



**Хлопков Елисей Алексеевич**

**Обеспечение качества технологического процесса изготовления  
изделий из композитных материалов с использованием  
кольцевых силовых элементов из никелида титана**

05.02.08 –Технология машиностроения.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого».

*Научный руководитель*

**Любомудров Сергей Александрович**, доцент, кандидат технических наук, доцент, Высшая школа машиностроения, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

*Официальные оппоненты:*

**Рубаник Василий Васильевич**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доцент, доктор технических наук, заведующий лабораторией, лаборатория физики металлов, Государственное научное учреждение «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси», г. Витебск, респ. Беларусь;

**Андреев Владимир Александрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория пластической деформации металлических материалов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, г. Москва.

*Ведущая организация*

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.**

Защита диссертации состоится «17» мая 2022 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.05.02.08/09 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 3-ий учебный корпус, аудитория 109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «    »                      2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Хрусталева Ирина Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования** на сегодняшний день обусловлена эффективностью практического применения устройств, изготавливаемых на основе материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ), в машиностроении, медицине и аэрокосмической индустрии. Использование подобных изделий способствует непрерывному расширению подходов к усовершенствованию состава материалов и форм силовых элементов, а также диктует необходимость комплексного изучения закономерностей термоиндуцированных деформационных процессов. Исследования технологического процесса изготовления слоистых изделий выявили сложность деформационных процессов, которые обусловлены не только ЭПФ, но и эволюцией упругих характеристик.

Анализ существующих подходов к разработке технологических процессов на основе ЭПФ позволил выявить возрастающую потребность в технологиях изготовления устройств и их апробации в действующих конструкциях. Однако отсутствуют научно-обоснованные способы разработки данных технологий.

Необходимость разрешения данного противоречия определила **актуальность проведения исследования** кольцевых силовых пучковых элементов (КСПЭ), приводов уникальной технологической установки, работающей на ЭПФ.

### **Цель и задачи исследования**

**Целью работы** является повышение эффективности процесса обеспечения качества технологии изготовления изделий из композитных материалов на основе использования кольцевых силовых элементов из никелида титана.

Таким образом, диссертационные исследования нацелены на получение комплекса взаимодополняющих экспериментальных зависимостей о температурных режимах (абсолютных значениях температуры и скорости ее изменения), силовых факторах, конструкционных параметрах изделий и деформационно-силовых характеристиках кольцевых силовых элементов.

Для достижения цели поставлена **задача исследования**, состоящая в разработке комплекса методик обеспечения качества технологического процесса изготовления слоистых антивибрационных изделий на основе применения сплавов с ЭПФ и способа термосилового воздействия на элементы технологического оборудования КСПЭ, сочетающего деформирование в состоянии пластичности превращения при охлаждении под нагрузкой и активного деформирования.

### **Научная новизна**

1. Впервые определены зависимости деформации ЭПФ и генерируемых усилий КСПЭ из сплавов TiNi 50,45 ат. % и TiNi 50,35 ат. % после деформирования в разных температурных условиях вблизи интервала прямого мартенситного превращения. Выявлен рациональный температурный режим работы КСПЭ для получения наибольших силовых возможностей. Определено, что деформирование КСПЭ из сплава TiNi 50,45 ат. % при  $T = 271$  К производится с минимальными усилиями.

2. Получены температурные зависимости:

- проявления ЭПФ и генерации усилий в КСПЭ из сплава TiNi 50,08 ат. % от диаметра элемента пучка;

- проявления ЭПФ и генерации усилий в кольцевых силовых ленточных элементах (КСЛЭ) из сплава TiNi 49,9 ат. %. Показана эквивалентность удельных силовых характеристик ленточных и пучковых элементов.

3. Решена задача расчета эволюции температурного поля и зоны гетерофазного состояния в цилиндрах и пластинах при разных режимах охлаждения в рамках математической модели механизма остаточных напряжений сплавов с ЭПФ. Результаты расчетов позволили объяснить причины падения деформационных возможностей КСПЭ при повышении скорости охлаждения поверхности материала.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы состоит в разработке следующего способа и комплекса методик:

1. Способ термосилового воздействия на элементы технологического оборудования кольцевые силовые пучковые элементы с использованием состояния пластичности превращения и активного деформирования в мартенситном состоянии, позволяющий повысить эффективность технологического процесса.

2. Методика выбора рационального температурного режима работы технологического оборудования, действующего на основе ЭПФ.

3. Методика выбора рационального геометрического параметра элементов технологического оборудования КСПЭ, позволяющая обеспечить качество технологического процесса изготовления слоистых антивибрационных изделий.

4. Методика анализа гетерофазной зоны, позволяющая качественно прогнозировать работу технологического оборудования.

Данные способ и методики будут способствовать развитию аналитических и численных методов расчета физических процессов, сопровождающих мартенситные превращения, и моделирования работы силовых элементов.

Практическая значимость работы заключается:

1. Определены деформационно-силовые характеристики КСПЭ из сплава TiNi 50,45 ат. %, КСПЭ из сплава TiNi 50,35 ат. %, трех пар одномассовых КСПЭ из сплавов TiNi 50,08 ат. % с разными диаметрами элемента в пучке, КСЛЭ из сплава TiNi 49,9 ат. %.

2. Получены данные о температурных зависимостях функциональных свойств КСПЭ из сплава TiNi при подготовке к работе в разных температурных условиях, позволяющие инженерам выбирать рациональный режим предварительного деформирования и термоциклирования.

3. Получены данные о температурных зависимостях функциональных свойств трех пар одномассовых КСПЭ, позволяющие изготавливать рациональные конструкции рабочих элементов и механизмов.

4. Реализована в программном варианте методика расчета температурных полей и определения области гетерофазного состояния в цилиндрических объектах и пластинах из никелида титана при прямом фазовом переходе.

5. Разработана и введена в эксплуатацию усовершенствованная испытательная установка «ЛИНД-3» для изучения элементов технологического оборудования КСПЭ.

6. Разработаны рекомендации для инженеров по работе с функциональными элементами кольцевого типа на основе ЭПФ.

7. Для предприятия ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД» реализован комплекс мероприятий, в результате которых повышен объем выпускаемых изделий на 20 %.

**Объект исследования** – технологический процесс изготовления изделий из композитных материалов.

**Предмет исследования** – процесс обеспечения качества данной технологии.

#### **Методы исследования**

Экспериментальное изучение формоизменения образцов кольцевых силовых элементов из сплава TiNi в условиях силового взаимодействия с контртелом при разных режимах нагрева и охлаждения, изменении геометрических параметров конструкций. Условия нагружения регулируются специально разработанными и сконструированными динамометрами. Скорость изменения температуры варьируется путем выбора соответствующих режимов работы термокамер и холодильного оборудования.

Расчет температурных полей по сечению материала, основанный на математической модели механизма остаточных напряжений сплавов с ЭПФ.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Способ термосилового воздействия на элементы технологического оборудования КСПЭ с использованием состояния пластичности превращения и активного деформирования

в мартенситном состоянии, позволяющий повысить эффективность технологического процесса.

2. Методика выбора рационального температурного режима работы технологического оборудования, действующего на основе ЭПФ.

3. Методика выбора рационального геометрического параметра элементов технологического оборудования КСПЭ, позволяющая обеспечить качество технологического процесса изготовления слоистых антивибрационных изделий.

4. Методика анализа гетерофазной зоны, позволяющая качественно прогнозировать работу технологического оборудования.

5. Практические рекомендации по обеспечению качества технологического процесса изготовления слоистых антивибрационных изделий за счет повышения эффективности работы элементов оборудования КСПЭ.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

**Достоверность и обоснованность научных результатов работы** обеспечены использованием апробированных экспериментальных методик, использованием поверенной измерительной техники, математически строгой обработкой полученных экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов и соответствием полученных закономерностей их теоретическому обоснованию. Все результаты и выводы не противоречат современным научным представлениям, опубликованы в печатных рецензируемых изданиях и апробированы в процессе докладов на семинарах, симпозиумах, конференциях, при общении с авторитетными представителями научного сообщества в области технологии машиностроения, прочности материалов, с исследователями сплавов с ЭПФ.

Материалы диссертационного исследования представлялись на следующих научно-практических конференциях: Вторая Международная научная конференция «Сплавы с эффектом памяти формы» к 85-летию со дня рождения В.А. Лихачева (г. Санкт-Петербург, 20-23 сентября 2016 г.); IX Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов» ФППК-2016, посвященная памяти академика Г.В. Курдюмова (г. Черноголовка, 7-11 ноября 2016 г.); научная конференция с международным участием Неделя Науки СПбПУ (г. Санкт-Петербург, 14-19 ноября 2016 г.); Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (г. Витебск, Беларусь, 22-26 мая 2017 г.); VII научно-техническая конференция молодых специалистов «Корабельные системы управления и обработки информации. Проектирование и изготовление» (г. Санкт-Петербург, 5 октября 2017 г.); научная конференция с международным участием Неделя науки СПбПУ (г. Санкт-Петербург, 13-19 ноября 2017 г.); 60 Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности» (г. Витебск, Беларусь, 14–18 мая 2018 г.);

7 Международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение: наука и образование MMESE-2018» (г. Санкт-Петербург, 29–30 мая 2018 г.); научно-практическая конференция с международным участием XLVII «Недели науки СПбПУ» (г. Санкт-Петербург, 19-24 ноября 2018 г.); Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (г. Брест, Беларусь, 27-31 мая 2019 г.).

Разработанные способ термосилового воздействия на рабочие элементы технологического устройства кольцевые силовые пучковые элементы и методика выбора рациональных температурных режимов были применены при производстве антивибрационных деталей на предприятии ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД».

Результаты исследования температурных режимов работы КСЛЭ, представленные в диссертационной работе, были получены в ходе работ по проекту РФФИ № 19-38-90285 «Аспиранты», 2019-2022 гг.

**Работа соответствует паспорту специальности – 05.02.08 «Технология машиностроения»** пунктам: 5 «Методы проектирования и оптимизации технологических процессов».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы. Основные материалы изложены на 116 страницах машинописного текста, в том числе содержат 5 таблиц, 43 рисунка, 134 библиографических наименования.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** проведен анализ технологического процесса изготовления слоистых антивибрационных деталей для машиностроения. Определены допустимые уровни генерируемых усилий элементами производственного оборудования КСПЭ для обеспечения качества технологического процесса изготовления деталей антивибрационного назначения. С целью поиска рациональных конструктивных решений проанализированы силовые элементы и приводы из материалов с ЭПФ, области их применения и функциональное назначение. Данные сплавы могут использоваться в узлах механизмов машиностроительной, авиастроительной техники, космическом строении и робототехнике. Большинство же разработанных конструкций в настоящее время являются лишь результатом моделирования и представлены, в лучшем случае, в виде опытных образцов. Применение сплавов с ЭПФ

нашло реальное воплощение в имплантах и механизмах однократного срабатывания в различных областях медицины: травматологии, ортопедии, стоматологии, хирургии и других. Данное направление развито коллективом Гюнтера В.Э в отечественных институтах, а также и зарубежными командами исследователей. Идет поиск новых материалов, технологий их изготовления для расширения области применения. При этом конструкции многократного действия нашли свое применение только в миниатюрных приспособлениях. В изделиях для безопасности жизнедеятельности применяются конструкции однократного и многократного действия в различного рода датчиках и системах контроля, однако специфика их назначения не предполагает большого и частого количества рабочих циклов. Подобные механизмы могут работать в любых температурных условиях, это реализуется подбором сплава с соответствующим интервалом фазовых переходов. Эффективными могут быть и решения для объектов строительства, таких как устройства армирования и ремонта бетонных конструкций (за счет генерации высоких сил металлами данного класса) и демпфирующих систем (за счет уникальных характеристик внутреннего трения в интервале температур мартенситных превращений). Однако существует необходимость реального воплощения предложенных моделей и их апробация.

Актуальными для дальнейшего исследования являются КСПЭ, приводы уникальной технологической установки, работающей на ЭПФ. Предыдущие исследования КСПЭ не позволяют в полной степени предположить их деформационно-силовые характеристики при работе в разных температурных условиях. Также отсутствуют сведения о влиянии диаметра проволоки на функциональные свойства равномассовых КСПЭ, изготовленных из сплава никелида титана одного химического состава.

Обзор литературы по исследованиям функциональных свойств при неполных фазовых переходах материала, развиваемым Паскалем Ю.И., Беляевым С.П., Остропико Е.С., показал возможность изменения деформационных характеристик при остановке нагрева или охлаждения конструкции внутри интервала мартенситного превращения.

Анализ конструкционных параметров изделий проводили Шипша В.Г., Лихачев В.А., Разов А.И., Хусайнов М.А., Николаев В.И., Андронов И.Н., Абдрахманов С.А., Рубаник В.В., Мовчан А.А. Волков А.Е. Однако существующие работы не показывают возможности реализации технологических установок, а математические модели не внедрены в инженерный расчет силовых приводов.

Вопрос влияния скорости изменения температуры на механические свойства материалов с памятью формы рассматривали Sheil E., Постников В.С., Фавстов Ю.К., Guenin G., Шаршаков И.М., Деянг В., Лихачев В.А., Кузьмин С.Л. При этом не рассматривалось влияние скорости охлаждения и резкого изменения температуры на



поверхности материала силовых элементов на деформационно-силовые характеристики, наблюдаемые под нагрузкой в состоянии пластичности превращения.

Анализ предшествующих научных работ позволил выявить противоречие в теоретических подходах в исследовании и обосновании требований к качеству технологического процесса изготовления изделий из композитных материалов, не учитывающих фактора многократного применения в качестве приводов технологического оборудования изделий, изготовленных на основе сплавов с ЭПФ. Необходимость разрешения данного противоречия позволила осуществить постановку **задачи исследования**, состоящей в разработке комплекса методик обеспечения качества технологического процесса изготовления слоистых антивибрационных изделий на основе применения сплавов с ЭПФ и способа термосилового воздействия на элементы технологического оборудования КСПЭ, сочетающего деформирование в состоянии пластичности превращения и активного деформирования.

**Во втором разделе** представлены результаты исследования деформационных и силовых характеристик КСПЭ при нагреве после деформирования их при разных температурах как внутри, так и вблизи интервала прямого мартенситного превращения.

Изучение КСПЭ проводилось на динамометре «ЛИНД» (рисунок 1), моделирующем работу технологического приспособления. На рисунке 2 схематически показано изменение формы силовых элементов в процессе экспериментального исследования.

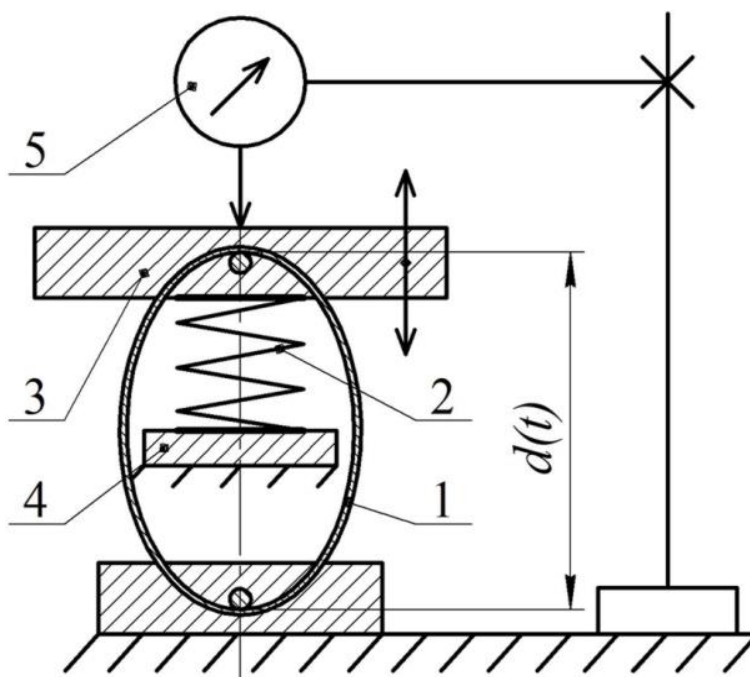


Рисунок 1 – Схема установки КСПЭ 1 в динамометре: 2 – контроле, 3 – подвижная плита, 4 – регулирующая плита, 5 – измерительная система,  $d(t)$  – характеристический размер КСПЭ

На рисунке 3 представлено изменение параметров деформационных процессов ЭПФ при теплосменах с разными минимальными температурами подготовки КСПЭ к работе. Показано существенное отличие в проявлениях ЭПФ в одинаковых условиях начального силового взаимодействия с контртелом  $F_0$ . Кривая 1 на рисунке 3 указывает наличие максимума в деформационном процессе ЭПФ при деформировании КСПЭ усилием  $F_0 = 450$  Н при 299 К. В случае, если начальный силовой контакт КСПЭ с контртелом становится выше значения 450 Н, то в результате нагрева максимальное усилие  $F_{\max}$  превосходит величину  $\sim 950$  Н, что ограничивает нарастание деформаций ЭПФ.

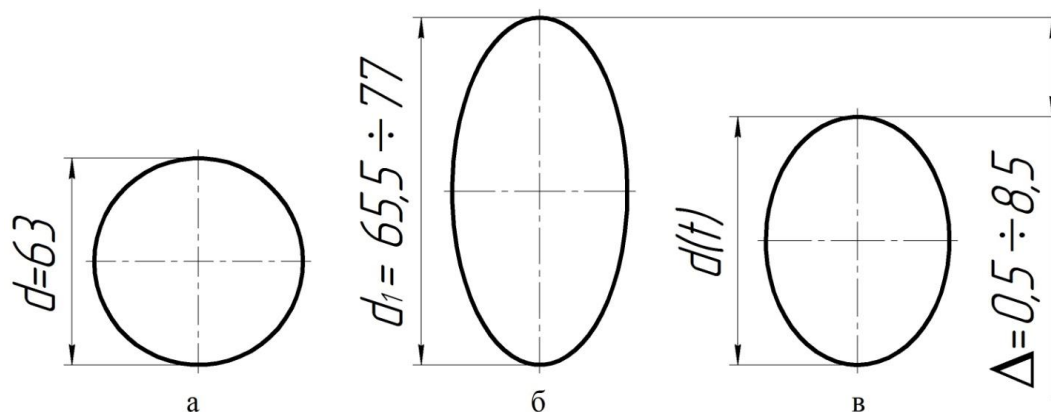


Рисунок 2 – Формы КСПЭ на стадиях эксперимента:

а – круговая (начальная), б – эллиптическая (после начального деформирования), в – эллиптическая (в процессе нагрева)

Кривая 2 показывает, что предварительное деформирование колец происходит при одинаковой силе сопротивления  $F_0 \sim 200$  Н (рисунок 3, кривая 2). Параметр формоизменения ЭПФ  $\Delta_{\max}$  в результате термоциклирования вырос с 2,3 мм до 4,8 мм, то есть более чем в 2 раза. Максимальная сила взаимодействия с контртелом при этом повысилась с 440 Н до 690 Н. Подобное поведение КСПЭ при термоциклировании является «тренировкой», повышающей их деформационно-силовые параметры. Сило-силовой коэффициент  $k_{FF} = F_{\max} / F_0$  отражает отношение максимальной силы взаимодействия с контртелом  $F_{\max}$  ( $F_{\max} = F_0 + \Delta \cdot K$ , где  $K$  – жесткость контртела) к начальной  $F_0$  и достигает величины 3,3. Повышение удельной силоемкости КСПЭ может происходить и при осуществлении деформирования при 271 К с усилием  $F_0 \sim 150$  Н (рисунок 3, кривая 3). Параметр формовосстановления ЭПФ  $\Delta$  на этом этапе увеличивается с 4,3 мм до 7,5 мм, а коэффициент  $k_{FF}$  достигает значения 6. Максимальная сила взаимодействия КСПЭ с контртелом варьировалась в интервале от 570 Н до 900 Н. Рост коэффициента  $k_{FF}$  в КСПЭ из

сплава TiNi 50,45 ат. % свидетельствует о повышении силовых возможностей при подготовке КСПЭ при минимальной температуре цикла  $T = 271$  К.

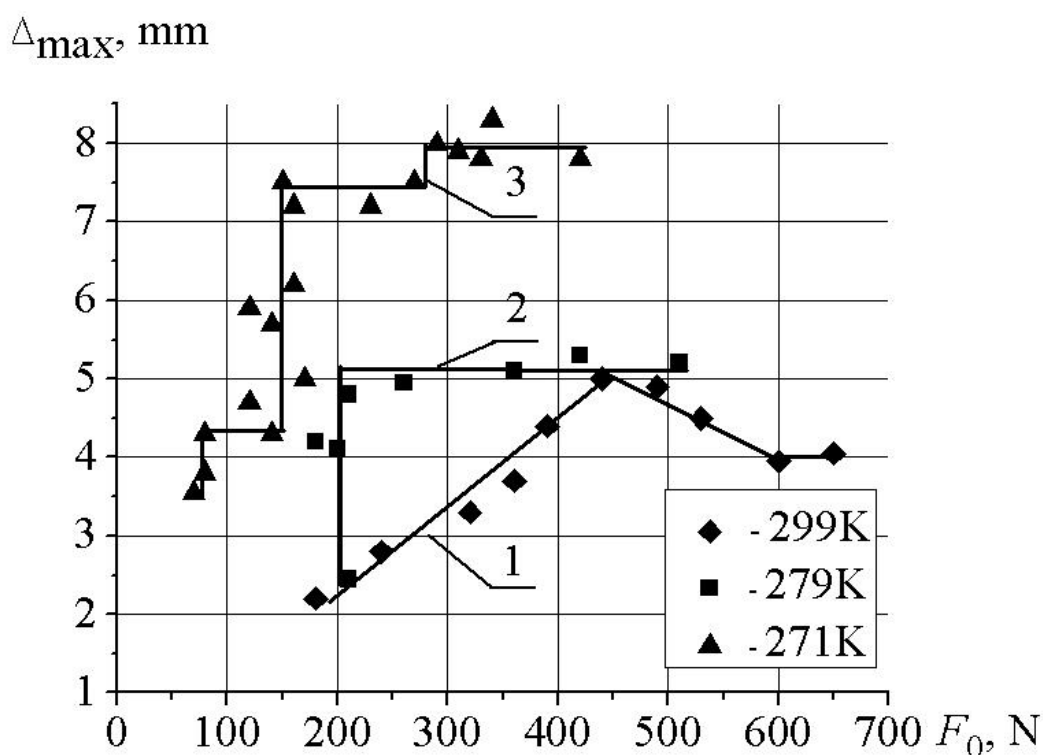


Рисунок 3 – Зависимость максимального значения параметра ЭПФ  $\Delta_{\max}$  КСПЭ из сплава TiNi 50,45 ат. % от начального усилия  $F_0$  при минимальной температуре термоциклирования  $T$ , К: 1 – 299, 2 – 279, 3 – 271

При снижении температуры подготовки КСПЭ к работе в технологической установке до значений близких к окончанию интервала прямого мартенситного превращения 271 К заданный показатель генерируемых усилий в 1000 Н достигается при меньших начальных усилиях взаимодействия с контртелом. Рост начальной нагрузки на силовые элементы позволяет повысить генерируемую силу в результате нагрева.

В первом подразделе **третьего раздела** исследовали зависимости деформационно-силовых свойств жестких конструкций кольцевых силовых ленточных элементов при нагреве. Удельные силовые возможности КСЛЭ на единицу массы позволили определить их соответствие аналогичному параметру КСПЭ. Для этого посчитан сило-массовый коэффициент  $k_{Fm} = F_{\max} / m$  (где  $F_{\max}$  – максимальное значение генерируемой силы 920 Н,  $m$  – масса силового элемента). Подсчет показал, что величина  $k_{Fm}$  равняется 20 Н/г, такой же показатель характерен и для кольцевых силовых пучковых элементов. Однако максимальная сила взаимодействия с контртелом не соответствует показателю в 1000 Н, который позволяет

обеспечить качество композитных изделий. Данные же о равнозначности коэффициентов ленточных и пучковых силовых элементов дают основание предположить, что выбор геометрии сечения ленты сделает возможным достижение необходимых величин усилий.

Во втором подразделе третьего раздела определяли зависимости функциональных свойств равномассовых КСПЭ от диаметра проволоки никелида титана, используемой при их изготовлении.

Предварительная деформация силовых элементов из проволоки диаметром 1 мм на первом этапе происходит при постоянной силе сопротивления  $F_0 \sim 120$  Н, а на втором – при  $F_0 \sim 290$  Н (рисунок 4, кривая 1). При такой подготовке к работе нагрев позволяет получить усилие в 620 Н. Дальнейшее деформирование осуществлялось с повышением силового контакта с упругой пружиной. При этом формоизменение в результате нагрева находится в интервале от 3 мм до 3,7 мм. Необходимый уровень генерируемых усилий для обеспечения качества технологического процесса производства композитных изделий достигается в 13-м цикле при  $F_0 \sim 630$  Н.

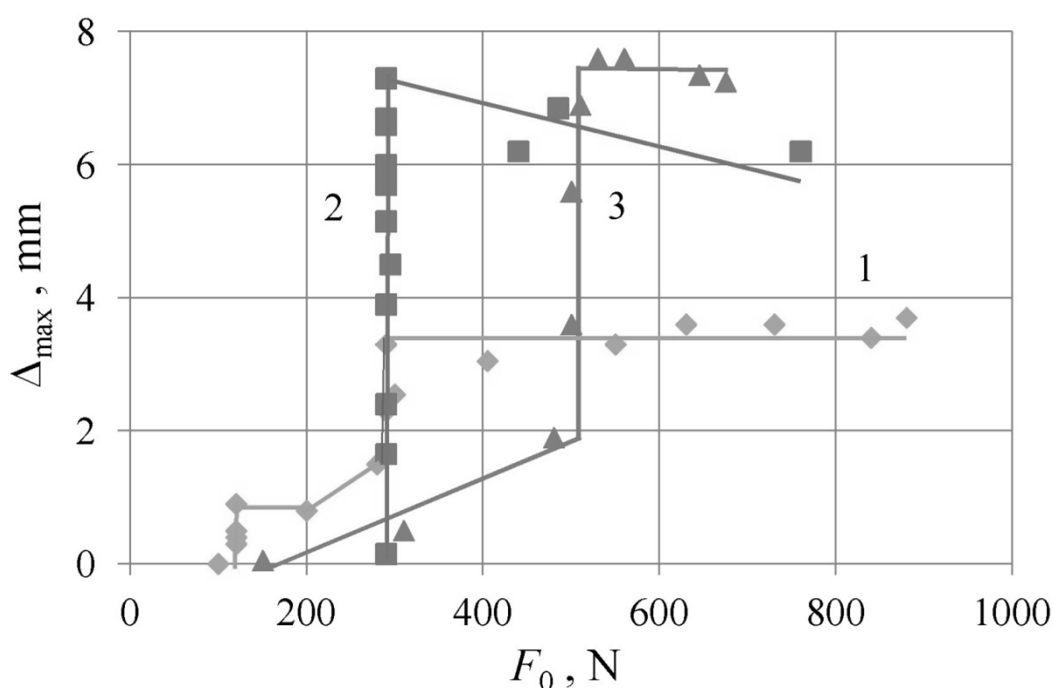


Рисунок 4 – Зависимость максимального значения параметра  $\Delta_{max}$  от начального усилия  $F_0$  КСПЭ из проволок диаметром, мм: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 2,5

Деформирование КСПЭ из 6-и витков при минимальной температуре осуществлялось при постоянной силе взаимодействия в 290 Н (рисунок 4, кривая 2). Это позволило лишь в 12-м цикле достичь требуемых значений генерируемых усилий. Дальнейшее формоизменение в мартенситном состоянии происходило с повышением значения  $F_0$ , что

привело к снижению смещений ЭПФ в результате нагрева. В 15-м цикле с начальной силой взаимодействия в 760 Н показатели генерируемых усилий в результате перевода КСПЭ в аустенитное состояние достигли 1380 Н.

Изменение характеристического размера четырехвитковых КСПЭ происходило при постоянной силе сопротивления  $F_0$  (рисунок 4, кривая 3). Начальное взаимодействие с контртелом равнялось  $\sim 500$  Н. Требуемое усилие в 1000 Н в результате нагрева, обеспечивающее качество композитных изделий, получено в 5-м цикле. Рост  $F_0$  сохраняет показатели перемещений ЭПФ  $\Delta_{\max}$ . А силовые характеристики КСПЭ увеличиваются до 1400 Н.

Для обеспечения минимальных гарантированных значений генерируемых усилий рационально использование КСПЭ шестивитковой конструкции. Это обусловлено необходимостью приложения самой низкой силы в 290 Н на их деформирование. Для получения самых высоких генерируемых сил в 1400 Н нужно изготавливать КСПЭ из проволоки 2,5 мм.

**В четвертом разделе** проанализирована область гетерофазного состояния материала с ЭПФ при охлаждении поверхности с разной скоростью для определения ее влияния на деформационно-силовые свойства КСПЭ и КСЛЭ.

Для решения задачи по расчету температурного поля в цилиндрах и пластинах выбрано уравнение теплопроводности, входящее в математическую модель механизма остаточных напряжений материалов с ЭПФ:

$$\rho \cdot c(U) \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = k \cdot \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$\rho \cdot c(U) \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $c(U)$  – теплоемкость,  $U$  – температура,  $t$  – время,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $r$  – радиальная координата,  $z$  – вертикальная координата. В однофазном состоянии  $c(U) = c_0$  – постоянная величина. В численном опыте величины теплоемкости в мартенситном и аустенитном состояниях принимались равными. Зависимость теплоемкости от температуры аппроксимировали квадратичной функцией:

$$c(U) = c_1 \cdot \frac{(U - M_s) \cdot (M_f - U)}{(M_f - M_s)^2} + c_0, \quad (3)$$

где  $M_s$  – температура начала прямого мартенситного превращения,  $M_f$  – температура окончания прямого мартенситного превращения. Коэффициент  $c_1$  определяли из уравнения:

$$Q_{tr} = \int_{M_s}^{M_f} c_1 \cdot \frac{(U - M_s) \cdot (M_f - U)}{(M_f - M_s)^2} dU, \quad (4)$$

где  $Q_{tr}$  – скрытая теплота превращения.

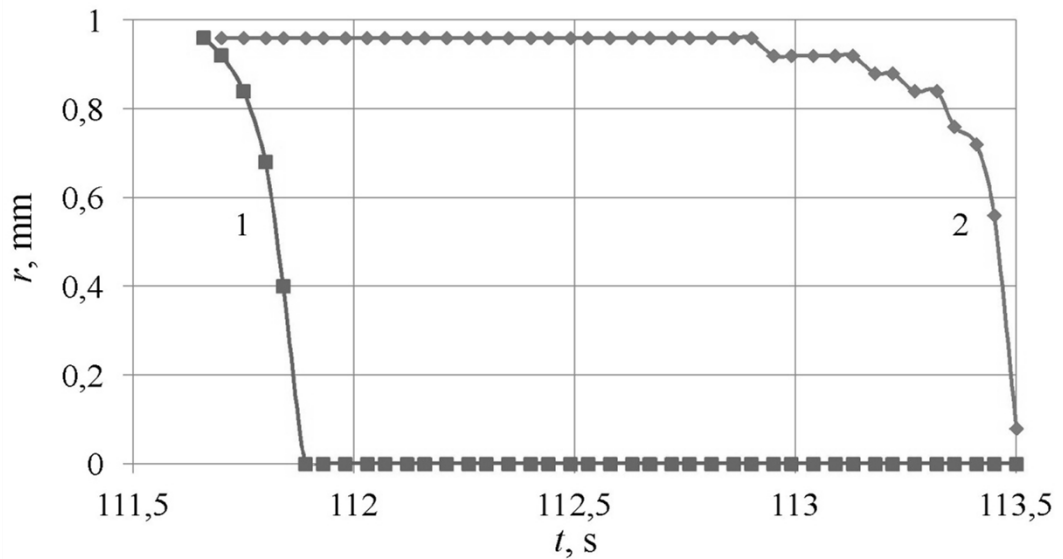
Распределение двухфазного состояния по сечению цилиндра и пластины при охлаждении от 403 К с постоянной скоростью распространяется на весь объем материала в процессе прямого мартенситного превращения. При мгновенном охлаждении поверхности пластины до температуры  $M_s$  расчеты показали аналогичное поведение распространения двухфазного состояния. Однако время процесса сократилось на 800 с. Охлаждение поверхности пластины до температур внутри интервала  $[M_s, M_f]$  сохранило характер эволюции гетерофазного состояния, но сократилось время его нахождения в объеме материала. Исходя из этого, дальнейшие расчеты проводились при мгновенном охлаждении поверхности до температур  $M_f$  и  $(M_f - 5)$  К.

Эволюция области двухфазного состояния при охлаждении поверхности цилиндра до  $M_f$  движется более плавно, и гетерофазная зона распространяется на весь объем конструкции (рисунок 5, а). При этом одновременно гетерофазная структура в полном объеме материала существует в цилиндре в два раза продолжительнее, чем в пластине. Трансформация кристаллической решетки длится в 1,5-2 раза дольше, чем при понижении температуры до  $M_f - 5$  К (рисунок 5, б). Этот фактор может увеличивать деформационные характеристики кольцевых силовых элементов при реализации пластичности превращения, позволяющей накапливать формоизменение материалам с ЭПФ в сторону приложения нагрузки при прямом мартенситном переходе.

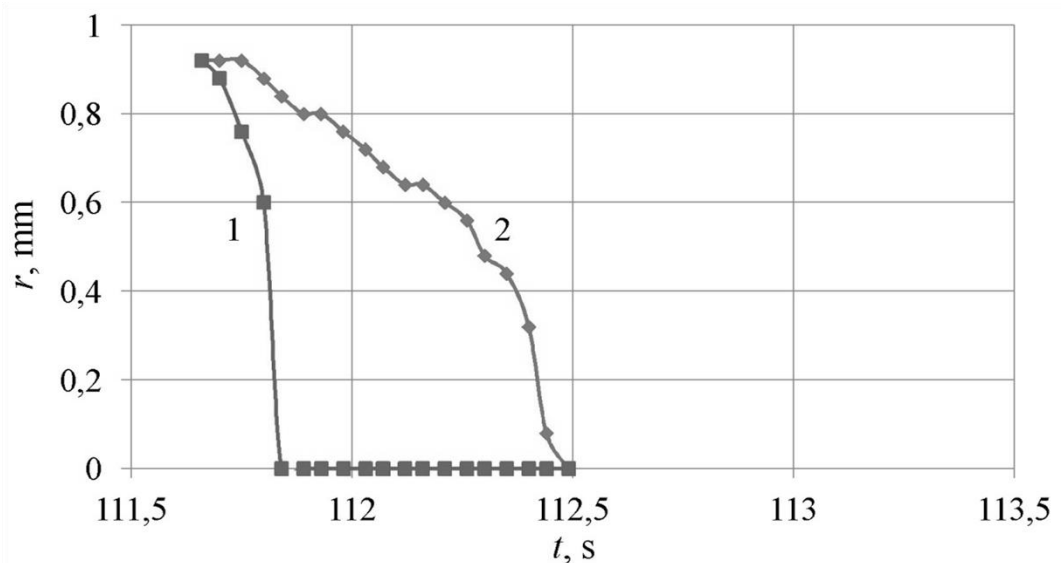
Таким образом, при охлаждении поверхности цилиндра до температуры на 5 К ниже  $M_f$  часть материала оказывается в однофазном мартенситном состоянии. В данном случае изменение формы силовых элементов соответствует деформированию, подчиняющемуся закону скоростной ползучести. Поэтому деформационные процессы могут быть неполными.

Изменение формы кольцевого силового элемента, обусловленное пластичностью превращения, в зависимости от скорости охлаждения изучали с помощью пружинного динамометра (рисунок 6). При остывании образца с термостатом (рисунок 7, кривая 1) формоизменение достигло 7,3 мм. В результате охлаждения динамометра с силовым элементом при комнатной температуре изменение диаметра силового элемента составило 6,5 мм (рисунок 7, кривая 2). Формоизменение кольца в направлении приложения нагрузки после охлаждения в холодильной камере при температуре 279 К равнялось 5 мм (рисунок 7, кривая 3). При снижении температуры холодильной камеры на 8 градусов удлинение

кольцевого силового элемента составило 3,5 мм. Исследования КСЛЭ дали аналогичные результаты.



а



б

Рисунок 5 – Эволюция зоны прямого мартенситного превращения в цилиндре  $r_m = 1$  мм с течением времени при мгновенном изменении температуры поверхности от 403 К до  $M_f$  (а), до  $M_f - 5$  К (б): 1 – граница температур начала прямого превращения, 2 – граница температур окончания прямого превращения

Повышение скорости изменения температуры понижает деформационные характеристики кольцевых силовых пучковых элементов. Использование уравнения теплопроводности для расчета температурных полей позволит определить рациональные

границы изменения температуры на поверхности материала силовых элементов для получения необходимых деформационно-силовых характеристик.

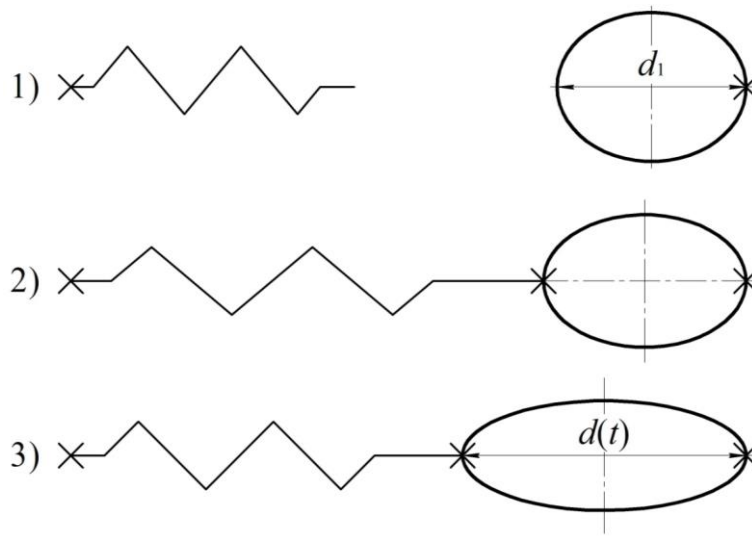


Рисунок 6 – Схема нагружения силовых элементов:

1 – исходное состояние КСПЭ с размером  $d_1$ ,

2 – после нагружения в аустенитном состоянии,

3 – образец после деформации пластичности превращения с размером  $d(t)$

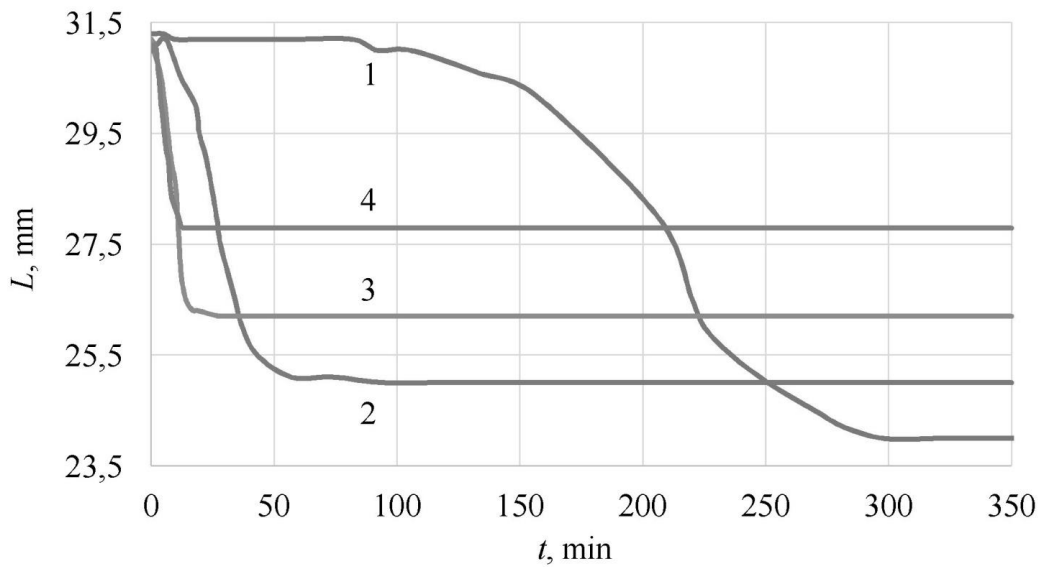


Рисунок 7 – Временная зависимость формоизменения овала при режимах охлаждения: 1 – вместе с термостатом, 2 – при 299 К, 3 – при 279 К, 4 – при 271 К



**В пятом разделе** приведена апробация результатов исследования, сформулированы рекомендации для инженеров по термомеханической подготовке КСПЭ из никелида титана к применению функциональных свойств в технологическом оборудовании.

В контрольном эксперименте подготовку КСПЭ к работе проводили с использованием разработанного способа термосилового воздействия при минимальной температуре термоциклирования в 271 К. Поскольку в экспериментах удалось осуществить деформирование КСПЭ на  $\sim 14$  мм, то в технологическом опыте повышение расстояния между захватами установки «ШеР» проводили за счет увеличения пакета заготовок на 20 %. Технологическую установку с заготовками помещали в камеру сушильного шкафа с температурой 403 К на 120 мин. После выдержки в горячем состоянии КСПЭ полностью вернули форму окружности. При визуальном контроле качества каждого изделия на соответствие образцу-эталону в слое несплошностей не обнаружено.

Таким образом, внедрение способа термосилового воздействия на элементы производственного оборудования КСПЭ в технологический процесс изготовления слоистых антивибрационных деталей и методики выбора рационального температурного режима работы позволило повысить объем загрузки печи на 20 %.

По результатам исследований были разработаны рекомендации для инженеров по выбору рациональных температурных и силовых режимов работы, диаметру проволоки никелида титана в конструкции КСПЭ, выбору уравнения теплопроводности для оценки области гетерофазного состояния в условиях изменения скорости охлаждения при теплосменах для обеспечения необходимых генерируемых усилий при изготовлении композитных материалов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе были получены следующие результаты:

1. Впервые исследованы деформационно-силовые характеристики элементов технологического оборудования КСПЭ из сплава TiNi 50,45 ат. %, КСПЭ из сплава TiNi 50,35 ат. %, трех пар одномассовых КСПЭ из сплавов TiNi 50,08 ат. % с разными диаметрами элемента в пучке, КСПЭ из сплава TiNi 49,9 ат. %.

2. На основании исследования разработан способ термосилового воздействия, сочетающий деформирование в состоянии пластичности превращения и активное формоизменение элементов технологического оборудования.

3. Разработана методика выбора рациональных температурных режимов работы технологического оборудования, позволяющая получать заданные показатели генерируемых усилий, обеспечивающих качество технологических процессов изготовления слоистых антивибрационных деталей.

4. Определено, что удельная силоемкость КСЛЭ (20 Н/г) соответствует аналогичным значениям КСПЭ. Разработка рациональной геометрии КСЛЭ и технологии их деформирования позволит использовать их в технологическом оборудовании при изготовлении слоистых антивибрационных материалов.

5. Доказано, что деформационно-силовые характеристики трех пар одномассовых элементов технологического оборудования КСПЭ, изготовленных из разного сортамента проволоки, соответствуют условиям обеспечения качества технологического процесса изготовления слоистых деталей антивибрационного назначения. На основании полученных зависимостей рекомендовано изготавливать 4-витковые КСПЭ из проволоки 2,5 мм, что позволяет увеличить эффективность технологического процесса изготовления слоистых материалов.

6. Определен характер зависимости эволюции области гетерофазного состояния в процессе протекания прямого мартенситного превращения при разных скоростях изменения температуры на основании решенной задачи по расчету температурных полей с использованием уравнения теплопроводности математической модели механизма остаточных напряжений сплавов с ЭПФ.

7. Определены границы рациональных режимов подготовки КСПЭ и КСЛЭ к работе в технологическом оборудовании по результатам моделирования температурных полей. Показано, что при охлаждении поверхности до температуры  $M_f$  гетерофазное состояние материала, при котором силовые элементы накапливают деформацию пластичности превращения, заполняет весь объем в сечении конструкции.

8. Доказано, что при охлаждении повышение скорости изменения температуры в процессе прямого мартенситного превращения понижает деформационные возможности исследуемых образцов. Это подтверждено результатами расчетов.

9. Реализация предложенных рекомендаций по применению способа термосилового воздействия на КСПЭ позволяет получить наибольшие деформационные и силовые характеристики. В технологическом оборудовании деформация и генерируемые усилия КСПЭ повышены за счет увеличения объема загрузки на 20 %.

10. Разработаны рекомендации для инженеров, конструкторов и технологов по выбору рациональных режимов работы и предварительной подготовки элементов технологического оборудования КСПЭ и КСЛЭ.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Публикации в рецензируемых журналах и изданиях в международных базах научного цитирования «Скопус» (Scopus) и «Сеть науки» (Web of Science):**

1. Khlopkov, E.A. Design and technological capabilities of the TiNi alloy ring-shaped bundle force elements / E.A. Khlopkov, T.A. Makarova // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. - 2019. - Vol. 378. - P. 012016.

2. Khlopkov, E. Specific features of the behavior of TiNi force elements in thermocycling / E. Khlopkov, G. Volkov, Y. Vyunenکو // Materials Today: Proceedings. The Second Conference «Shape Memory Alloys», SMA 2016, (September 20-23, 2016), Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia. - 2017. - V. 4. - I. 3. - P. B. - P. 4879-4883.

3. Khlopkov, E.A. Influence of cooling rate on the deformation processes associated with direct martensitic transformation in TiNi alloy / E.A. Khlopkov, Y.N. Vyunenکو // Materials Research Proceedings. - 2018. - V. 9. - P. 28-31.

4. Khlopkov, E.A. The influence of the temperature conversion rate on the deformation processes of the shape memory effect and transformation plasticity / E.A. Khlopkov, P.N. Zhurbenko, A.A. Tikhomirov, G.A. Volkov, G.Z. Zatulsky, Yu.N. Vyunenکو // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2019. - V. 656. - P. 012024.

**Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК РФ:**

5. Вьюненко, Ю.Н. Температурный фактор в управлении деформационно-силовыми свойствами кольцевых силовых пучковых элементов из сплава TiNi / Ю.Н. Вьюненко, Г.А. Волков, Е.А. Хлопков // Журнал технической физики. - 2018. - Т. 88. - № 8. - С. 1201-1204.

6. Хлопков, Е.А. Влияние механической нагрузки на температурные условия работы кольцевых силовых пучковых элементов / Е.А. Хлопков, А.А. Дмитриевский, С.П. Помыткин, С.А. Любомудров, Т.А. Макарова, Г.А. Волков, А.С. Турзаков, Ю.Н. Вьюненко // СТИН. - 2020. - № 9. - С. 19-23.

7. Хлопков, Е.А. Деформационные свойства кольцевых силовых пучковых элементов из никелида титана / Е.А. Хлопков, С.П. Помыткин, С.А. Любомудров, Т.А. Макарова, М.В. Янченко // Металлообработка. - 2021. - № 1. - С. 26-32.

**Публикации в других изданиях:**

8. Вьюненко, Ю.Н. Механические свойства «металлических мышц» из материалов с эффектом памяти формы / Ю.Н. Вьюненко, Е.А. Хлопков, Г.А. Волков // Перспективные

материалы и технологии: монография. В 2-х т. / В.А. Андреев [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. - Витебск: УО «ВГТУ», 2017. - Т.1. - С. 412-429.

9. Хлопков, Е.А. Способы управления деформационно-силовыми характеристиками функциональных элементов из никелида титана / Е.А. Хлопков, Т.А. Макарова, Ю.Н. Вьюненко // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х т. Т.1. / Е.В. Автокротова [и др.]; под ред. чл.-корр. В.В. Рубаника. - Витебск: УО «ВГТУ», 2019. - С. 225-239.

10. Вьюненко, Ю.Н. Управление деформационно-силовыми свойствами «металлических мышц» из сплава TiNi / Ю.Н. Вьюненко, А.С. Турзаков, Е.А. Хлопков, Г.А. Волков // Физика и техника высоких давлений. - 2017. - Т.27. - №4. - С. 65-72.

11. Волков, Г.А. О влиянии скорости охлаждения на формоизменение кольцевых силовых элементов из никелида титана во время прямого мартенситного превращения / Г.А. Волков, Ю.Н. Вьюненко, Е.А. Хлопков // Физика и техника высоких давлений. - 2019. - Т. 29. - № 1. - С. 78-83.

12. Вьюненко, Ю.Н. Деформационно-силовые свойства равномассовых кольцевых силовых пучковых элементов / Ю.Н. Вьюненко, Е.А. Хлопков, А.С. Турзаков // Физика и техника высоких давлений. - 2020. - Т. 30. - № 4. - С. 65-69.

13. Хлопков, Е.А. Совершенствование динамометра для исследования деформационно-силовых характеристик «металлических мышц», действующих на эффекте памяти формы / Е.А. Хлопков, Т.А. Макарова, М.В. Янченко, А.С. Турзаков, С.В. Осипенко // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 7-й Международной научно-практической конференции. / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - С. 526-535.

14. Хлопков, Е.А. О влиянии скорости изменения температуры на деформационные процессы, связанные с фазовыми превращениями в сплавах с ЭПФ / Е.А. Хлопков, Ю.Н. Вьюненко, П.Н. Журбенко, Г.З. Затульский // Актуальные проблемы прочности: материалы конференции. - Витебск: УО «ВГТУ», 2018. - С.210-212.

15. Вьюненко, Ю.Н. Деформационно-силовые свойства кольцевых силовых ленточных элементов из сплава TiNi / Ю.Н. Вьюненко, А.С. Турзаков, Е.А. Хлопков, Г.А. Волков // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума (22-26 мая 2017 года, Витебск, Беларусь). В 2-х ч. Ч.1. / под ред. В.В. Рубаника - Витебск: УО «ВГТУ», 2017. - С. 36-38.

16. Хлопков, Е.А. Исследование влияния химического состава материала силовых элементов из никелида титана на их деформационно-силовые свойства / Е.А. Хлопков,

Т.А. Макарова, Г.А. Волков, Ю.Н. Вьюненко // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. - С. 275-278.

17. Хлопков, Е.А. Влияние температурных режимов и химического состава материалов с эффектом памяти на их деформационно-силовые свойства / Е.А. Хлопков, Т.А. Макарова, Г.А. Волков, Ю.Н. Вьюненко // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. - С. 81-86.

18. Кияев, И.С. Влияние диаметра сечения проволоки из сплава TiNi на деформационно-силовые свойства кольцевых силовых пучковых элементов / И.С. Кияев, Т.А. Макарова, Е.А. Хлопков, А.С. Турзаков, Ю.Н. Вьюненко // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с междунар. участием, 18-23 ноября 2019 г. Институт машиностроения, материалов и транспорта. В 2 ч. Ч. 2. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. - С. 286-289.

19. Кияев, И.С. Исследование влияния диаметра проволоки и количества жил в сечении кольцевых силовых пучковых элементов из никелида титана на деформационно-силовые свойства / И.С. Кияев, Т.А. Макарова, Е.А. Хлопков, А.С. Турзаков, Ю.Н. Вьюненко // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с междунар. участием, 18-23 ноября 2019 г. Лучшие доклады. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. - С. 133-137.

20. Хлопков, Е.А. Эволюция температурных полей вблизи температур прямого фазового перехода в цилиндрах из сплава TiNi / Е.А. Хлопков, Т.А. Макарова // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 2. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. - С. 292-295.

21. Хлопков, Е.А. Эволюция температурных полей вблизи интервала прямого мартенситного превращения в цилиндрах и пластинах из сплавов с эффектом памяти формы / Е.А. Хлопков, Т.А. Макарова // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Лучшие доклады. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. - С. 102-106.

22. Вьюненко, Ю.Н. Механизм остаточных напряжений ЭПФ и деформационные явления в никелиде титана / Ю.Н. Вьюненко, А.А. Носковец, Е.А. Хлопков, А.Ю. Киселев, Г.А. Волков // IX Поляховские чтения: Материалы международной научной конференции по механике, 9 - 12 марта 2021г., Санкт-Петербург, Россия. - СПб.: Издательство ВВМ, 2021. - С. 307-309.

23. Хлопков, Е.А. Особенности поведения силовых элементов из никелида титана при термоциклировании / Е.А. Хлопков, Г.А. Волков, Ю.Н. Вьюненко // Сплавы с эффектом

памяти формы. Вторая международная научная конференция. К 85-летию со дня рождения В.А. Лихачева. Санкт-Петербург. 20-23 сентября 2016 г. Тезисы докладов. - СПб.: Изд-во ВВМ, 2016. - С. 59.

24. Хлопков, Е.А., Влияние температуры деформирования кольцевых силовых пучковых элементов на деформационно-силовые свойства / Е.А. Хлопков, Г.А. Волков, Ю.Н. Вьюненко // Фазовые превращения и прочность кристаллов: сб. тезисов IX Международной конференции (7-11 ноября 2016, Черноголовка). - Черноголовка, 2016. - С. 193.

25. Волков, Г.А. «Дефект» модуля упругости и деформационно-силовые свойства «металлических мышц» из сплава TiNi / Г.А. Волков, Е.А. Хлопков, И.В. Смирнов, Ю.Н. Вьюненко // Актуальные проблемы прочности: сборник тезисов LVIII международной конференции, 16-19 мая, 2017 г. - Пермь, 2017. - С. 70.

26. Хлопков, Е.А. Исследование деформационно-силовых свойств кольцевых силовых элементов из никелида титана / Е.А. Хлопков // Двадцать вторая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов: Сборник тезисов. - СПб.: Изд-во СПбГУПТД, 2017. - С. 159.