

На правах рукописи



Бурнаев Александр Владимирович

**Влияние химического состава и структуры никелида титана на
характеристики работоспособности термомеханических
актуаторов**

Специальность

05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва 2018 г.

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология обработки материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Коллеров Михаил Юрьевич

Официальные оппоненты: **Прокошкин Сергей Дмитриевич**,
доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры
обработки металлов давлением НИТУ
«МИСиС»

Александров Андрей Валентинович,
кандидат технических наук, ЗАО
«Межгосударственная ассоциация «Титан»,
генеральный директор

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»

Защита диссертации состоится 13 декабря 2018 г в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 121552 г. Москва, ул. Оршанская, д. 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой С.В. и по электронной почте skvorcovasv@mat.i.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/upload/iblock/3fa/diss_Burnaev.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Скворцова С.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Сплавы на основе никелида титана, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ) и сверхупругостью (СУ), являются перспективным материалом для разработки и производства функциональных изделий для различных областей техники, в том числе медицинской. Одним из видов таких изделий являются термомеханические актуаторы – исполнительные механизмы, приводимые в действие при изменении температуры.

Как правило, актуаторы создаются на базе элементов из функциональных материалов (пьезокерамик, биметаллов и др.), способных преобразовывать электрическую, тепловую, магнитную энергии в механическую. Никелид титана уступает этим материалам в частоте срабатывания актуатора, но значительно превосходит в удельной работе.

Широкое использование актуаторов из никелида титана сдерживается высокой стоимостью материала и сложностью обеспечения заданных характеристик работоспособности в процессе серийного производства изделий. Это обусловлено высокой чувствительностью характеристик ЭПФ и СУ к точному химическому составу и структуре сплавов. Несмотря на многочисленные исследования, проведённые под руководством Хачина В.Н., Фаткуллиной Л.П., Ильина А.А., Чернова Д.Б., Прокошкина С.Д. и др., вопросы оптимизации состава и структуры сплава, а также технологии производства актуаторов различного назначения из сплавов на основе никелида титана остаются открытыми и актуальными, имеющими большое практическое значение.

Так, практически нет сведений о влиянии структуры материала на последовательность и полноту реализации механизмов накопления деформации в сплавах на основе никелида титана, определяющих формоизменение материала и характеристики ЭПФ и СУ. В работах сотрудников МАТИ им. К.Э. Циолковского и МАИ для определения максимально допустимых параметров нагружения материала предложено использовать понятие критических напряжений и деформаций. Ограничение области работоспособности конструкций из сплавов на основе никелида титана критическими напряжениями и деформациями является необходимым условием для многократно срабатывающих устройств, таких как актуаторы. Однако закономерности влияния структуры материала и условий испытаний (температуры, схемы и усилий противодействия и т.п.) при термоциклировании в интервале прямого и обратного мартенситных

превращений не установлены. Это сдерживает разработку и производство актуаторов, основанных на ЭПФ.

Результаты диссертационной работы получены при выполнении проекта по теме «Разработка класса биосовместимых функциональных композиционных материалов металл-полимер с эффектом памяти формы и сверхупругостью для медицинских изделий» (государственное задание №11.2372.2017/ПЧ от 31 мая 2017г.)

Цель работы состояла в установлении закономерностей влияния химического состава и структуры, формирующейся в процессе обработки полуфабрикатов и изделий из сплавов на основе никелида титана, на характеристики термомеханических актуаторов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние химического состава и технологии обработки на структуру сплавов на основе никелида титана
2. Изучить термомеханическое поведение и характеристики эффекта памяти формы и сверхупругости образцов и макетов актуаторов из сплавов на основе никелида титана в различном структурном состоянии.
3. Установить связь между структурой и свойствами сплавов на основе никелида титана и характеристиками работоспособности актуаторов.
4. Разработать рекомендации по выбору химического состава сплавов на основе никелида титана и режимов технологии изготовления элементов актуаторов различного назначения с регламентированными характеристиками работоспособности.

Научная новизна

1. Установлено, что работоспособность термомеханических актуаторов из материала с памятью формы определяется критическими напряжениями и деформациями, связанными с началом развития процессов дислокационного скольжения в материале в процессе нагружения и термоциклирования.

2. Показано, что увеличение содержания никеля в сплаве, его дисперсионное и/или деформационное упрочнение приводит к росту критических напряжений. Повышение температуры испытаний, относительно температуры обратного мартенситного превращения, и напряжений, противодействующих восстановлению формы, приводит к снижению значений критических деформаций.

3. Выявлено влияние схемы и параметров противодействия на характеристики работоспособности актуаторов из сплавов на основе

никелида титана. Установлено, что максимальная удельная работа элементов с ЭПФ актуаторов наблюдается в случае, когда противодействие восстановлению формы элемента генерирует в материале максимальное напряжение, равное критическому напряжению при термоциклировании.

Теоретическая и практическая значимость

1. Установлено влияние химического состава сплавов и термической обработки на критические напряжения и деформации элементов с ЭПФ актуаторов. Показано, что их максимальные значения достигаются в сплавах с повышенным (>54,5% по массе) относительно эквиатомного состава содержанием никеля, состаренных при температуре 450°C. Элементы актуаторов в таком состоянии обладают наиболее высокими значениями удельной работы, превышающими 4 МДж/м³.

2. Определена связь температурных, деформационных и силовых свойств сплавов на основе никелида титана с характеристиками работоспособности актуаторов на основе элементов с ЭПФ. Установленные закономерности должны использоваться при разработке новых функциональных устройств.

Разработаны рекомендации по выбору состава сплавов на основе никелида титана, и технологии их обработки и изготовления элементов актуаторов различного назначения. Рекомендации успешно опробованы АО КИМПФ при разработке актуаторов с элементами из никелида титана.

Методология и методы испытания

Методологической основой исследования послужили работы российских и зарубежных учёных, государственные стандарты РФ.

При выполнении работы были использованы современные методы исследования: металлографический, рентгеноструктурный, электронно-микроскопический анализы структуры, испытания свойств эффекта памяти формы и характеристик работоспособности макетов актуаторов.

Степень достоверности результатов

Все результаты получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Испытания и измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ, достоверность результатов подтверждается хорошим совпадением теоретических расчётов и экспериментальных данных, использованием методов математической статистики при обработке результатов.

Апробация результатов

Материалы работы доложены на 9 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: на седьмом международном аэрокосмическом конгрессе IAC'12 (Москва, 2012г.), на международных конференциях «Тi в СНГ» (Украина, г.Донецк, 2013г.; Республика Беларусь, г. Минск, 2018), на III Международной научной школе молодёжи «Материаловедение и металлофизика лёгких сплавов» (Екатеринбург, УрФУ, 2014г.), на XXXIX, XL, XLII Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, МАТИ, 2013, 2014; МАИ 2016 гг.), на семинаре по термомеханической обработке металлических материалов «Бернштейновские чтения» (Москва, МИСиС, 2016г.), на LX Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Республика Беларусь, г. Витебск, 2018г).

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности влияния химического состава сплавов на основе никелида титана и технологии обработки на их структуру и термомеханическое поведение.
2. Закономерности влияния схемы и параметров противодействия на характеристики работоспособности актуаторов из сплавов на основе никелида титана.
3. Принципы выбора состава и технологии обработки сплавов на основе никелида титана для изготовления элементов актуаторов различного назначения.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 14 научных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Список основных публикаций приведён в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 145 страницах машинописного текста и содержит 76 рисунков и 11 таблиц. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы из 103 наименований и приложения.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы.

Глава 1. Состояние вопроса

Рассмотрены основные области применения материалов с эффектом памяти формы. Показано, что одним из перспективных направлений использования этих материалов является изготовление исполнительных

устройств – актуаторов. Как правило, в термомеханических актуаторах используют сплавы на основе никелида титана, обладающие хорошим сочетанием характеристик памяти формы, механических свойств и коррозионной стойкости. В настоящее время разработаны основные принципы проектирования актуаторов и накоплен опыт их эксплуатации. Однако технологические методы повышения характеристик работоспособности и обеспечения их стабильности при серийном производстве изучены недостаточно. Рассмотрены физико-механические и структурные особенности проявления эффекта памяти формы, его характеристики и основные этапы производства полуфабрикатов и изделий из сплавов на основе никелида титана, влияющие на структуру и свойства материала. Сформулированы цель и задачи исследования.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Исследование проводили на проволоке из трёх сплавов на основе никелида титана (таблица 1). Для получения сплавов использовали иодидный (состав 1) или губчатый (составы 2 и 3) титан и электролитический никель. Плавку проводили вакуумно-дуговым методом с нерасходуемым электродом (состав 1), в гарнисажной (состав 3) или индукционной (состав 2) печах. Сплавы составов 2 и 3 подвергали дополнительному вакуумно-дуговому переплаву с расходуемым электродом. В первом сплаве состав В2-фазы отвечал стехиометрическому соотношению интерметаллида $TiNi$, а в остальных содержание никеля было выше предельной растворимости в В2-фазе при нормальной температуре. Сплав 3 отличался повышенным содержанием примесей, особенно кислорода. Последние этапы деформации (волочение) при получении проволоки проводили при температурах 500-600°C. Проволоку выпрямляли подвешиванием к её концу груза и нагреванием пропускаемым током до температур 500-600°C в течение 5 минут. Из проволоки изготавливали образцы, которые подвергали термической обработке в воздушной среде (300-600°C) или в вакууме (700-900°C). На образцах исследовали структуру на оптическом микроскопе AXIO Observer A1M и просвечивающем электронном микроскопе JEM 200CX JEOL. Фазовый состав изучали на дифрактометре ДРОН-4 в фильтрованном K_{α} медном излучении. Характеристики эффекта памяти формы определяли после деформации кручением на установке УПК-2. Нагрев образцов проводили в воздушной среде до 120°C с записью изменения их формы (деформации). Охлаждение образцов до -50° – в смеси бензина и сухого льда.

Таблица 1

Химический состав исследуемых плавок сплавов на основе никелида титана

Состав	Химический состав, % по массе								
	Ti	Ni	Fe	Si	Co	C	N	O	H
1	основа	54,5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,018	0,0004
2	основа	55,8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,02	0,0010
3	основа	55,6	0,05	0,05	<0,01	0,03	0,02	0,10	0,0011

Для определения характеристик работоспособности актуаторов из проволоки сплавов составов 1 и 2 изготавливали цилиндрические пружины (таблица 2). В качестве элемента смещения использовали свободно подвешенный груз или цилиндрические пружины разной жёсткости из стали. Макеты актуаторов термоциклировали в интервале температур $15 \div 80^\circ\text{C}$ с записью изменения длины пружины с ЭПФ (рабочего хода актуатора).

Таблица 2

Параметры пружин из сплавов на основе никелида титана для макетов актуаторов

Обозначение пружины	Состав сплава	Количество витков, i	Диаметр проволоки d , мм	Внешний диаметр пружины D , мм
I	1	16	1,3	5,1
II		27		
III		45		
IV	2	7	2,3	41,8
V		6		27,5

Результаты экспериментов обрабатывали методами математической статистики.

Глава 3. Влияние химического состава и структуры на механическое поведение сплавов на основе никелида титана в изотермических условиях

Проведён теоретический анализ последовательности и объёма реализации формоизменения сплавов с ЭПФ и СУ по механизмам передвойникования или образования мартенсита и дислокационного скольжения. Показана роль критических напряжений и деформаций, разделяющих механизмы накопления полностью обратимой (при разгрузке или нагреве) и необратимой (при образовании и движении дислокаций) деформаций на формоизменение материала, протекающее в изотермических условиях. Обосновано влияние состава сплава, его структуры и температуры

испытания на критические напряжения и деформации сплавов на основе никелида титана.

Экспериментально исследовано влияние термической обработки сплавов стехиометрического состава (состав 1) и с повышенным содержанием никеля (состав 2) на их структуру и деформируемость кручением в интервале температур прямого и обратного мартенситного превращения.

Установлено, что в образцах состава 1 в исходном состоянии после волочения и прямления структура представлена аустенитом и небольшим количеством мартенсита В19' (рис. 1) с высокой концентрацией дефектов кристаллического строения, о чём свидетельствует значительное размытие дифракционных отражений В2-фазы. При этом в процессе деформирования при комнатной температуре материал демонстрирует неполную СУ, когда большая часть наведённой деформации (до 6%) устраняется при разгрузке (рис. 2), а часть (до 3%) – при последующем нагреве. При увеличении температуры испытания СУ проявляется более полно, однако максимальная величина обратимой деформации снижается.

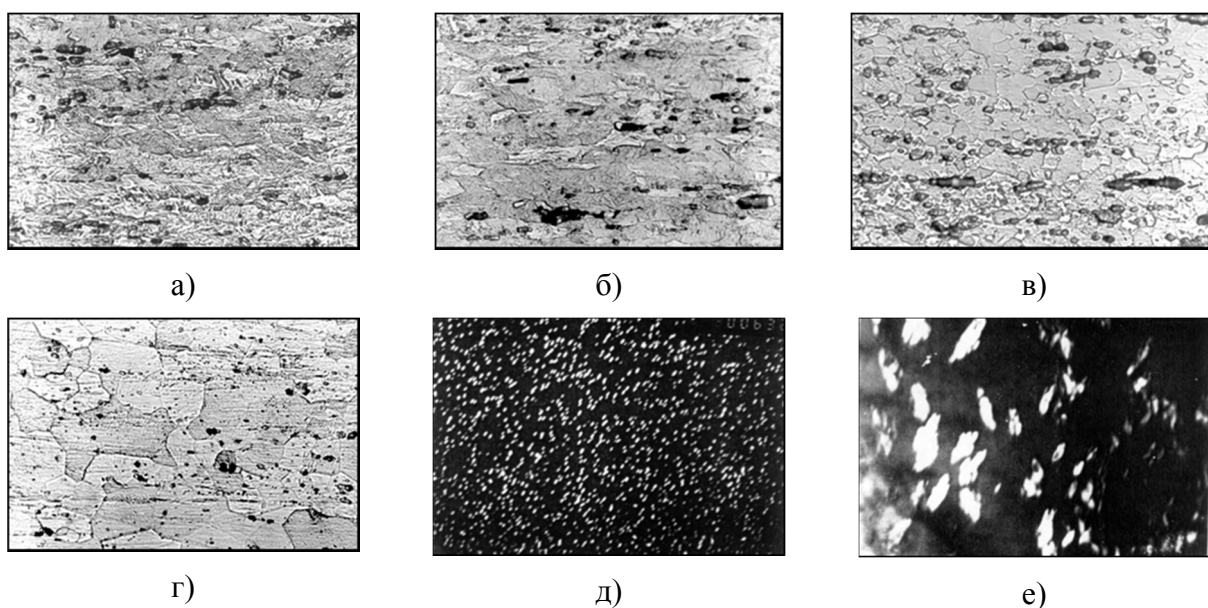


Рис.1. Структура сплавов на основе никелида титана состава 1 (а,б,в,г) и состава 2 (д,е) в термообработанном состоянии:

- а) исходное состояние, x280;
- б) полигонизованное при 450 °С, x280;
- в) рекристаллизованное при 550 °С, x280;
- г) рекристаллизованное при 800 °С, x280;
- д) состаренное при 450 °С, тёмное поле в рефлексе [110] Ti_3Ni_4 , x40000
- е) состаренное при 530 °С, тёмное поле в рефлексе [110] Ti_3Ni_4 , x40000

Отжиг при 450°С в течение 1 часа приводит к развитию процессов полигонизации, сопровождающихся снижением дефектности

кристаллической решётки В2-фазы. Деформация образцов до 11% обеспечивает накопление остаточной деформации, полностью восстанавливаемой последующим нагревом в интервале температур 38-48°C. При большем нагружении в образцах появляется необратимая деформация. Поэтому критическая степень деформации ($\gamma_{кр}$) отождённых при 450°C образцов сплава состава 1 при 20°C составляет 11%, а отвечающие этому формоизменению критические напряжения ($\tau_{кр}$) - 340 МПа. Увеличение температур деформирования образцов состава 1 свыше 60°C приводит к проявлению сверхупругости, которая переходит к нормальной упругости при температурах свыше 80°C.

Образцы состава 1 после отжигов при 550°C и 800°C имеют рекристаллизованную структуру В2-фазы (см. рис.1), но различаются размером зерна (20-30 и 40-50 мкм, соответственно). Их термомеханическое поведение аналогично поведению образцов, отождённых при 450°C, но отличается значениями критических деформации и напряжений (таблица 3). Необходимо отметить, что по мере повышения температуры отжига при снижении концентрации дефектов кристаллического строения В2-фазы и увеличении размеров её зёрен происходит уменьшение критических напряжений и деформаций материала во всём интервале температур реализации мартенситного превращения.

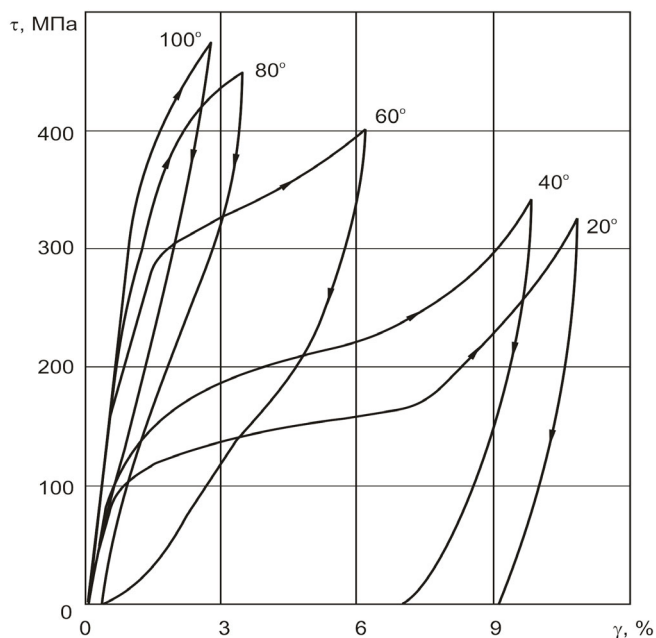


Рис. 2 Влияние температуры испытаний на механическое поведение образцов сплава состава 1, отожжённых при 450 °С в течение часа. Цифры у кривых указывают температуру испытания.

Таблица 3

Влияние состава сплава, температуры отжига и испытаний на критические деформации и напряжения образцов.

№ п/п	Состав сплава	Термообработка	Температуры испытания, °С	Критические значения	
				Деформация $\gamma_{кр}$, %	Напряжение $\tau_{кр}$, МПа
1	1	-	20	11	340
			80	2	450
2		Отжиг 450°С	20	10,5	330
			80	3,2	440
3		Отжиг 550°С	20	10,6	300
			80	2,1	430
4	Отжиг 800°С	20	9	225	
		80	1,3	300	
5	2	Старение 450°С	20	10,4	395
100			9	470	
6		Старение 520°С	20	10,3	300
			100	2,25	450

Для образцов состава 2 в исходном состоянии при деформациях до 11% наблюдается сверхупругое поведение. Старение этих образцов при температурах 450-520°С сопровождается развитием процессов полигонизации и выделением частиц интерметаллидов Ti_3Ni_4 и Ti_2Ni_3 (рис.1д,е). В результате этого температуры обратного мартенситного превращения повышаются, и деформирование образцов при нормальной температуре приводит к накоплению остаточной деформации, полностью или частично устраняемой при последующем нагреве. Повышение температуры испытаний приводит к сверхупругому поведению материала, которое переходит в упругое при температурах выше 100°С. Установлено, что уровень критических напряжений в образцах состава 2 значительно выше, чем образцов состава 1, что обусловлено упрочнением В2-фазы дисперсными частицами богатых никелем интерметаллидов.

Отжиг образцов состава 2 при 700°С формирует в материале рекристаллизованную В2-фазу с относительно крупным (30-40 мкм) размером зерна. Растворение при этой температуре богатых никелем интерметаллидов вызывает снижение температур мартенситного превращения ниже 0°С и проявление при нормальной температуре сверхупругого поведения.

Проведённые исследования позволили выявить следующие закономерности:

1. В сплаве с химическим составом, близким к стехиометрии интерметаллида $TiNi$, при отжиге в интервале температур $450-800^{\circ}C$ последовательно развиваются процессы полигонизации, рекристаллизации и роста зерна В2-фазы. В сплаве с повышенным содержанием никеля, кроме указанных процессов при старении ($450-520^{\circ}C$), происходит выделение богатых никелем интерметаллидов Ti_3Ni_4 и Ti_2Ni_3 .

2. Структурные процессы, приводящие к снижению плотности дефектов кристаллического строения (полигонизация, рекристаллизация), снижают значения критических напряжений, а процессы выделения дисперсных частиц увеличивают критические напряжения в материале.

3. Сплав на основе никелида титана с повышенным содержанием никеля, при сочетании в нём деформационного и дисперсионного механизма упрочнения, обладает более высоким уровнем критических напряжений по сравнению со сплавом, близким к стехиометрическому составу.

4. С ростом температуры испытания выше A_k критические деформации снижаются, а критические напряжения повышаются, достигая значений упругой деформации и напряжений текучести, характерных для обычных конструкционных материалов. В сплавах никелида титана с повышенным содержанием никеля этот переход происходит при более высокой (относительно A_k) температуре и характеризуется большими значениями критических напряжений и деформаций, чем в сплавах, близких к стехиометрическому составу В2-фазы.

Глава 4. Влияние химического состава и структуры на формоизменение образцов сплавов на основе никелида титана при термоциклировании под нагрузкой

Термоциклирование проводили в интервале температур мартенситного превращения при различных схемах противодействия восстановлению формы.

Образцы состава 1, отожённые при 450 и $570^{\circ}C$, деформировали при $20^{\circ}C$ на различную степень (от 6 до 20%), затем нагружали до напряжений от 20 до 180 МПа и нагревали до окончания восстановления формы. После этого охлаждали до комнатной температуры, при которой разгружали и повторно нагревали в свободном состоянии.

Было установлено, что для образцов, предварительно деформированных до критической степени (около 10%, см. табл. 3), интенсивное накопление необратимой деформации происходит при восстановлении формы с противодействующими напряжениями выше 70 МПа, что значительно ниже критических напряжений (см. табл. 3),

определённых в изотермических условиях. Пластичность превращения при охлаждении до комнатной температуры развивается в случае превышения 60 МПа. Температуры начала и конца как прямого так и обратного превращения линейно зависят от приложенной нагрузки, но их уровень определяется степенью предварительной деформации.

Для образцов сплава состава 3 нагрузку задавали при комнатной температуре, после чего их охлаждали до -50°C , при которой разгружали, а затем нагревали в свободном состоянии до окончания формоизменения (рис.3).

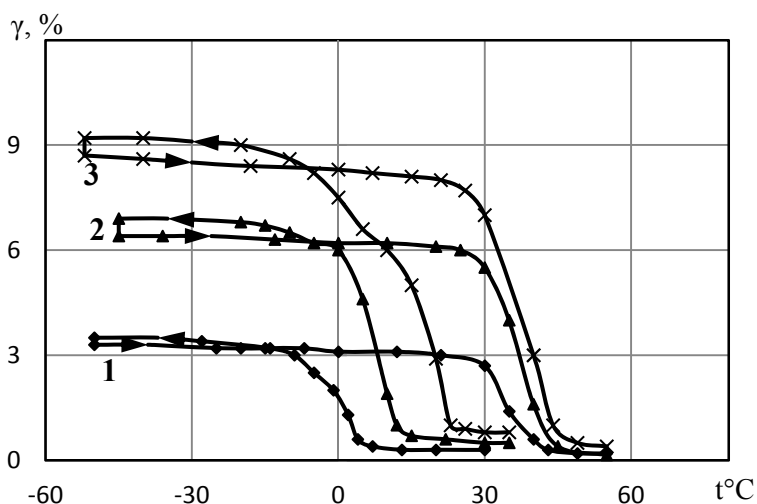


Рис. 3. Влияние напряжений на формоизменение образцов сплава состава 3, отожжённых при 700°C в течение 1 часа и состаренных при 470°C в течение 1 часа. . 1 – 20 МПа, 2 – 50 МПа, 3 – 100 МПа

Проведённые исследования показали, что независимо от структурного состояния образцов наблюдаются общие закономерности формоизменения при охлаждении под нагрузкой:

1. Накопленная при охлаждении деформация наблюдается уже при малых (20 МПа) напряжениях и интенсивно увеличивается с их ростом.

2. При напряжениях противодействия, превышающих 100 МПа, накопленная при охлаждении деформация полностью не восстанавливается при последующем нагреве в свободном состоянии. Величина необратимой деформации увеличивается с ростом напряжений примерно так же, как и накопленная, а их разность остаётся постоянной ($\sim 10,5 \div 11,5\%$), что соответствует максимальной кристаллографической деформации мартенситного превращения.

3. Температура начала формоизменения при охлаждении (M_{H}^{τ}) увеличивается с ростом напряжений, а конца (M_{K}^{τ}) практически не изменяется.

Структурное состояние образцов сплава состава 3 влияет на конкретные характеристики формоизменения. Так, максимальные критические напряжения, при которых в образцах начинает накапливаться необратимая деформация, наблюдаются после старения при 470°C, когда в сплаве выделяется максимальная объёмная доля дисперсных частиц интерметаллида Ti₃Ni₄. Повышение температуры старения выше 470°C или отжиг при 700°C приводит к укрупнению и растворению этих частиц и снижению критических напряжений. В то же время критическая деформация, обусловленная накоплением при охлаждении обратимой деформации, возрастает.

Образцы сплава состава 2, состаренные при 450°C в течение 1 часа нагружали при комнатной температуре, после чего охлаждали до -50°C с определением накопленной деформации, а затем нагревали до завершения формоизменения (рис. 4). После нагрева их разгружали с замером остаточной необратимой деформации.

Для этих образцов отмечается более высокий уровень напряжений, при которых обнаруживается необратимая деформация, и более медленное её накопление при увеличении нагрузки. Кроме того, необходимо отметить значительное расширение температурного интервала формоизменения, особенно при охлаждении (до 30°C). Последнее, по-видимому, связано с многостадийностью превращения B2→R→B19'. В то же время основное (до 70%) формоизменение происходит в достаточно узком интервале температур в 10÷15°C, что необходимо учитывать при проектировании актуаторов.

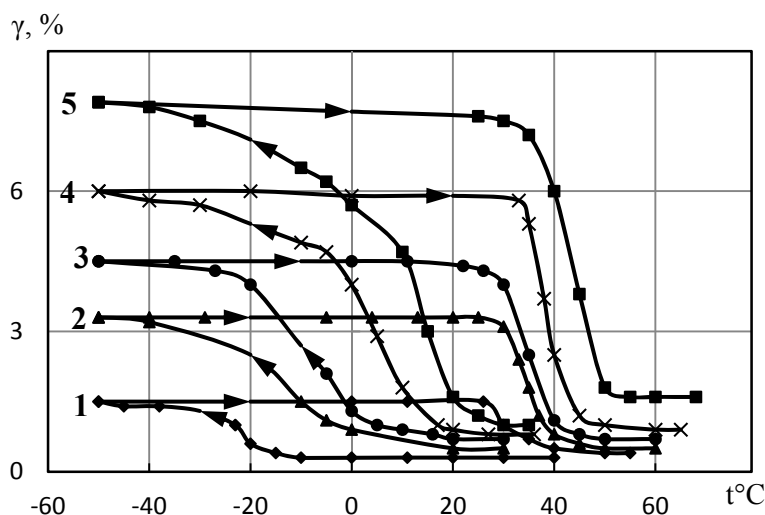


Рис. 4 Влияние напряжений (1 – 20 МПа, 2 – 50 МПа, 3 – 70 МПа, 4 – 100 МПа, 5 – 150 МПа) на формоизменение при охлаждении и нагреве образцов сплава состава 2, состаренных при 450 °C в течение 1 часа

Исследования, проведённые на образцах сплавов составов 1,2 и 3, показали, что установленные выше закономерности носят аналогичный

характер. Различия в химическом составе и структуре образцов в основном сказываются на появлении и накоплении необратимой деформации после термоциклирования под нагрузкой (таблица 4). Эти особенности можно сформулировать следующим образом:

1. Напряжения противодействия, превышение которых приводит к накоплению необратимой деформации при термоциклировании, составляют от 80 до 150 МПа, что значительно меньше критических напряжений, определяемых при изотермических испытаниях.

2. Напряжения начала интенсивного накопления необратимой деформации при термоциклировании выше у сплавов с повышенным содержанием никеля и примесного кислорода, а также упрочненных выделениями дисперсных частиц интерметаллидов Ti_3Ni_4 и Ti_2Ni_3 .

3. Предварительная деформация образцов перед термоциклированием не выше критической степени не влияет на закономерности формоизменения под нагрузкой, а выше критической – уменьшает напряжения интенсивного накопления необратимой деформации.

Таблица 4

Влияние состава сплавов на основе никелида титана и их обработки на характеристики формоизменения при термоциклировании под нагрузкой

Состав сплава	Состояние образцов	Критическое напряжение при термоциклировании, МПа	Накапливаемая при охлаждении и восстанавливаемая при нагреве критическая деформация γ_3 - γ_4 , %	Удельная работа α_y , МДж/м ³
Состав 1	Отожжённые при 550°	70	8,6	3,0
Состав 2	Состаренные при 450°С	150	8,2	6,2
Состав 3	Исходное состояние	100	10,2	5,1
	Отожжённые при 700 °С	110	11,1	6,1
	Состаренные при 470 °С	130	10,1	7,6
	Состаренные при 500 °С	120	10,7	6,4
	Состаренные при 550 °С	110	11,0,	6,2

Глава 5. Анализ работоспособности актуаторов с элементами из сплавов на основе никелида титана

Рассмотрены основные схемы термомеханических актуаторов с элементами из никелида титана, работающими в условиях постоянного или переменного противодействия со стороны элемента смещения.

Теоретический анализ с использованием кривых нагружения никелида титана при температурах ниже M_k и выше A_k показал, что для определения условий работоспособности актуаторов необходимо учитывать критические деформации и напряжения материала, так чтобы при соответствующей температуре уровень напряжений и деформаций материала не превышал критических значений. При многоцикловой работе актуатора необходимо ограничивать прикладываемые нагрузки на элемент актуатора из никелида титана напряжениями интенсивного накопления необратимой деформации при термоциклировании.

Для экспериментального определения закономерностей работоспособности актуаторов были изготовлены макеты элементов из никелида титана в виде цилиндрических пружин (см. таблица 2), которые нагружали постоянным (подвешенный груз) или переменным (стальные пружины различной жёсткости) усилием и термоциклировали в интервале прямого и обратного мартенситного превращения. Определяли изменение длины пружины с ЭПФ в зависимости от температуры при различных условиях испытания (масса груза - P , жёсткость противодействующей пружины - c , исходное растяжение - $\Delta l_{исх}$). В качестве характеристик работоспособности актуатора определяли температуры формоизменения (A_n , A_k , M_n , M_k), рабочий ход (Δl), совершённую (A) и удельную работу (a_y).

На первом этапе испытаний проводили подбор характеристик элемента из сплава состава 1, отожжённого при 550°C (пружины I, II, III), под конкретные характеристики элемента смещения - стальной пружины с жёсткостью $c=0,3$ Н/мм и критическим усилием 9,5 Н. Исходя из этого, $\Delta l_{исх}$ определяли как сумму удлинения стальной пружины до критического усилия и удлинения пружины из никелида титана до этого же уровня в аустенитном состоянии при температуре 80°C . В процессе испытаний установлено, что с уменьшением жёсткости пружинного элемента из никелида титана рабочий ход макета актуатора и совершённая им работа незначительно увеличиваются, однако удельная работа значительно снижается (см. таблица 4). Уменьшение $\Delta l_{исх}$ относительно оптимального значения приводит к падению всех характеристик работоспособности актуатора, а увеличение - к превышению критического усилия и выходу из строя (появлению остаточного удлинения) стальной пружины (рис. 5).

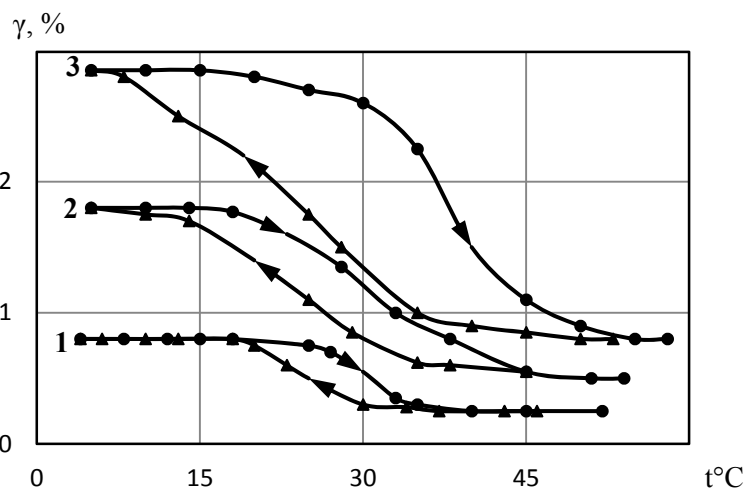


Рис. 5 Формоизменение пружины II из сплава состава 1, отожжённой при 550°C, с различным исходным удлинением: 1-21, 2-40, 3-59 мм.

Необходимо также отметить, что с увеличением $\Delta l_{исх}$ возрастают температуры A_n , A_k , M_n , а M_k уменьшается, что приводит к расширению температурного гистерезиса формоизменения элемента с ЭПФ.

На макетах актуаторов с пружинами из сплава состава 2, состаренных при различных температурах, была опробована схема с постоянным противодействием. В этом случае определяли температуры формоизменения и изменение длины пружины с ЭПФ при термоциклировании с разным усилием противодействия (рис. 6, таблица 5).

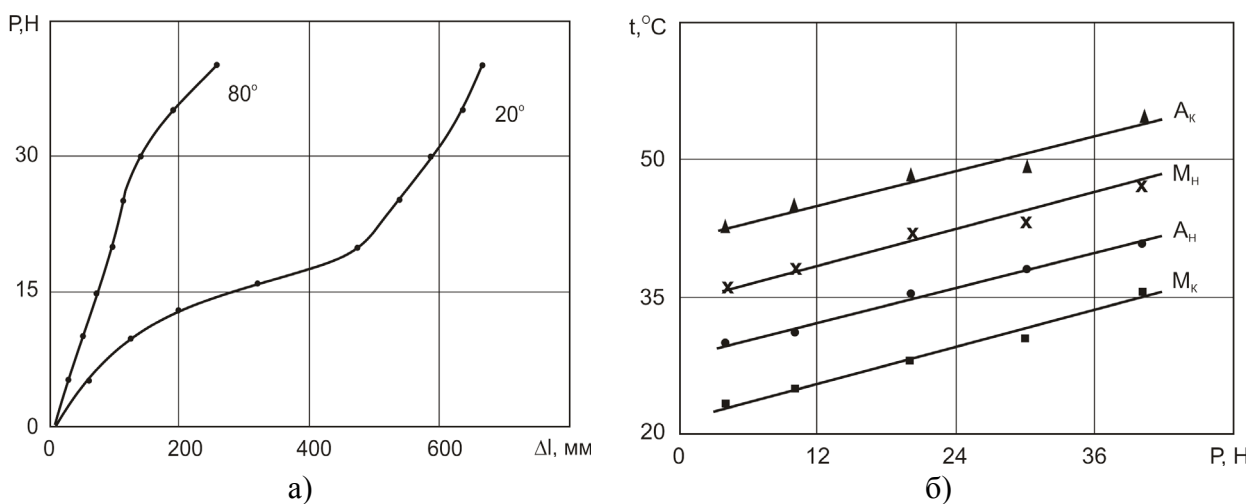


Рис. 6 Влияние усилия постоянного противодействия при 20 и 80 °C на удлинение пружины IV состава 2, состаренной при 450°C, (а) и температуры прямого (M_n , M_k) и обратного (A_n , A_k) мартенситного превращения (б)

Таблица 5

Влияние схемы и параметров противодействия на максимальные характеристики работоспособности макетов актуаторов с пружинами IV и V из сплава состава 2, термообработанных по различным режимам

№ п/п	Схема противодействия	Термообработка	Рабочий ход актуатора Δl , мм	Удельная работа a_y , МДж/м ³
1	Постоянное с $P=30$ Н	450°C, 1 час	445	3,65
2	Постоянное с $P=26$ Н	480°C, 1 час	390	3,20
3	Постоянное с $P=27$ Н	530°C, 1 час	370	2,85
4	Переменное с $c=0,22$ Н/мм	450°C, 1 час	95	1,36
5	Переменное с $c=0,4$ Н/мм	450°C, 1 час	100	2,48
6	Переменное с $c=0,22$ Н/мм	480°C, 1 час	100	1,03
7	Переменное с $c=0,4$ Н/мм	480°C, 1 час	100	2,24
8	Переменное с $c=0,22$ Н/мм	530°C, 1 час	110	1,31
9	Переменное с $c=0,4$ Н/мм	530°C, 1 час	90	1,82

Можно отметить, что удлинение пружин в зависимости от противодействующей нагрузки подобно кривым нагружения образцов материала при соответствующих температурах, а температуры формоизменения увеличиваются линейно.

Максимальное критическое усилие, при превышении которого наблюдается интенсивный рост необратимого удлинения для пружин состаренных при 450°C, составляет 35Н, что отвечает критическому напряжению в материале в условиях термоциклирования. Его уровень постепенно уменьшается с ростом температуры старения до 480 и 530°C. В то же время рабочий ход макета актуатора при малых противодействующих нагрузках выше у пружин, состаренных при более высоких температурах (см. табл. 5).

Аналогичные закономерности наблюдаются и в том случае, когда пружины из сплава состава 2 используются в макетах актуаторов, работающих по схеме переменного противодействия (рис. 7). Наиболее высокие характеристики работоспособности удаётся получить при жёсткости противодействующей пружины, в 5 раз меньшей жёсткости пружины ЭПФ в аустенитном состоянии, и при $\Delta l_{исх}$, обеспечивающей близость, но не превышение критических нагрузок пружин. Максимальная удельная работа

достигается у пружин с ЭПФ, состаренных при 450°C, с дисперсионно упрочнённой структурой.

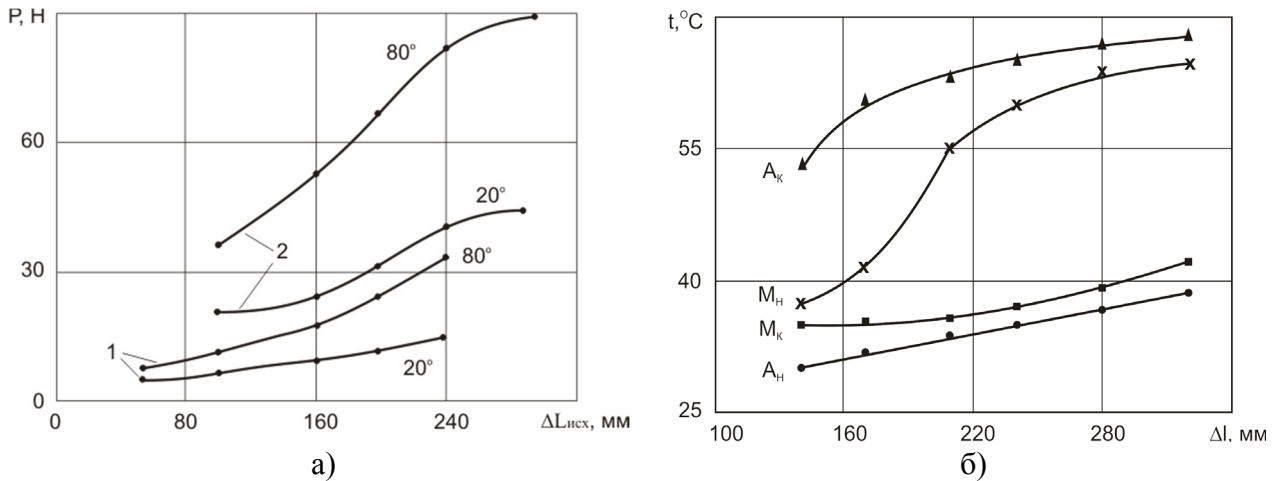


Рис. 7 Влияние исходной величины растяжения ($\Delta l_{исх}$) на усилия (а) и температуры прямого (M_n , M_k) и обратного (A_n , A_k) мартенситного превращения (б) пружины V состава 2, состаренной при 450°C, в условиях переменного противодействия с жёсткостью 0,22 (1) и 0,4 Н/мм (2)

Анализ литературных источников и собственные исследования позволили выделить следующие основные характеристики актуаторов, на которые влияют свойства материала элемента из никелида титана.

1. Температурные характеристики (A_n , A_k , M_n , M_k) материала и их зависимости от напряжений, определяющие интервал температур срабатывания актуатора.

2. Критическая деформация ($\epsilon_{кр}$, $\gamma_{кр}$) и её температурная зависимость, которая определяет рабочий ход актуатора.

3. Критические напряжения ($\sigma_{кр}$, $\tau_{кр}$), влияющие на силовые характеристики актуатора.

4. Удельная работа восстановления формы при критических деформациях и напряжениях (a_y), определяющая энергетические возможности актуатора и его К.П.Д.

В зависимости от назначения актуатора, значимость тех или иных характеристик может быть различна, но в большинстве конструкций необходимо обеспечить оптимальное сочетание силы и перемещения с высоким К.П.Д., что реализуется в материалах с максимальной удельной работой восстановления формы.

Выбор состава сплава на основе никелида титана в первую очередь определяется необходимыми температурами срабатывания актуатора. В этом отношении границей по температуре A_k будет являться 50-55 °С. Эта температура соответствует минимальной растворимости никеля в В2-фазе

(54,5% Ni по массе), которую удаётся получить для двухфазных сплавов, содержащих богатые никелем интерметаллиды Ti_3Ni_4 или Ti_2Ni_3 . Для обеспечения более высоких температур A_k (от 55 до 110 °С) необходимо использовать однофазные В2-сплавы с пониженным содержанием никеля.

Для актуаторов, в которых температуры срабатывания ниже 50 °С, возможности варьирования химического состава значительно больше. Применяя закалку и старение изделий можно повышать или понижать содержание никеля в В2-фазе, а соответственно, уменьшать или увеличивать температурные характеристики. Необходимо учитывать, что чем ниже требуемые температуры срабатывания актуатора, тем большим должно быть содержание никеля в сплаве.

Для актуаторов, у которых главными являются силовые характеристики, необходимо использовать элементы из сплавов на основе никелида титана с наиболее высокими критическими напряжениями. Это обеспечивается упрочнением В2-фазы для повышения напряжений начала формоизменения по механизму скольжения дислокаций. Для сплавов с температурами A_k выше 55 °С, для которых возможно только деформационное упрочнение, обработку изделий (термофиксацию формы, отжиг) необходимо проводить при температурах, при которых протекают процессы полигонизации В2-фазы. Как показали исследования, рассмотренные в главе III, это реализуется при отжиге в интервале температур 400-450 °С. Время выдержки при этих температурах должно быть достаточно для снятия напряжений при термофиксации за счёт полигонизации структуры, но не приводит к рекристаллизации В2-фазы. Оно может меняться от 60 до 30 минут, соответственно температуре отжига.

Для актуаторов, у которых наиболее важной характеристикой работоспособности является перемещение, никелид титана должен обладать максимальной критической деформацией, обеспечивающей наибольшую пластичность превращения материала при охлаждении (см. гл. 3). Это обеспечивается в сплаве с рекристаллизованной структурой В2-фазы. Рекристаллизация реализуется в процессе отжига сплава при температурах 500-600°С и выдержке от 60 до 30 минут, соответственно.

Если температуры срабатывания актуатора не превышают 50 °С, то для его изготовления целесообразно использовать сплавы с повышенным содержанием никеля (более 54,5% по массе) и обеспечивать необходимые температурные характеристики изделия путём старения. В этом случае за счёт дисперсионного упрочнения сплава можно значительно повысить критические напряжения материала и обеспечить максимальную удельную работу. Наиболее высокие критические напряжения обеспечиваются в

полуфабрикатах сплава с деформированной или полигонизованной структурой, а старение проводится при температурах 450-480 °С, обеспечивающих максимальную объемную долю и дисперсность частиц Ti_3Ni_4 .

В том случае, когда от актуатора требуется наибольшие перемещения, то материал должен обладать максимальной критической деформацией. Это обеспечивается старением при температурах 480-530 °С с формированием в структуре относительно крупных частиц Ti_2Ni_3 . Время старения элементов актуаторов должно выбираться в соответствии с требуемыми температурными характеристиками изделия: чем они выше, тем больше должно выделиться богатых никелем интерметаллидов, а, соответственно, длительней должно быть старение. В зависимости от химического состава сплава, технологии обработки полуфабриката, требуемых температурных характеристик время выдержки может меняться от 10 минут до 8 часов.

Указанные выше рекомендации по выбору состава сплава, технологии обработки полуфабриката и элемента актуатора обобщены в таблице 6.

Таблица 6

Рекомендации по выбору состава и технологии обработки элементов актуаторов из сплавов на основе никелида титана

Требования к актуаторам		Требования к материалу актуатора		
Температурные	Основные требования к характеристикам	Химический состав	Состояние полуфабриката	Термообработка изделия
$A_k > 50^\circ C$	Деформационные ($\epsilon_{кр\ max}$, $\gamma_{кр\ max}$)	Ti – 53,5÷54,5%Ni по массе	Нет требований	Термофиксация или отжиг 500-600°C, не менее 0,5 часа
	Силовые ($\sigma_{кр\ max}$, $\tau_{кр\ max}$)		Деформированное, полигонизованное	Термофиксация, отжиг 400-450°C не более 1 часа
$A_k < 50^\circ C$	Деформационные ($\epsilon_{кр\ max}$, $\gamma_{кр\ max}$)	Ti – 54,5÷56,5%Ni по массе	Нет требований	Вакуумный отжиг 700°C, 1 час. Термофиксация и старение 480-530°C
	Силовые ($\sigma_{кр\ max}$, $\tau_{кр\ max}$)		Деформированное, полигонизованное	Термофиксация и старение 450-480°C
	Энергетические (a_y)		Нет требований	Вакуумный отжиг 700°C, 1 час. Термофиксация и старение 480-530°C

Приведённые рекомендации были успешно опробованы АО КИМПФ при разработке новых изделий с элементами из никелида титана, что подтверждено соответствующим актом.

Основные выводы по работе

1. Установлено, что твёрдорастворное, деформационное и дисперсионное упрочнение сплавов на основе никелида титана приводит к увеличению критических напряжений и способствует более полной реализации формоизменения материала по механизму переориентации или образования мартенсита. Максимальные критические напряжения до 470 МПа при изотермическом нагружении наблюдаются у образцов из сплава с повышенным содержанием никеля ($>54,5\%$ Ni по массе) и состаренных при 450°C .

2. Показано, что максимальная критическая деформация сплавов на основе никелида титана наблюдается при их стехиометрическом составе и полигонизованной структуре. С увеличением температуры испытания относительно температур мартенситного превращения происходит снижение критической деформации до уровня упругости В2-фазы.

3. Определено влияние схемы и параметров нагружения на характеристики формоизменения сплавов на основе никелида титана при термоциклировании. Показано, что накопление необратимой деформации при охлаждении и нагреве происходит при напряжениях, значительно более низких, чем критические, определённые в изотермических условиях, что может быть связано с их суммированием с ориентированными микронапряжениями при аккомодационной деформации кристаллов мартенсита.

4. Зависимости критических напряжений в изотермических условиях и при термоциклировании под нагрузкой от химического состава сплава и его обработки носят аналогичный характер. Максимальные критические напряжения при термоциклировании (до 130 МПа) и удельная работа (до $7,6$ МДж/м³) наблюдаются у образцов из сплава с повышенным содержанием никеля и состаренных при $450-470^{\circ}\text{C}$, а максимальная критическая деформация до $11,1\%$ – после отжига при 700°C .

5. Установлено, что для обеспечения многократного срабатывания термомеханических актуаторов параметры напряжённо-деформированного состояния элементов из никелида титана не должны превышать значения его критических напряжений и деформаций при термоциклировании.

6. Максимальная удельная работа термомеханического актуатора достигается при его работе в условиях, обеспечивающих близость

напряжений противодействия к критическим. Наиболее высокий уровень критических напряжений достигается в сплавах с повышенным содержанием никеля, состаренных при 450°C. Для обеспечения наибольшего рабочего хода актуатора необходимо использовать никелид титана с рекристаллизованной структурой.

7. Разработаны рекомендации по выбору состава сплава на основе никелида титана и его обработки для обеспечения высокого уровня характеристик работоспособности термомеханических актуаторов различного назначения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Список публикаций в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и Scopus

1. *Коллеров, М.Ю.* Повышение характеристик работоспособности медицинских имплантатов из сплава никелида титана методом термической обработки / *Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Орешко Е.И., Бурнаев А.В.* // Технология лёгких сплавов. 2013. -№3. с.40-46

2. *Коллеров, М.Ю.* Закономерности процесса восстановления формы сплавов на основе никелида титана в условиях постоянного противодействия / *Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Гуртовой С.И., Бурнаев А.В.* // Титан. 2014. - №1. с. 38-43

3. *Коллеров, М.Ю.* Термомеханическое поведение сплавов на основе никелида титана при постоянном противодействии / *Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Гуртовой С.И., Бурнаев А.В.* // Металлы. 2015. -№3. с. 67-72

Gusev, D.E. Reactive Stresses in Titanium Nickelide-Based Alloys / *D. E. Gusev, M. Yu. Kollerov, A. A. Sharonov, S. I. Gurtovoi, A. V. Burnaev* // Russian Metallurgy (Metally). 2015. -№5. с. 395-399

4. *Коллеров, М.Ю.* Влияние химического состава и структуры на термомеханическое поведение сплавов на основе никелида титана / *Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Бурнаев А.В., Шаронов А.А.* // МИТОМ. 2017 -№6. с. 38-44

Kollerov, M.Yu. Effect of the chemical composition and structure on the thermomechanical behavior of alloys based on titanium nickelide / *M. Yu. Kollerov, D.E. Gusev, A. A. Sharonov, A. V. Burnaev* // Metal science and heat treatment. 2017. т.59 - №5-6. с. 363-369

5. *Коллеров, М.Ю.* Закономерности термомеханического поведения актуаторов из никелида титана / *Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Бурнаев А.В., Шаронов А.А.* // Титан. 2017. -№1 с. 46-51