21$ К.

В пятой главе для оценок возможности практического использования ЭКЭ для создания термодинамических машин предложена принципиальная схема эластокалорического теплового насоса, представленная на рис. 8. Данная тепловая машина предназначена для разделения жидкости определенной температуры на охлажденную и нагретую относительно начальной температуры. Таким образом, по своему назначению она может быть названа тепловым эластокалорическим сепаратором (ТЭС).

Жидкость или газ с температурой T , закачиваемая насосом 1, через трубку попадает в резиновую камеру 2, внутри которой жестко закреплены ленты, под воздействием внешней периодической силы определенной частоты. Далее жидкость попадает на дивертор (гидравлический переключатель) 3, отделяющий нагретую жидкость от охлажденной и работающий синхронно с частотой растяжения-сжатия рабочего тела с ЭКЭ в виде лент.

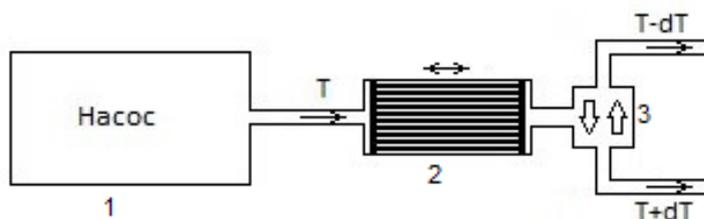


Рис. 8. Принципиальная схема ТЭС.

Рассмотрим детально данный процесс. При растяжении лент сплава с ЭПФ на величину порядка нескольких % их температура (близкая к A_f) повышается вследствие ЭКЭ. Резиновые стенки камеры также испытывают деформацию, но величина ЭКЭ резины, как показано в разделе 4.1, при таких деформациях ничтожно мала. Нагретые ленты нагревают жидкость, которая через дивертор попадает в «теплую» трубку. При дальнейшем сжатии лент происходит их охлаждение. Жидкость, текущая через камеру, охлаждается, отдавая тепло лентам. Охлажденная жидкость подается на дивертор, который направляет ее в «холодную» трубку.

Проблема данной тепловой машины в том, что удельная теплоемкость жидкости (к примеру воды) гораздо больше удельной теплоемкости твердотельных металлических лент. А это значит, что изменение температуры воды будет меньше, чем значение ЭКЭ для рабочего тела.

Для решения этой проблемы можно составить каскадную схему из таких устройств, как показано на рис. 9.

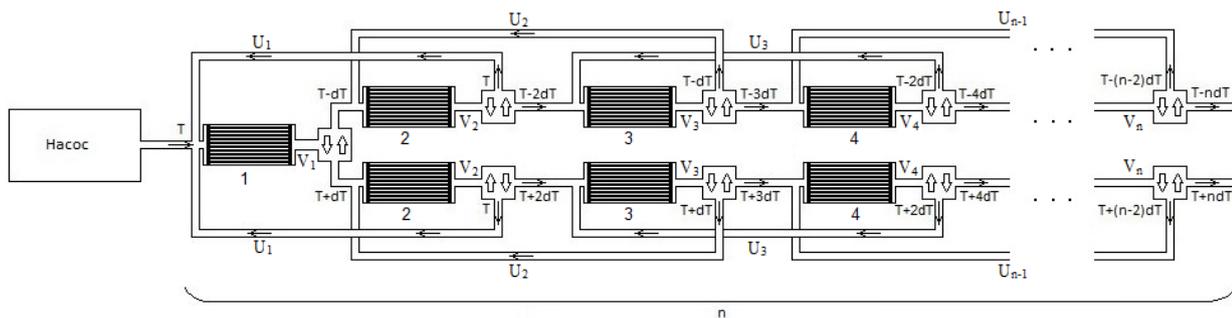


Рис.9. Общая (каскадная) схема ТЭС

Принцип работы данной схемы схож с предыдущей. Доработано лишь то, что «лишняя» вода, т.е. нагретая в верхней части схемы и охлажденная в нижней ее части, при помощи трубок перекачивается в трубку с соответствующей температурой. Для правильного направления движения жидкости используются клапаны.

Используя ТЭС такого вида, на выходе можно получить охлажденную и разогретую воду на температуру величиной ndT , где n – количество каскадов из камеры и дивертора для холодной и горячей воды. Таким образом, мы получаем устройство, разделяющая протекающую через нее жидкость температурой T на нагретую (температурой $T+ndT$) и охлажденную (температурой $T - ndT$) за счет энергии механической вибрации.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

В заключении сформулируем основные результаты работы.

1. Показано, что для быстрозакаленных лент из аморфного сплава Ti_2NiCu актуально понятие модуля Юнга и коэффициента теплового расширения в интервале температур от 300 К до 420 К. Экспериментально измеренные величины составили $E = 128 \pm 4$ ГПа и $\alpha = (1,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

2. В подвешенной аморфной ленте быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu наблюдается эффект появления автоколебаний под действием постоянного электрического тока величиной от 12 А/мм² до 17 А/мм², и нагрузке от 0,4 до 0,9 МПа. Колеблющаяся быстрозакаленная лента имеет 2 вида колебаний. Первый – колебания маятника, второй – колебания струны, происходящие в плоскости ленты. Предложена физическая модель, качественно объясняющая эффект колебаний в подвешенной быстрозакаленной аморфной ленте под действием постоянного электрического тока.

3. Механический отклик актюатора на основе быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu с термоупругим мартенситным ФП, в условиях охлаждения проточной водой, сохраняется при длительности возбуждающих (активирующих) электрических импульсов до 2 мс. Минимальная длительность механического отклика с учетом задержки составляет 8 мс, что соответствует частоте колебаний 125 Гц при периодической активации.

4. Измерен ЭКЭ в латексной резине при частотах до 4 Гц, деформациях до 700% и температуре 300 К. Максимальная измеренная величина эффекта составила 14 К. Показано, что в латексной резине, при деформациях величиной порядка сотен процентов, зависимость ЭКЭ в образце от его удлинения является нелинейной. При увеличении частоты периодического механического деформирования, ЭКЭ снижается. В результате исследования ЭКЭ при периодическом воздействии в диапазоне частот от 0 до 4 Гц растягивающей силы были выявлены три диапазона частот циклов, при которых проявляются различные термодинамические процессы: эластокалорическое охлаждение, саморазогрев и уменьшение ЭКЭ. Произведена оценка удельной мощности образца латексной резины в зависимости от частоты растягивающей силы. Удельная мощность достигает максимального значения при относительной деформации 500% и частоте циклов внешнего воздействия $f = 4$ Гц и равна $W = 10$ Вт/г.

5. Измерен ЭКЭ в аморфных быстрозакаленных лентах сплава Ti_2NiCu при частотах до 10 Гц, механических нагрузках до 300 МПа в температурном диапазоне от 300 К до 365 К. Максимальное значение ЭКЭ составляет -2 К при нагрузке 300 МПа. Это малое значение по сравнению с полимерами и поликристаллическими лентами того же сплава. Экспериментально показано отсутствие зависимости ЭКЭ от частоты до 10 Гц. Расчетные данные об ЭКЭ хорошо согласуются с результатами, полученными экспериментально.

6. Измерен ЭКЭ в поликристаллических быстрозакаленных лентах сплава Ti_2NiCu при частотах механического растяжения до 50 Гц, механических нагрузках амплитудой до 300 МПа в температурном диапазоне от 300 К до 365 К. Максимальное значение ЭКЭ составляет +21 К при нагрузке 300 МПа и температуре $A_f = 340,5$ К (температура завершения обратного мартенситного перехода). Произведена оценка удельной мощности быстрозакаленной ленты сплава в зависимости от частоты растягивающей силы. Удельная мощность при частоте $f = 50$ Гц равна $W = 175$ Вт/г. Представлена теоретическая модель для описания ЭКЭ и мартенситного ФП, основанная на разложении функции свободной энергии до четвертого порядка по деформации и второго порядка по температуре. Получено выражение для ЭКЭ, а также два уравнения состояния для описания материалов с ЭПФ. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений ЭКЭ для поликристаллического сплава Ti_2NiCu в точке A_f показывает хорошее совпадение: $\Delta T_{теор} = 20,1$ К, $\Delta T_{эсп} = 21 \pm 1$ К.

Список цитированной литературы

1. Gschneidner, K. A. Recent developments in magnetocaloric materials / Gschneidner K. A., Pecharsky V. K., Tsokol A. O. // Reports on progress in physics. – 2005. – Т. 68. – №. 6. – С. 1479.
2. Engelbrecht, K. Future prospects for elastocaloric device/ Engelbrecht K. // Journal of Physics: Energy. – 2019. – V. 1. – №. 2. – P. 021001.

3. Moya, X. Caloric materials near ferroic phase transitions. / X. Moya, S. Kar-Narayan, N. D. Mathur. // *Nature Materials*. – 2014. – V.13. – P.439.
4. De Volder, M. Pneumatic and hydraulic microactuators: a review / De Volder M., Reynaerts D. // *Journal of Micromechanics and microengineering*. – 2010. – V. 20. – №. 4. – P. 043001.
5. Wilhelm, E. Phase change materials in microactuators: Basics, applications and perspectives / Wilhelm E., Richter C., Rapp B. E. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2018. – V. 271. – P. 303-347.
6. Song, S. H. 35 Hz shape memory alloy actuator with bending-twisting mode/ S.H. Song, J.Y. Lee, H. Rodrigue // *Scientific reports*. – 2016. – T. 6. – №. 1. – C. 1-13.
7. de Oliveira, H. M. R. Specific forward/reverse latent heat and martensite fraction measurement during superelastic deformation of nanostructured NiTi wires / H.M.R. de Oliveira, H. Louche, E.N.D. Grassi // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – V. 774. – P. 138928.
8. Sitnikov, N. N. Shape memory effect in a rapidly quenched Ti50Ni25Cu25 alloy / N.N. Sitnikov, A.V. Shelyakov, I.A. Khabibullina et al. // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2017. – T. 2017. – №. 10. – C. 794-800.
9. Budhani, R. C. Melt-spinning technique for preparation of metallic glasses / Budhani R. C., Goel T. C., Chopra K. L. // *Bulletin of Materials Science*. – 1982. – T. 4. – №. 5. – C. 549-561.
10. Hristoforou, E. Nonuniformity in amorphous ribbon delay lines after stress and current annealing / Hristoforou E., Reilly R. E. // *Journal of applied physics*. – 1991. – T. 69. – №. 8. – C. 5008-5010.
11. Xie, Z. Comparison of direct and indirect measurement of the elastocaloric effect in natural rubber / Xie Z., Sebald G., Guyomar D. // *Applied Physics Letters*. – 2016. – T. 108. – №. 4. – C. 041901.
12. Xie, Z. Temperature dependence of the elastocaloric effect in natural rubber / Xie Z., Sebald G., Guyomar D. // *Physics Letters A*. – 2017. – T. 381. – №. 25-26. – C. 2112-2116.
13. Sehitoglu, H. Elastocaloric effects in the extreme / Sehitoglu H., Wu Y., Ertekin E. // *Scripta Materialia*. – 2018. – V. 148. – P. 122-126.
14. Liu, C. Large elastocaloric effect in a Heusler-type Co50V35Ga14Ni1 polycrystalline alloy / C. Liu, D. Li, Z. Li et al. // *Applied Physics Letters*. –
15. Mañosa, L. Materials with giant mechanocaloric effects: cooling by strength / Mañosa L., Planes A. // *Advanced Materials*. – 2017. – T. 29. – №. 11. – C. 1603607.
16. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. – М.: Физматлит, 2003. – 264 с.
17. Изюмов, Ю. А. Фазовые переходы и симметрия кристаллов / Изюмов Ю. А., Сыромятников В. Н. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 248 с.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА

Публикации в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science

- A1. Morozov, E.V.** Solid State Cooling Based on Elastocaloric Effect in Latex Rubber / E.V. Morozov, D.S. Kuchin, V.V. Koledov, V.G. Shavrov // *Materials Science Forum*. – 2016. – V. 845. – P. 73-76.
- A2. Morozov, E.V.** Elastocaloric effect in rubber on exposure to a periodic tensile force / E.V. Morozov, D.S. Kuchin, V.V. Koledov, V.G. Shavrov // *Technical Physics*. – 2016. – V. 61, № 11. – P. 1679-1683. {**Морозов, Е.В.** Эластокалорический эффект в резине при периодическом воздействии растягивающей силы / Е.В. Морозов, Д.С. Кучин, В.В. Коледов, В.Г. Шавров // *Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 86, № 11. – С. 75-79.}
- A3. Fedotov, S. Y.** Studying the elastocaloric effect in a fast-quenched Ti₂NiCu ribbon with the shape memory effect / S.Yu. Fedotov, **E.V. Morozov**, V.V. Koledov, V.G. Shavrov, A.V. Shelyakov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2017. – V. 81, № 11. – P. 1374-1376. {Федотов, С.Ю. Исследование эластокалорического эффекта в быстрозакалённой ленте сплава Ti₂NiCu с эффектом памяти формы / С.Ю. Федотов, **Е.В. Морозов**, В.В. Коледов, В.Г. Шавров, А.В. Шеляков // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2017. – Т. 81, № 11, С. 1538–1541.}
- A4. Morozov, E. V.** Solid State Cooling Based on Elastocaloric Effect in Melt Spun Ribbons of the Ti₂NiCu Alloy / E.V. Morozov, S.Yu. Fedotov, M.S. Bibik, A.V.Petrov, V.V. Koledov, V.G. Shavrov // *Materials Research Proceedings*. – 2018. – V. 9. – P. 53-57.
- A5. Antonov, R. A.** Delay Effect for Pulsed Excitation of Actuator Based on Rapidly Quenched Ti₂NiCu Alloy with Thermoelastic Martensitic Transformation / R. A. Antonov, A. P. Kamantsev, V. V. Koledov, L. V. Koledov, D. S. Kuchin, P. V. Lega, **E. V. Morozov**, A. P. Orlov, A. P. Sivachenko, V. G. Shavrov, A. V. Shelyakov // *Physics of the Solid State*. – 2018. – V. 60, № 6. – P. 1190-1194. {Антонов, Р.А. Эффект запаздывания при импульсном возбуждении актюатора на основе быстрозакаленного сплава Ti₂NiCu с термоупругим мартенситным переходом. / Р.А. Антонов, А.П. Каманцев, В.В. Коледов, Л.В. Коледов, Д.С. Кучин, П.В. Лега, **Е.В. Морозов**, А.П. Орлов, А.П. Сиваченко, В.Г. Шавров, А.В. Шеляков // *Физика твердого тела*. – 2018. – Т. 60, № 6. – С. 1178-1182.}
- A6. Морозов, Е.В.** Применение эластокалорического эффекта для создания твердотельных тепловых насосов и холодильников / Е.В. Морозов, В.В. Коледов, Д.С. Семёнов, С.Ю. Федотов, В.Г. Шавров, А.В. Шеляков // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2020. – Т. 81, № 11. – С. 1542-1545.
- A7. Метлов, Л.С.** Моделирование эластокалорических эффектов в сплавах Гейслера / Л.С. Метлов, В.В. Коледов, В.Г. Шавров, **Е.В. Морозов**, Ю.В. Тихтелев, С.В.Таскаев // *Челябинский физико-математический журнал*. – 2020. – Т. 5, № 4(2). – С. 592-600.
- A8. Morozov, E.V.** Elastocaloric Effect in a Rapidly Quenched Ti₂NiCu Alloy at a Periodic Action of a Stretching Force at Frequencies to 50 Hz / E.V. Morozov, S.Yu. Fedotov, A.V. Petrov, M.S. Bybik, T.A. Kuli-zade, I.A. Znamenskaya, V.V. Koledov, V.G. Shavrov // *Physics of the Solid State*. – 2020. – V. 62, № 6. – P. 972-975. {**Морозов, Е.В.** Эластокалорический эффект в быстрозакаленном сплаве Ti₂NiCu при периодическом воздействии растягивающей силы с частотой до 50 Hz / Е.В. Морозов, С.Ю.

Федотов, А.В. Петров, М.С. Быбик, Т.А. Кули-заде, И.А. Знаменская, В.В. Коледов, В.Г. Шавров // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62, № 6. – С. 864-867.}

A9. Morozov, E.V. Thermoelastic Properties and Elastocaloric Effect in Rapidly Quenched Ribbons of Ti_2NiCu Alloy in the Amorphous and Crystalline State / E.V. Morozov, D.D. Kuznetsov, V.S. Kalashnikov, V.V. Koledov, V.G. Shavrov // Crystals. – 2021. – V. 11, № 8. – P. 949.

Публикации в журналах, вошедших в Перечень изданий, рекомендованных ВАК

A10. Морозов, Е.В. Колебания быстрозакаленных лент Ni-Ti-Cu / Е.В. Морозов // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7, № 3. – С. 175-175.

A11. Морозов, Е.В. Эластокалорический эффект в резине / Е.В. Морозов, Д.С. Кучин, В.В. Коледов, В.Г. Шавров // Нелинейный мир. – 2015. – Т. 13, № 2. – С. 28-29.

A12. Морозов, Е.В. Исследование эластокалорического эффекта в быстрозакаленной ленте сплава Ti_2NiCu для твердотельного охлаждения / Е.В. Морозов, В.В. Коледов, С.Ю. Федотов, В.Г. Шавров А.В. Шеляков. // Нелинейный мир. – 2017. – Т. 15, №. 2. – С. 55-58.

A13. Федотов, С. Ю. Эластокалорический эффект в быстрозакалённых аморфных и кристаллических лентах сплавов Ti_2NiCu / С.Ю. Федотов, **Е.В. Морозов**, В.В. Коледов, В.Г. Шавров, А.В. Шеляков // Нелинейный мир. – 2018. – Т. 16, №. 2. – С. 75-77.

A14. Федотов, С. Ю. Эластокалорический эффект в быстрозакаленных лентах сплава Ti_2NiCu при частоте циклов растяжения-сжатия до 50 Гц методом ИК-термографии / С.Ю. Федотов, **Е.В. Морозов**, В.В. Коледов, В.Г. Шавров, А.В. Шеляков, М.С. Быбик, А.В. Петров // Нелинейный мир. – 2019. – Т. 17, №. 1. – С. 67-70.

A15. Морозов, Е. В. Эластокалорический эффект в твердотельном тепловом насосе для сплава Ti_2NiCu / Е.В. Морозов, С.Ю. Федотов, М.С. Быбик, В.В. Коледов, В.Г. Шавров // Нелинейный мир. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 37-40.

Патенты

A16. Каманцев А.П., Жихарев А.М., Коледов В.В., **Морозов Е.В.**, Фон Гратовски С.В., Антонов Р.А., Шавров В.Г., Шеляков А.В. Патент на изобретение № 2539605 «Актюатор на основе функционального материала». Опубликовано: 20.01.2015. Бюл. № 2.