

*В.И. БОГДАНОВИЧ, Н.П. РОДИН,  
О.В. ЛОМОВСКОЙ*

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**2007**



САМАРА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*В.И. БОГДАНОВИЧ, Н.П. РОДИН, О.В. ЛОМОВСКОЙ*

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2007

УДК [621.744+621.778.2+621.792]: 624.016  
ББК 34.432  
Б90



**Инновационная образовательная программа  
"Развитие центра компетенции и подготовка  
специалистов мирового уровня в области аэро-  
космических и геоинформационных техноло-  
гий"**

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. **О. М. Б а т и щ е в а**;  
канд. техн. наук, проф. **А. И. З а б а р о в**

**Богданович В.И.**  
Б90 **Применение материалов с эффектом памяти формы в производ-  
стве летательных аппаратов:** учеб. пособие / *В.И. Богданович, Н.П.  
Родин, О.В. Ломовской.* - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та,  
2007. - 64 с.: ил.

**ISBN 978-5-7883-0647-6**

Рассмотрены вопросы практического применения материалов с эффектом памяти формы в производстве летательных аппаратов и в других областях техники. Изложены основные физические принципы стабильного функционирования силового привода с эффектом памяти формы. Рассмотрены вопросы моделирования физико-механических процессов, протекающих в процессе функционирования силового привода с эффектом памяти формы, и изложена методика его проектирования.

Учебное пособие предназначено для студентов аэрокосмических факультетов, обучающихся по специальностям 160201 «Самолето- и вертолетостроение», 160801 «Ракетостроение», 160802 «Космические летательные аппараты и разгонные блоки», 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах», 200503 «Стандартизация и сертификация».

Подготовлено на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

УДК [621.744+621.778.2+621.792]: 624.016  
ББК 34.432

**ISBN 978-5-7883-0647-6**

© Богданович В.И., Родин Н.П.,  
Ломовской О.В., 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПРИРОДЕ И МЕХАНИЗМЕ ОБРАТИМОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ	7
1.1 Применение материалов с эффектом памяти формы в авиационной и космической технике	7
1.2 Физические основы термоупругого мартенситного превращения и физико-механические свойства материалов с эффектом памяти формы	21
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ	33
2.1 Постановка математической модели функционирования цилиндри- ческого силового элемента с эффектом памяти формы	33
2.2 Краевая задача термоупругости для цилиндрического силового эле- мента с эффектом памяти формы	38
2.3 Определение температурного поля в цилиндрическом силовом эле- менте	40
2.4 Инженерная методика расчета параметров напряженно- деформированного состояния силового элемента с памятью формы	43
3 ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ	46
3.1. Деформационно-силовые зависимости силового элемента, рабо- тающего в условиях одноосного растяжения	46
3.2. Деформационно-силовые зависимости силового элемента, рабо- тающего в условиях одноосного сжатия	49
3.3 Аппроксимация температурных зависимостей ортотропных компо- нент тензора структурных деформаций	52
4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕВЕРСИВНЫХ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ	55
4.1 Конструктивные особенности реверсивного силового привода с эффектом памяти формы	55
4.2 Методика проектирования реверсивного силового привода с эффек- том памяти формы	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	62

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из важных проблем развития аэрокосмической техники является подготовка специалистов, способных в своей практической деятельности применять прогрессивные технологии, основанные на принципиально новых физических принципах, в частности основанных на свойствах новых материалов.

Сплавы с эффектом памяти формы представляют типичный пример нового материала. Использование некоторых анизотропных свойств этих сплавов позволяет создать уникальные устройства, имеющие недостижимые ранее характеристики.

Основная задача данного учебного пособия – ознакомить студентов с механизмом эффекта памяти формы в сплавах, со свойствами данных материалов, которые изменяются в процессе фазовых превращений, со способами математического моделирования процессов, протекающих в результате фазовых превращений в данных сплавах, с инженерными методиками, позволяющими разрабатывать различные устройства для решения уникальных задач в области авиаракетостроения.

Содержание предлагаемого учебного пособия дополняет курс по дисциплинам, посвященным изучению технологии производства аэрокосмической техники, и предназначено для использования в качестве руководства для разработки элементов устройств с силовым приводом из сплава с эффектом памяти формы при курсовом и дипломном проектировании.

В данном издании приведены примеры практического использования эффекта памяти формы в различных устройствах и в технологических процессах, представлена инженерная методика проектирования различных устройств. Можно надеяться, что учебное пособие окажется полезным для инженеров-разработчиков и студентов при проектировании прогрессивных технологических процессов, устройств и элементов, принцип действия которых основан на эффекте памяти формы в сплавах.

## ВВЕДЕНИЕ

Во второй половине XX века было сделано много серьезных открытий в области физики металлов, наиболее ярким среди них стал эффект памяти формы.

Металлы и сплавы обычно характеризуются такими физико-механическими свойствами, как модуль упругости, твердость, теплоемкость, электропроводность и др. Теперь среди этих свойств появились и антропоморфные: степень восстановления формы. Действительно, некоторые сплавы обладают способностью принимать заранее заданную форму. Это свойство сплавов достигается в результате термической и механической обработки, которая фиксирует определенный тип структуры в заданном состоянии. Образец из такого сплава пластически деформированный в области низких температур, проходя в область высоких температур, восстанавливает исходную форму при превышении температуры выше некоторого критического значения. Данное явление, впоследствии названное эффектом памяти формы, основано на фазовом переходе к мартенситному термоупругому состоянию, происходящему в интервале между «высокой» и «низкой» температурами. Фазовый переход может быть вызван или изменением температуры, или приложением напряжений, или их сочетанием.

Этот феномен открыт академиком Т.В. Курдюмовым и доктором физико-математических наук Л.Г. Хандорсом в 1948 году [1]. Впервые эффект памяти формы наблюдали американские ученые Чэн и Рид [2] в сплаве системы Au-Cd в 1951 г. До шестидесятых годов XX столетия он рассматривался как лабораторный курьез. В это время эффект памяти формы был обнаружен в сплавах системы Ti-Ni В. Дж. Блюхером и его сотрудниками в US Naval Ordnance Laboratory [3]. Доступность этого материала и сильно

выраженный эффект памяти формы позволили перевести проблему в область практического применения.

Возросший в связи с этим научный и практический интерес к этому явлению определяется стремлением познать физическую природу и механизм эффекта памяти формы, что расширяет фундаментальные представления о неупругом поведении твердых тел, открывает широкие перспективы применения в технике, позволяя создавать элементы и устройства с принципиально новыми функциональными свойствами.

Научно-исследовательские работы в направлении изучения материалов с эффектом памяти формы и их применения в технологических процессах начали проводиться в ОНИЛ-11 кафедры ПЛА и УКМ СГАУ с 1980 года по инициативе и под руководством научного руководителя ОНИЛ-11 доц. Глушенкова В.А. В настоящее время исследования проводятся под руководством заведующего кафедрой, чл.-кор. РАН, д-ра техн. наук, проф. Барвинка В.А. Основным результатом проводимых работ явилось создание силового привода с эффектом памяти формы многократного действия, что открыло более широкие возможности для решения практических задач во многих областях техники.

Это иллюстрируется на примере результатов работ, проводимых в СГАУ. Так, на базе эффекта памяти формы создана серия уникального прессового оборудования, разработаны ручные механизированные инструменты для разделительных операций и монтажных работ в условиях открытого космоса, созданы эффективные зажимные устройства для станочных приспособлений и т.п.

Эффект памяти формы в сплавах в настоящее время интенсивно исследуется и ряде случаев успешно применяется в технике.

## 1. СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПРИРОДЕ И МЕХАНИЗМЕ ОБРАТИМОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ

### *1.1 Применение материалов с эффектом памяти формы в авиационной и космической технике*

Эффект памяти формы в металлах открывает широкие перспективы применения в технике, позволяя создавать элементы и устройства с принципиально новыми функциональными свойствами. В настоящее время материалы, обладающие эффектом памяти формы, находят все более широкое применение для выполнения функций, до сих пор вообще несвойственных металлам и сплавам.

Эффект памяти формы применяется как в конструкции аэрокосмической техники, так и в технологических процессах ее производства.

Одной из областей техники, где эффективно использованы устройства с силовым приводом из сплава с ЭПФ, является создание космических аппаратов. Наиболее рационально силовой привод с ЭПФ может быть использован в конструкции захватов, саморазворачивающихся антенн, солнечных батарей и т.п., в механизмах ориентации солнечных батарей, при создании инструментов для монтажных работ (гайковерты, устройства для соединения цилиндрических деталей и элементов конструкций, самозатягивающиеся обоймы и муфты, зажимы, развальцеватели, фланцевые соединения и т.д.), при разработке силовых болтов и шпилек, приводов поворотных механизмов (рули, заслонки, люки и т.д.), крепёжных элементов, манипуляторов.

Известны примеры практического использования силового привода с ЭПФ в конструкциях устройств, размещенных и функционирующих на околоземной орбите. Так, с 3 по 5 марта 1989 г. на ТГК «Прогресс-40» и ОК «Мир» был проведён эксперимент

«Краб» по исследованию раскрытия, формообразования, жесткостных и динамических характеристик кольцевых рамочных крупногабаритных конструкций диаметром 20 м каждая, использующих для раскрытия звеньев приводы из сплава никелида титана ТН-1, обладающего эффектом памяти формы.

На НПО «Энергия» подготавливался эксперимент «Рапана», который является продолжением серии работ с крупногабаритными космическими конструкциями (КГКК) на орбитальных станциях. Ферма «Рапана» (рис. 1.1) относится к трансформируемым КГКК. Аббревиатура «Рапана» расшифровывается как «ра- (звертываемый) пан-(ельный) а-(грегат)». В развернутом виде она имеет длину 5м, ее поперечное сечение — 300x400 мм. Конструкция состоит из пяти ячеек. Каждая ячейка выполнена из четырех панелей.

Панели фермы соединены между собой шарнирно. Это позволяет сложить ее компактно при запуске на орбиту. По диагонали каждой ячейки стоит «ломающееся» звено, в котором установлен привод для раскрытия «Рапаны» на орбите. В приводе используется 2-миллиметровая проволока из сплава, обладающего памятью формы (сплав ТН-1). Для развертывания фермы через привод пропускается электрический ток, и вследствие нагрева проволока стремится принять первоначально заданную форму. Эффект памяти формы используется и в приводе чеки, удерживающей ферму в сложенном состоянии (раньше практически все чеки на космических аппаратах использовали пиротехнические приводы). Для прогрева проволоки потребуется минимум электроэнергии «Мира»: всего 1-2 Вт.

Изготовление силового привода из сплава с памятью формы в конструкциях саморазворачивающихся агрегатов дает следующие преимущества: снижение массы из-за отсутствия замков, приводов, механизмов; компактность конструкции при постанов-

ке на борту корабля; сохранение жесткости конструкции при воздействии солнечной радиации.

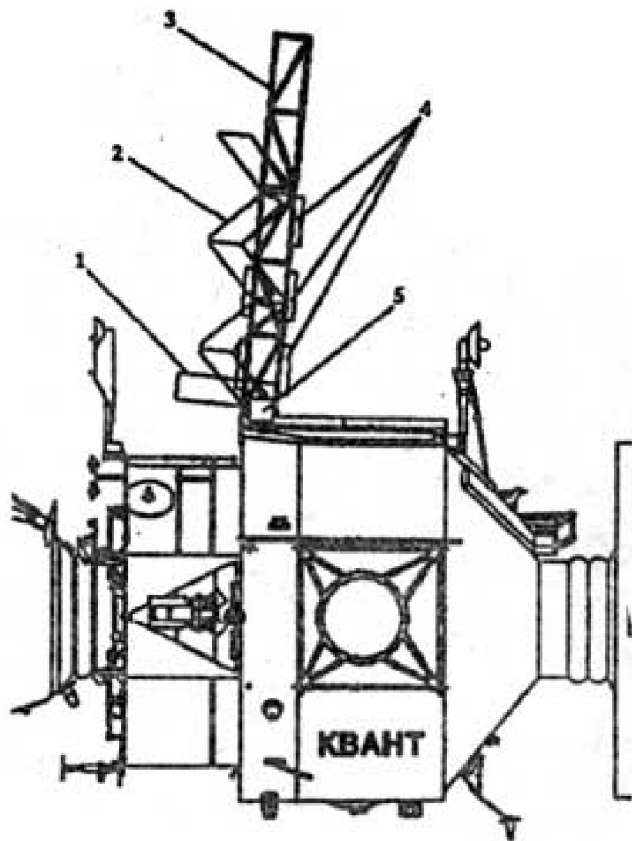


Рис. 1.1. Агрегат «Ферма-2» (эксперимент «Рапана»): 1 — транспортное положение; 2 — промежуточное положение; 3 — рабочее положение; 4 — контейнеры научной аппаратуры; 5 — пульт управления

Сплав на основе никеля успешно используется в постоянных соединениях типа Cryofit для гидравлических и топливных трубопроводов самолетов F-14 ВМС США [4] и Ту-154М Россия. Схема соединения Cryofit в разрезе представлена на рис 1.2.

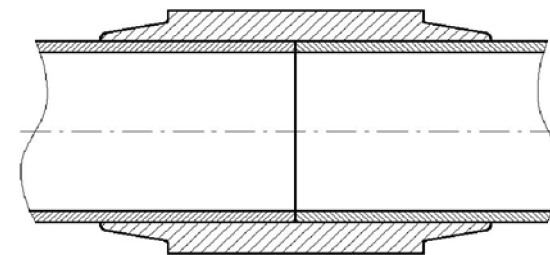


Рис. 1.2. Соединение «Cryofit» в разрезе.

Cryofit- соединение труб полым цилиндром, диаметр которого увеличивается в мартенситном состоянии и уменьшается в процессе нагрева при переходе материала цилиндра в аустенитную фазу. Монтаж этих соединений осуществляют следующим образом. Соединительная муфта- цилиндр из «криогенного» нитинола, имеющего температуру начала мартенситного превращения примерно  $-150^{\circ}\text{C}$ , получают путем механической обработки при комнатной температуре (в аустенитной фазе) таким образом, что её внутренний диаметр на 4 % меньше наружного диаметра соединяемых труб. После охлаждения до температуры жидкого азота муфту раздают, так что её внутренний диаметр становится на 4 % больше, чем наружный диаметр трубопровода. После раздачи муфты хранят в жидком азоте, чтобы сохранить их в мартенситном состоянии. Когда узел трубопровода поступает на сборку, муфту извлекают из жидкого азота при помощи инструмента с высокой тепловой инерцией, который охлаждают до температуры жидкого азота. Концы деталей трубопровода, которые должны быть соединены, вводят внутрь муфты. После удаления установочного инструмента соединение нагревается естественным способом до аустенитного состояния муфты, в результате чего она сжимается, принимая исходную форму и образуя плотное соединение деталей трубопровода.

Основной задачей, стоящей в настоящее время перед авиа-ракетостроением, является существенное снижение металлоемкости и энергоемкости применяемых оборудования и технологического оснащения, значительное уменьшение их габаритных размеров при сохранении существующих технических характеристик. Особенно остро эта проблема стоит в заготовительно-штамповочном производстве, для реализации специальных технологий в условиях с контролируемой атмосферой.

Создание прессового оборудования и технологического оснащения с силовым приводом из сплава с памятью формы во многом решает эту проблему. Специалистами Самарского государственного аэрокосмического университета разработана гамма прессов, технические характеристики которых представлены в табл.1.1 [5].

Таблица 1.1. Технические характеристики прессов с силовым приводом из сплава с памятью формы ТН-1

Номинальное усилие пресса, кН	Ход ползуна, мм		Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Мощность электронагревателя, кВт	Производительность при охлаждении воздухом, ц/кл/мин
	свободный	рабочий				
100	30	6	465	40	0,3...0,4	5...6
			384			
			250			
200	5	5	295	42	0,5...0,6	2...3
			224			
			220			
1000	50	30	1100	800	1,0...1,2	2
			600			
			420			

Примером созданного технологического оснащения с силовым приводом с ЭПФ является пресс-штамп с рабочим усилием 200 кН, который состоит из нижней плиты 1, верхней плиты 2, направляющих колонок 3. На верхней плите 2 установлены гильзы 4, внутри которых помещены возвратные приводы 5, выполненные в виде пружины. Силовые элементы из сплава с памятью формы 6 снабжены электронагревателями 7, установлены внутри направляющих колонок 3 и соединены одним концом с нижней плитой 1, а другим через гильзу 4 с верхней плитой 2. Между верхней плитой 2 и нижней плитой 1 установлен инструмент - пуансон 8 и матрица 9.

Принципиальная схема пресс-штампа усилием 200 кН представлена на рис. 1.3.

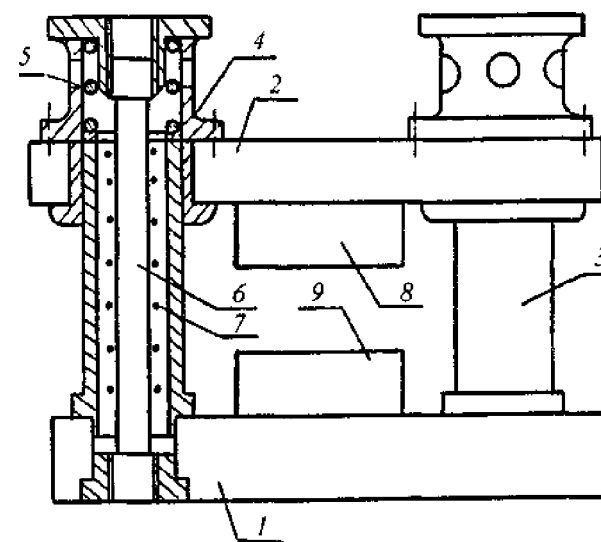


Рис. 1.3. Принципиальная схема пресс-штампа: 1 - нижняя плита; 2 - верхняя плита; 3 - направляющие колонки; 4 - деталь в виде колпачка; 5 - возвратная пружина; 6 - силовой элемент; 7 - электронагреватель; 8 - пуансон; 9 - матрица

Пресс-штамп работает следующим образом.

В зазор между матрицей 9 и пуансоном 8 устанавливается заготовка. Включается нагрев и электронагреватель 7 нагревает силовой элемент с эффектом памяти формы 6 до температуры конца обратного мартенситного превращения. Силовой элемент 6 начинает изменять свою форму (сжиматься), перемещая по направляющим колонкам 3 гильзу 4, верхнюю плиту 2, а вместе с ней и пуансон 8. Происходит деформация заготовки. Затем во внутреннюю полость силового элемента 6 подается охлаждающая среда (например, воздух). Охлаждаясь до температуры конца прямого мартенситного превращения, силовой элемент 6 возвращается в первоначальное состояние (восстанавливает свою длину). Этому способствует растягивающее усилие возвратного привода, передаваемое на силовой элемент. Вновь устанавливается заготовка и цикл повторяется.

Область наиболее эффективного применения разработанного оборудования - выполнение разделительных и формообразующих операций, не требующих больших перемещений деформирующего инструмента. Оборудование несложно применять в автоматических линиях.

Увеличение габаритов, усложнение конструкции космических аппаратов и значительное увеличение сроков эксплуатации все острее ставит задачу проведения на борту или в открытом космосе профилактического ремонта и восстановления жизнеспособности узлов, агрегатов, систем. Организация монтажных, восстановительных работ, проводимых в условиях ограниченного пространства или в открытом космосе, требует разработки для их выполнения ручного специального механизированного инструмента с более широкими технологическими возможностями.

Инструмент, представленный на рис.1.4, предназначен для аварийного перекрытия подачи топлива или рабочей жидкости по трубопроводу с целью отключения неисправного агрегата космического аппарата.

Технические характеристики:

Развиваемое усилие, кН.....	50
Габаритные размеры, мм.....	350x65x40
Масса, кг.....	2,0
Ход губок, мм.....	15
Рабочее напряжение, В.....	27

Механизированные ножницы, представленные на рис.1.5, предназначены для резки элементов силовых конструкций, трубопроводов, тросов, строп, кабелей и создавался для проведения работ по эвакуации станции Салют-9 с орбиты с использованием ВКС «Буран».

Технические характеристики:

Развиваемое усилие, кН.....	300
Габаритные размеры, мм.....	320x60x40
Масса, кг.....	1,5
Перемещение ножей, мм.....	10
Рабочее напряжение, В.....	27

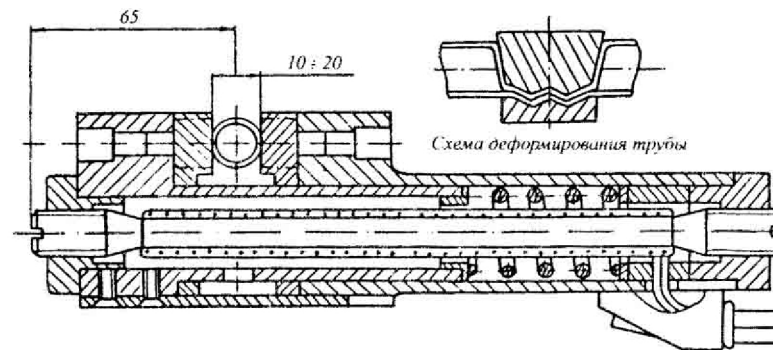


Рис. 1.4 Схема ручного механизированного инструмента для пережатия трубопровода

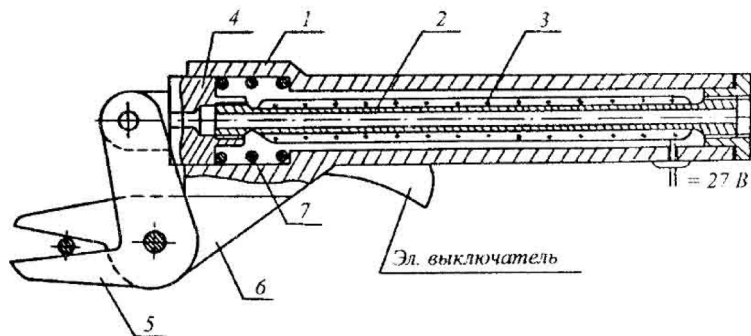


Рис. 1.5. Схема механизированных ножниц: 1-корпус, 2-силовой элемент, 3-нагреватель, 4-ползун, 5-подвижный нож, 6-неподвижный нож, 7-возвратная пружина

Ручной механизированный инструмент имеет типовую конструкцию. Так, например, ножницы состоят из корпуса 1, силового элемента из сплава ТН-1 2, охваченного нагревателем 3 и соединенного одним концом с корпусом 1, другим с ползуном 4. Ползун 4, в свою очередь, соединен с плечом подвижного ножа 5. Неподвижный нож 6 жестко крепится к корпусу 1. Внутри корпуса 1 на ползуне 4 соосно элементу 2 установлена возвратная пружина 7. Ножницы работают следующим образом. Оператор включает электрический выключатель, на нагреватель 3 подается электрический ток напряжением 27 В.

При достижении температуры начала деформации силового элемента 2 начинает изменять свою форму - сжиматься, при этом перемещая ползун 4 по направляющим, выполненным внутри корпуса 1, одновременно сжимает пружину 7. Ползун 4, соединенный с плечом подвижного ножа 5, перемещает режущую кромку последнего по направлению к режущей кромке неподвижного ножа 6. Происходит процесс резки. Деформация элемента 2 заканчивается при температуре от 393 до 473 К в зависимости от усилия резки. Нагрев отключается и одновременно во внутреннюю полость элемента 2 подается охлаждающая среда давлением

0,05...0,1 МПа. В интервале температур от 353 до 303 К элемент 2 возвращается в первоначальное положение, одновременно возвращая в первоначальное положение подвижный нож 5. Полный возврат элемента 2 в первоначальное положение обеспечивает пружина 7.

Качество трубопроводов аэрокосмической техники определяется точностью подготовки стыков перед сваркой и технологическими приемами по снижению уровня остаточных напряжений в зонах сварных швов.

Эта проблема решается путем разработки технологических процессов прецизионной стыковки в среде защитных газов. Эти процессы эффективно реализуются с помощью механизированных центрирующих приспособлений многоразового использования, содержащих силовой привод из сплава с памятью формы в виде кольца [6].

Схема механизированного инструмента, центриатора представлена на рис. 1.6.

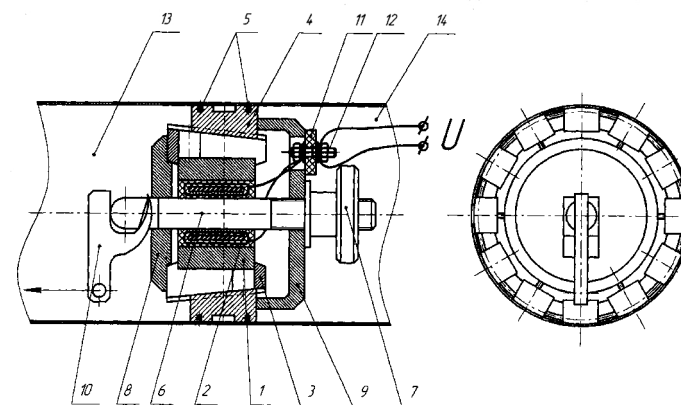


Рис. 1.6. Схема центриатора с силовым приводом из сплава с памятью формы: 1-силовой элемент, 2-нагревательный элемент, 3-возвратный привод, 4-сухарик, 5-разрезное кольцо, 6-оправка, 7-гайка, 8,9-шайба, 10-стопор, 11-колодка, 12-клеммы, 13,14-стыкуемые элементы трубопровода

Центратор состоит из силового элемента 1 с эффектом памяти формы, имеющего форму кольца, на внутренней поверхности которого расположен электрический нагревательный элемент 2. Для обеспечения многократного применения устройства на наружной поверхности силового элемента 1 расположен силовой возвратный привод 3 в виде цанги. В свою очередь, на наружной поверхности возвратного привода 3, в наклонных к его оси пазах располагаются сухарики 4. Они прижимаются разрезными кольцами 5. Концентрично силовому элементу 1 установлена оправка 6, имеющая гайку 7. На оправке 6 установлены шайбы 8 и 9, контактирующие с возвратным приводом 3 и сухариками 4. От выпадения шайб 8 и 9 предохраняет и фиксирует стопор 10, расположенный в пазах оправки 6. На шайбе 9 закреплена колодка 11 с клеммами 12, которые служат для подключения электроэнергии к нагревательному элементу 2. Центратор имеет возможность менять свой наружный диаметр при навинчивании на оправку 6 гайки 7. Это происходит от того, что шайбы 9 и 10 могут сдвигаться друг к другу, перемещая сухарики 4 относительно возвратного привода 3 по его наклонным пазам.

Внедрение в производство процессов прецизионной стыковки в среде защитных газов на базе эффекта памяти формы позволяет существенно повысить качество деталей трубопроводных систем аэрокосмической техники, сократить трудовые и материальные затраты, повысить эффективность производства.

В результате НИОКР, проводимых в СГАУ, накоплен опыт создания компактных эффективных устройств, который распространяется на другие области, в частности на область эксплуатации автомобильной техники.

Этот опыт был использован при создании серии механизированного технологического оснащения, предназначенного для проведения технического обслуживания различных моделей автомобилей ВАЗ. Это ряд съёмников для демонтажа деталей и уз-

лов, соединяемых запрессовкой по коническим поверхностям (шарниры рулевых тяг, шаровые опоры, сошки рулевого механизма и маятникового рычага и т. п.). Работы по демонтажу подобных деталей и узлов трудоёмки, проводятся в условиях ограниченного пространства, в неудобном для исполнителя положении. Механизация данных операций позволит снизить трудоёмкость технического обслуживания и повысить культуру производства и качество выполняемых работ. Предлагаемый механизированный инструмент отличается экологической чистотой, малой массой и габаритами, низким энергопотреблением, безопасностью, простотой использования.

В качестве примера на рисунке 1.7 приведена схема механизированного съёмника для демонтажа шарниров рулевых тяг.

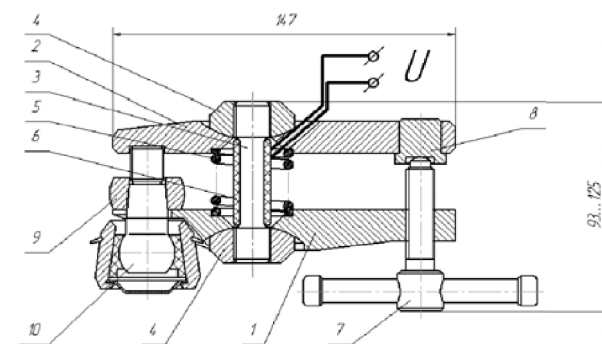


Рис. 1.7. Схема механизированного съёмника для демонтажа шарниров рулевых тяг: 1-корпус, 2-нажимная планка, 3-силовой элемент с эффектом памяти формы, 4-опора, 5-пружина, 6-электронагреватель, 7-нажимной винт, 8-гайка, 9-рулевая сошка, 10-сферический шарнир

Он состоит из корпуса 1 и нажимной планки 2. Съёмник имеет силовой элемент 3, выполненный из сплава ТН-1 и подвергшийся термосиловой обработке. Силовой элемент 3 соединен с корпусом 1 и нажимной планкой 2 через сферические опоры 4, сопрягаемые по соответствующим поверхностям на корпусе и на-

жимной планке. В качестве возвратного привода, необходимого для многократного использования инструмента, используется пружина сжатия 5, установленная соосно силовому элементу и контактирующая с корпусом 1 и нажимной планкой 2. На поверхности рабочей части силового элемента расположен электронагреватель 6, имеющий электрический кабель с разъёмом, предназначенный для подведения тепловой энергии к силовому элементу. Съёмник содержит нажимной винт 7, расположенный в резьбовом отверстии корпуса 1 и контактирующий с нажимной планкой 2 через пята 8, запрессованную в отверстие данной планки.

Устройство работает следующим образом. Съёмник устанавливается на автомобиль таким образом, что корпус 1 своим рабочим концом контактирует с рулевой сошкой 9, а нажимная планка своим гнездом контактирует со сферическим шарниром 10. Зазор между инструментом и демонтируемыми деталями устраняют, вращая нажимной винт 7. Далее на электронагреватель 6 подают напряжение, происходит нагрев материала силового элемента 3 до температуры обратного мартенситного превращения  $A^k$ . Данный материал восстанавливает форму, которая была ему придана при температуре  $T_0 > M^n$ , т. е. сокращает свою длину, генерируя при этом значительное усилие, которое передается через корпус 1 и нажимную планку 2 на рулевую сошку 9 и сферический шарнир 10. Происходит выпрессовка шарнира из сошки. Затем снимают напряжение с электронагревателя 6, отворачивается нажимной винт 7 и удаляется съёмник с автомобиля. Под влиянием естественного теплообмена материал силового элемента остывает ниже температуры прямого мартенситного превращения  $M^n$  и силовой элемент с помощью упругой энергии силового привода, накопленной при рабочем цикле, принимает первоначальную длину. Инструмент вновь готов к совершению очередного рабочего цикла.

Механизированный съёмник для демонтажа шарниров рулевых тяг имеет следующие технические характеристики:

• длина, мм	147
• ширина, мм	35
• высота, не более, мм	125
• масса, г	600
• рабочее усилие, не менее, кН	30
• рабочее перемещение, не менее, мм	2
• потребляемая мощность, Вт	70
• время рабочего цикла, не более, сек	20

Съёмники для демонтажа остальных деталей и узлов, соединяемых запрессовкой по коническим поверхностям, имеют аналогичную конструкцию и принцип действия. Для максимального повышения производительности целесообразно использовать комплект данных съёмников для демонтажа всех соединений одновременно.

Для успешного практического применения эффекта памяти формы в технике необходима инженерная методика проектирования силового привода с нужными параметрами. Для создания данной методики применена математическая модель, отражающая процесс функционирования силового привода с эффектом памяти формы под воздействием эксплуатационных нагрузок с учетом физических явлений, протекающих при переходе материала с памятью формы из низкотемпературной фазы в высокотемпературную. Указанная математическая модель создана путем совместного решения задачи термоупругого деформирования силового элемента с эффектом памяти формы, при учете характера его внешней нагрузки. В разработанной математической модели используются численные значения физико-механических характеристик материалов с эффектом памяти формы, полученные в результате экспериментальных исследований. Инженерная методика проек-

тирования силового привода и другие вопросы подробно рассмотрены в последующих главах настоящего пособия.

## 1.2 Физические основы термоупругого мартенситного превращения и физико-механические свойства материалов с эффектом памяти формы

Эффект памяти формы представляет собой необычный пример обратимой пластичности кристаллов. Данный эффект наиболее ярко проявляется в материалах, испытывающих термоупругое мартенситное превращение, и наблюдается он при температурах, допускающих одновременное существование мартенситной и аустенитной фаз.

Феномен эффекта памяти формы заключается в следующем. Материал в виде какого-либо полуфабриката (пруток, лента, проволока и т.п.), обладающий эффектом памяти формы, пластически деформируют при температуре  $T^D$  выше температуры прямого мартенситного превращения  $M^H$  с целью придания ему определенной формы, затем охлаждают до температур, обеспечивающих протекание мартенситного превращения, и деформируют в этой температурной области до получения иной формы. При нагреве выше температуры обратного мартенситного превращения  $A^K$  образец вновь восстанавливает форму, которая была ему придана при температуре  $T^D > M^H$ . Схематически этот эффект показан на рисунке 1.8 [7].

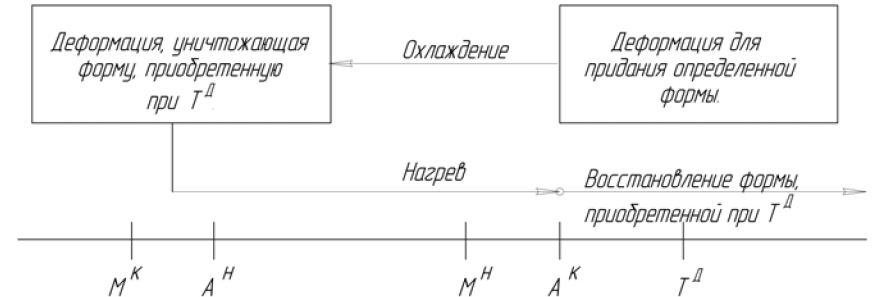


Рис. 1.8 Схематическая интерпретация эффекта памяти формы

Одна из основных закономерностей проявления эффекта памяти заключается в том, что на границе раздела фаз должна сохраниться структурная связь (когерентность) кристаллических решеток обеих фаз [1]. Существование этой связи приводит к возникновению упругой энергии, величина которой зависит от соотношения межатомных расстояний в исходной и мартенситной фазах, размера мартенситного кристалла, величины упругих констант и способа перестройки кристаллической решетки. В процессе охлаждения мартенситный кристалл приобретает определенные размеры. Дальнейшее охлаждение стабилизирует рост кристалла, и устанавливается термоупругое неустойчивое равновесие между кристаллом мартенсита и исходной фазой. Исчезновение же мартенситного кристалла при нагреве происходит с небольшим температурным гистерезисом.

Кристаллы мартенсита, образующиеся в процессе охлаждения сплава до температуры ниже  $M^H$ , ориентированы в соответствии с кристаллографической взаимосвязью: первые кристаллы мартенсита влияют на ориентировку кристаллов, возникающих при последующем охлаждении, а изменение ориентировки первых кристаллов изменяет всю картину рельефа при последующем охлаждении [8].

Для сплавов с термоупругим мартенситным превращением характерна зависимость фазового состава от температуры, представленная на рисунке 1.9.

При охлаждении материала из аустенитного состояния мартенсит начинает образовываться с некоторой температуры  $M^H$ . При дальнейшем охлаждении количество мартенситной фазы увеличивается, и полное превращение аустенита в мартенсит заканчивается при некоторой температуре  $M^K$ . Ниже этой температуры термодинамически устойчивой остается только мартенситная фаза. При нагреве превращение мартенсита в аустенит начинается с некоторой температуры  $A^H$  и полностью заканчивается при температуре  $A^K$ . При полном термоциклировании получается гистерезисная петля. Ширина гистерезисной петли по температурной шкале  $A^K-M^H$  или  $A^H-M^K$  может быть различной для разных материалов: широкой или узкой (рис. 1.9, а и б). При наличии механических напряжений температуры  $M^H$ ,  $M^K$ ,  $A^H$  и  $A^K$  могут смещаться в сторону более высоких температур, и в этом случае их обозначают как  $M_\sigma^H$ ,  $M_\sigma^K$ ,  $A_\sigma^H$  и  $A_\sigma^K$ .

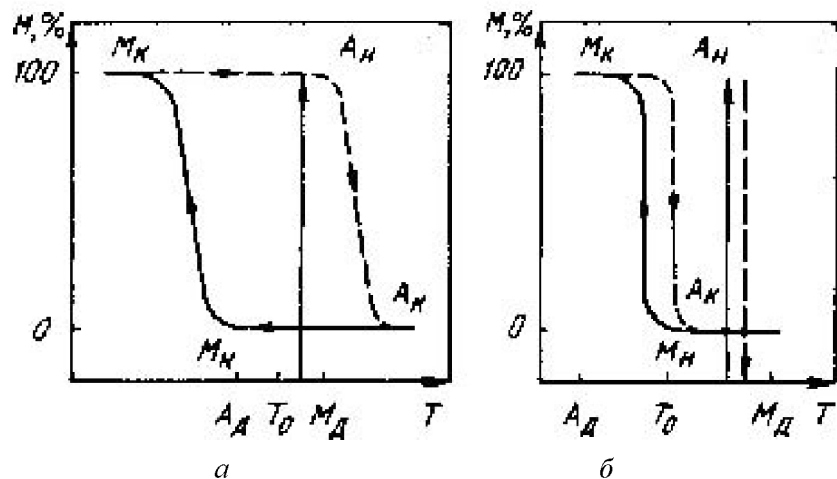


Рис. 1.9. Зависимость фазового состава сплава от температуры: а) широкий гистерезис; б) узкий гистерезис

Важно отметить, что при термоупругом мартенситном превращении (в отличие от обычных мартенситных превращений, например в сталях) межфазные границы между аустенитом и мартенситом сохраняют когерентность и являются легкоподвижными. При охлаждении (прямое превращение) в интервале температур ( $M^H - M^K$ ) зарождаются и растут кристаллы мартенсита, а при нагреве (обратное превращение) в интервале температур ( $A^H - A^K$ ) кристаллы мартенсита исчезают (превращаются в аустенит) в обратной последовательности

Для изотропного материала при отсутствии внешних напряжений мартенситные пластины, образующиеся при прямом превращении, не имеют преимущественной ориентировки и локальные сдвиговые деформации в среднем по объему компенсируются. В процессе обратного превращения перестройка решетки в исходную протекает строго в обратной последовательности. При этом не наблюдается макроскопического изменения формы материала, за исключением небольшого изменения объема (например, для сплава на основе TiNi изменение объема составляет около 0,34 %, что на порядок меньше, чем для сталей (4 %).

В случае наличия в материале ориентированных напряжений (например, действие внешней нагрузки) мартенситные пластины приобретают преимущественную ориентировку и локальные сдвиговые деформации приводят к макроскопическому изменению формы образца (принцип Ле Шателье-Брауна). В процессе обратного превращения перестройка решетки происходит по принципу «точно назад», при этом локальные сдвиговые деформации исчезают и, следовательно, устраняется макроскопическое изменение формы. Внешнее проявление такого поведения материала интерпретируется как эффект памяти формы.

Для полного восстановления формы необходимо, чтобы мартенситное превращение являлось кристаллографически обра-

тимым. Кристаллографическая обратимость превращения предполагает не только восстановление кристаллической структуры, зависящей от обратного превращения, но и восстановление кристаллографической ориентировки исходной фазы перед превращением. Кроме того, необходимо, чтобы деформация осуществлялась без участия скольжения, так как скольжение является необратимым процессом, и при нагреве деформация не устраняется.

Мартенситное превращение может инициироваться не только изменением температуры, но и порождаться механическими усилиями. В соответствии со сказанным, различают термомартенсит и механомартенсит, и при анализе фазовых диаграмм (рис. 1.9) вводят обычно еще три характеристических температуры:  $T_0$ ,  $M_d$ ,  $A_d$ , где  $T_0$  — температура термодинамического равновесия;  $M_d$  — температура, ниже которой мартенсит может возникнуть не только вследствие понижения температуры, но и под действием механического напряжения;  $A_d$  — температура, выше которой аустенит может появиться не только вследствие нагревания, но и под действием механических напряжений [9].

Расположение этих температур относительно петли гистерезиса оказывает влияние на поведение материала при термосиловом воздействии. В случае узкого гистерезиса (рис. 1.9 б) температура  $M_d$  может оказаться правее температуры конца аустенитного превращения  $A^K$ , а при широком гистерезисе — левее этой температуры (рис. 1.9 а).

В сплавах с узким гистерезисом наведенный механомартенсит, т. е. мартенсит, образованный под действием внешней нагрузки при температуре ниже  $M_d$  (но выше  $A^K$ ), будет термодинамически неустойчивым и при разгрузке он должен исчезнуть. На рис. 1.9 превращения аустенит—мартенсит условно обозначены вертикальными стрелками. В таких материалах наблюдается так называемый *эффект псевдоупругости*, очевидно связанный с этими явлениями.

При широком гистерезисе наведенный механомартенсит будет термодинамически устойчивым и сохраняется при разгрузке. Деформации в этом случае исчезнут только после нагрева, т. е. после завершения реакции мартенсит → аустенит.

Наиболее ярко эффект памяти формы выражен в никелиде титана или нитиноле. Данный сплав нашел самое широкое применение в машиностроении из-за своих физико-механических свойств, обеспечивающих его удачное применение на практике. Никелид титана – сплав эквиатомного состава с 55 мас. % Ni, имеет температуру плавления 1240-1310 °С, плотность 6,45 г/см<sup>3</sup>. Этот сплав, как и другие, обладающие эффектом памяти формы, характеризуется значительными изменениями физико-механических свойств в зависимости от температуры и, следовательно, соотношением фаз кристаллической решетки. Это проиллюстрировано ниже.

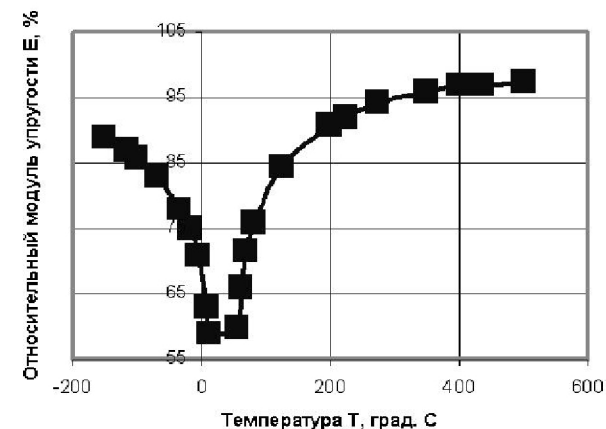


Рис. 1.10. Температурная зависимость относительного модуля упругости никелида титана

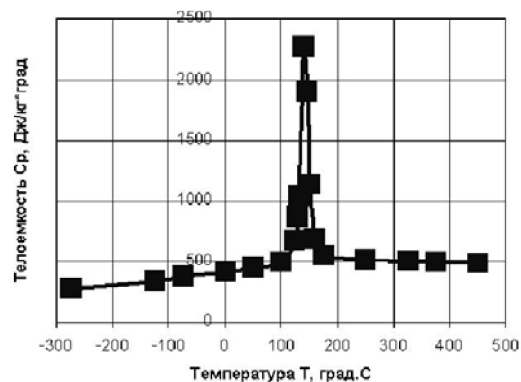


Рис. 1.11. Температурная зависимость теплоемкости никелида титана

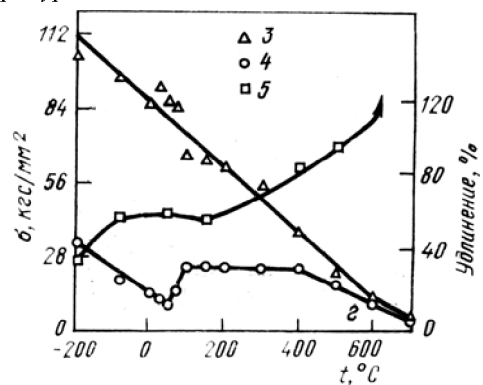


Рис. 1.12. Механические свойства сплава ТН-1: 3 – напряжение разрушения; 4 – предел текучести; 5 – удлинение

Установлено, что NiTi имеет различные значения коэффициента Пуассона для низкотемпературной и высокотемпературной фаз. Так, при температуре ниже  $M^K$  (рис. 1.10) коэффициент Пуассона имеет значение 0.33, а при температуре выше  $A^K$  (рис. 1.10) данный коэффициент составляет 0.485 [5].

В работе [10] изложены результаты исследований теплоемкости калориметрическим методом. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 1.11. При температуре 90°С отмечался пик теплоемкости, связанный с фазовым превращением.

На рис. 1.12 представлена температурная зависимость свойств NiTi при растяжении по данным работы [11]. Как видно из рисунка, при повышении испытаний предел прочности снижается, а пластичность возрастает. При температуре 75°С никелид титана имеет минимум предела текучести, обусловленный фазовым превращением.

Феноменологию эффекта памяти формы более наглядно можно проиллюстрировать следующим образом. Образец деформируют (например, растяжением) при температуре ниже  $M_d$  (рис. 1.13, а). При достижении напряжения  $\sigma_n$  образец деформируется пластически (участок АВ), и эту деформацию называют *фазовой* или деформацией *наведения* ( $\epsilon_n$ ), так как она вызвана фазовыми превращениями «аустенит—мартенсит», или «мартенсит—мартенсит», или их комбинациями. В некоторых случаях фазовая пластическая деформация может протекать в несколько стадий, что определяется многостадийностью фазовых превращений (например, в Cu—Al—Ni).

После разгрузки (участок ВС) деформация наведения ( $\epsilon_n$ ) сохраняется в образце. При нагреве образца в результате протекания обратного мартенситного превращения в интервале температур ( $A_n—A_r$ ) деформация наведения в какой-то степени восстанавливается (участок СД). Это, собственно, и есть *эффект памяти формы*.

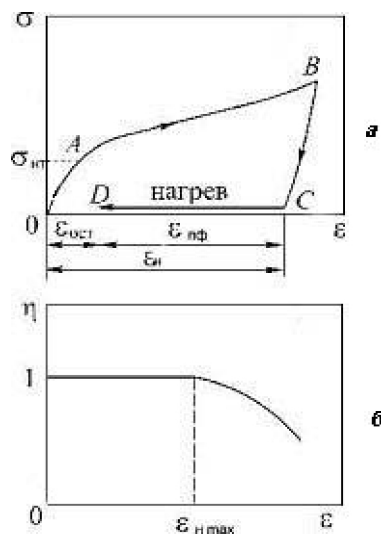


Рис. 1.13. Схема реализации ЭПФ (а) и зависимость степени восстановления формы от предварительной деформации (б)

В случае, когда восстановленная деформация  $\varepsilon_{пф}$  в образце сохраняется некоторая остаточная деформация  $\varepsilon_{ост}$ , накапливаемая в результате инициализации необратимых каналов пластичности, например, дислокационных.

Зависимость степени восстановления деформации  $\eta$  представлена на рис. 1.13, б. Максимальная деформация наведения  $\varepsilon_{н max}$ , которая восстанавливается полностью при реализации эффекта памяти формы, зависит от материала и его термомеханической обработки (например, для сплавов на основе TiNi  $\varepsilon_{н max} = 6-12\%$ , для сплавов Cu-Al-Mn  $\varepsilon_{н max} = 4-10\%$ ).

Наиболее эффективным способом деформирования является деформирование в режиме эффекта пластичности превращения, когда наиболее полно реализуются деформационные возможности фазовых превращений.

Из вышеизложенного: деформация силового элемента, зафиксированная в процессе его нагрева до температуры начала обратного мартенситного превращения, является деформацией памяти формы  $\varepsilon_{пф}$ . Деформация памяти формы всегда меньше деформации наведения и между ними в работе [5] установлена взаимосвязь. Указанная взаимосвязь для сплава ТН-1 отражена в зависимостях, представленных на рис. 1.14.

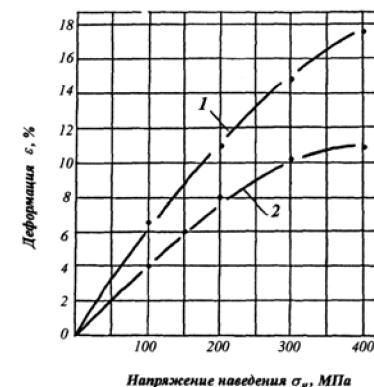


Рис. 1.14. Зависимость деформации памяти формы  $\varepsilon_{пф}$  и полной деформации  $\varepsilon$  силового элемента при термоциклировании от напряжения наведения  $\sigma_n$ : 1 – деформация памяти формы; 2 – полная деформация  $\varepsilon$

Характерная особенность реактивного напряжения заключается в многократной воспроизводимости гистерезисной зависимости напряжения от температуры при повторяющихся нагревах и охлаждениях. Термомеханический гистерезис не обязательно бывает замкнутым, особенно в первых циклах, но после некоторого числа термоциклов гистерезисная петля стабилизируется (закрывается). Это весьма важно для практического использования материалов с эффектом памяти формы в устройствах многократного применения.

У многих материалов в процессе термоциклирования в ненагруженном состоянии через интервалы прямого и обратного мартенситных превращений при охлаждении деформация накапливается (1), а при нагреве (2) восстанавливается (рис. 1.15).

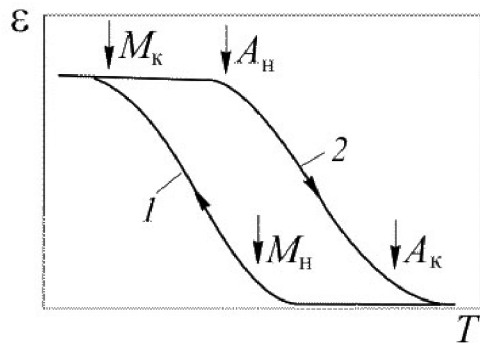


Рис. 1.15. Накопление (1) деформации при охлаждении и ее восстановление (2) при нагреве в сплаве с ЭПФ в ненагруженном состоянии после предварительного термоциклирования под нагрузкой через интервал  $M^K-A^K$

Это свойство называют *обратимой (двусторонней) памятью формы*, которая имеет способность не исчезать практически после любого числа термоциклов. Данный эффект может быть инициирован только за счет деформационного воздействия на металл: во-первых, активным пластическим деформированием мартенсита или аустенита в изотермических условиях; во-вторых, термоциклированием материала под нагрузкой через интервал фазовых превращений [12].

Эффект обратимой памяти формы резко расширяет возможности применения сплавов с данным эффектом в устройствах многократного циклического действия.

Технологией, которая определяет основные параметры силовых элементов из сплава с эффектом памяти формы, является термоциклирование. Термоциклирование представляет собой механическое циклическое воздействие на силовой элемент, которое вызывает определенные напряжения и деформации (напряжения и деформации наведения) в заданном интервале температур. Термоциклирование силового элемента из материала с памятью формы проводится следующим образом. Силовой элемент нагревает-

ся до температуры конца обратного мартенситного превращения. К нему после нагрева прикладывается растягивающее усилие, которое создает в силовом элементе растягивающее напряжение (напряжение наведения  $\sigma_n$ ), соответствующее пределу текучести материала в температурном интервале фазового перехода. Далее силовой элемент охлаждается. При достижении им температуры начала прямого мартенситного превращения его материал начинается интенсивное удлинение образца, которое заканчивается при температуре конца прямого мартенситного превращения. Остаточная деформация в силовом элементе является деформацией наведения  $\epsilon_n$  [5].

К силовому элементу прикладывается растягивающее усилие, которое создавало в его сечениях растягивающее напряжение (напряжение сопротивления  $\sigma_c$ ). Силовой элемент нагревается, при достижении температуры начала обратного мартенситного превращения силовой элемент начинает сокращать свою длину. Данное сокращение длины прекращается при температуре конца прямого мартенситного превращения.

Описанный цикл повторяется вновь. С увеличением числа циклов величина  $\epsilon_{пф}$  возрастает до определенного предела, а затем стабилизируется. Деформация наведения несколько уменьшается, а общая длина образца увеличивается. В результате термоциклирования наблюдается стабилизация величин деформации памяти формы  $\epsilon_{пф}$ , деформации наведения  $\epsilon_n$  и полной деформации. Достижение стабилизации объясняется деформационным упрочнением микроструктуры, обусловленным превращением до такой степени, когда материал оказывает сопротивление дальнейшей деформации, а также накоплением максимально возможного объема переориентированных кристаллов мартенсита в данных условиях. Кроме того, термоциклирование способствует расширению температурного интервала превращений и стабилизирует низкотемпературную фазу [12].

Одной из особенностей деформационно-силового поведения материалов с эффектом памяти формы является эффект генерации значительных напряжений памяти формы. У сплавов на основе TiNi  $\sigma_{\text{пф max}}$  могут достигать 600–800 МПа, а в композиции Ti—Ni—Hf — даже 1300 МПа. Это позволяет создавать компактные устройства со значительными силовыми возможностями, что делает предпочтительным их применение в конструкции космических аппаратов и при реализации технологических процессов на борту орбитальных станций и в открытом космосе.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

### *2.1 Постановка математической модели функционирования цилиндрического силового элемента с эффектом памяти формы*

Работа силового элемента многократного использования на основе термоупругого мартенситного превращения должна быть организована таким образом, чтобы процесс совершения работы против внешних сил проходил при его нагреве (обратном мартенситном превращении), а при его охлаждении на силовой элемент должны действовать сжимающие напряжения, ориентирующие в нужном направлении мартенситные домены и подготавливающие силовой элемент для работы в следующем рабочем цикле.

Однако для стабильной многоцикловой работы необходимо также, чтобы силовой элемент, выполненный, например, в виде цилиндра, каждый раз после нагрева и совершения различной работы имел одну и ту же длину, количество, размеры и ориентировку мартенситных доменов после охлаждения и возвращения в исходное состояние. Реализация такого многократно повторяющегося исходного положения силового элемента возможна за счет использования специального возвратно-поступательного механизма (например, пружины), действующего на силовой элемент [5].

Таким образом, принцип многоцикловой стабильной работы силового элемента на основе материала с эффектом памяти формы заключается в следующем.

Специально подготовленный термосиловой тренировкой силовой элемент, например в виде цилиндра, соединен с предварительно растянутой или сжатой пружиной. При нагревании си-

лового элемента происходит уменьшение величины мартенситных доменов и элемент уменьшает свои размеры. При этом из-за ограничения возможности деформироваться он начинает генерировать механические напряжения: сначала по совершению работы деформации пружины и самого себя, а затем - после выбора холодового хода - и против других внешних сил.

После совершения положительной работы силовой элемент продолжает деформироваться, совершая работу против сил упругости пружины. Затем силовой элемент охлаждается и в диапазоне температур прямого мартенситного превращения в нем возникают и разрастаются мартенситные домены, формирующиеся под действием внешних сил со стороны деформированной пружины. После завершения обратного мартенситного превращения силовой элемент готов к совершению следующего рабочего цикла. Причем в данной конструкции силовой элемент работает в условиях термоупругого мартенситного превращения, имея при прямом мартенситном превращении одинаковые условия во всех циклах для роста мартенситной фазы. Кроме того, при обратном мартенситном превращении начальное и конечное состояние элемента как термодинамической системы также одинаково, т.е. силовой элемент стабильно повторяет свое исходное и конечное состояние при циклической работе даже при действии в период обратного мартенситного превращения различных по величине внешних сил.

Для увеличения общего усилия, развиваемого силовым элементом заданных геометрических размеров, необходима его специальная подготовка с целью создания максимального количества мартенситных доменов определенной пространственной ориентации. Дальнейшее повышение общих усилий, развиваемых цилиндрическим силовым элементом, связано с увеличением его площади в направлении, перпендикулярном направлению генерируемых напряжений. Однако возникающий при этом градиент

температуры по сечению стержня приводит к возникновению напряжений, интенсивность которых может превысить предел текучести материала и нарушить сформулированные условия стабильной многоциклового работы силового элемента. Уменьшение градиента температуры по сечению стержня возможно за счет использования полого цилиндрического элемента и за счет уменьшения плотности теплового потока, однако это приводит к уменьшению быстродействия силового элемента.

Для создания устройств многоразового использования и реализации повторяемых технологических процессов на основе эффекта памяти формы необходимы знания численных значений параметров силовых элементов из сплава с эффектом памяти формы, которыми характеризуется данный эффект, и технологии управления этими параметрами. Также необходимо исследование напряженно-деформированного состояния и распределение поля температур по сечению разрабатываемого силового элемента.

В пособии изложены результаты теоретического исследования распределения напряжений и температур в силовом элементе, возникающих при протекании в его объеме термоупругого мартенситного фазового превращения.

При моделировании процесса функционирования силового элемента он рассматривается в форме полого цилиндра радиуса  $R_1$  – для внутренней поверхности и  $R_2$  – для наружной поверхности и ширины  $L < R_2$ . Элемент нагружен внешним усилием  $P$  и нагревается (или охлаждается) через боковую поверхность. В процессе нагрева в объеме материала начинается обратный термоупругий мартенситный переход, приводящий к возникновению в объеме материала неоднородной структурной  $\delta$  и температурной  $\varepsilon_t$  деформаций. В силу осевой симметрии в этой области макродеформация, макронапряжения, температурное поле и параметры материала являются функциями только координаты  $r$ , направленной вдоль радиуса цилиндра и времени  $t$  [13]. Известно [14], что при

термоупругом мартенситном превращении сохраняется когерентность границы образующихся фаз, а это позволяет проводить расчет напряжений в рамках теории упругости. Учитывались зависимости параметров материала от температуры.

Математическая модель поставленной задачи в цилиндрической системе координат будет состоять из уравнений равновесия

$$r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0; \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0, \quad (2.1)$$

уравнений совместности деформаций

$$r \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} + \varepsilon_\theta - \varepsilon_r = 0; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

и соотношений Коши

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{U}{r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}, \quad (2.4)$$

где  $U$  и  $W$  – радиальная и осевая компоненты вектора перемещений;

$\varepsilon_r$  – радиальная компонента тензора деформаций;

$\varepsilon_\theta$  – тангенциальная компонента тензора деформаций;

$\varepsilon_z$  – осевая компонента тензора деформаций;

$\sigma_r$  – радиальная компонента тензора напряжений;

$\sigma_\theta$  – тангенциальная компонента тензора напряжений;

$\sigma_z$  – осевая компонента тензора напряжений.

Компоненты тензора деформаций и тензора напряжений связаны между собой обобщенным законом Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)) + \beta_1; \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \mu(\sigma_z + \sigma_r)) + \beta_1; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)) + \beta_2, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где  $E=E(T(r,t))$  – модуль Юнга;

$\mu=\mu(T(r,t))$  – коэффициент Пуассона;

$\beta_1=\beta_1(T(r,t))$  и  $\beta_2=\beta_2(T(r,t))$  – диагональные компоненты ортотропного тензора структурной температурной деформации.

Система уравнений (2.1) – (2.5) должна быть дополнена граничными условиями:

на внешней поверхности силового элемента

$$\sigma_r=0 \text{ при } r=R_2; \quad (2.6)$$

на внутренней поверхности силового элемента

$$\sigma_r=0 \text{ при } r=R_1. \quad (2.7)$$

Исходя из того, что на торцах кольца используем граничное условие в смысле Сен-Венана,

$$\int_S \sigma_z ds = p. \quad (2.8)$$

Для расчета перемещений, напряжений и деформаций краевая задача термоупругости (2.1)– (2.8) должна быть дополнена краевой задачей теплопроводности, состоящей из уравнения теплопроводности [15]:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2.9)$$

Граничные условия можно записать: для внешней поверхности при  $\rho=R_2$

$$-\lambda \frac{\partial T(R_2, t)}{\partial r} + q = 0;$$

(2.10)

для внутренней поверхности при  $\rho = R_1$

$$-\lambda \frac{\partial T(R_1, t)}{\partial r} = 0.$$

(2.11)

При этом в начальный момент времени температура по сечению силового элемента постоянна и равна  $T_0$ :

$$T(r, 0) = T_0 = const.$$

(2.12)

## 2.2 Краевая задача термоупругости для цилиндрического силового элемента с эффектом памяти формы

При решении поставленной задачи применялся метод решения краевой задачи термоупругости (2.1) – (2.8) для силового элемента в форме полого цилиндра с физико-механическими свойствами его материала  $E$ ,  $\mu$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , зависящими от температуры, путем синтеза интегродифференциального уравнения с последующим его решением. Для этого использовался метод разбиения области интегрирования на конечные участки с применением определенных аппроксимаций функций параметров функционирования силового элемента и функций его физико – механических свойств [5].

В результате теоретических исследований получено решение интегродифференциального уравнения в виде

$$u(r) = \frac{c}{r} \int_{R_1}^r \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)E} r dr - \frac{\varepsilon_0}{r} \int_{R_1}^r \frac{\mu r}{1-\mu} dr + \frac{1}{r} \int_{R_1}^r \frac{\beta_1 + \mu\beta_2}{1-\mu} r dr + \frac{R_1 u(R_1)}{r}, \quad \text{где } R_1 \leq r \leq R_2. \quad (2.13)$$

Так же получены аналитические зависимости радиальной  $\varepsilon_r$  и тангенциальной  $\varepsilon_\theta$  компонент тензора деформации с использованием соотношения Коши:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} = c \left( \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)E} - \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)E} r dr \right) - \varepsilon_0 \left( \frac{\mu}{1-\mu} - \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{\mu r}{1-\mu} dr \right) + \left( \frac{\beta_1 + \mu\beta_2}{1-\mu} - \frac{1}{r^2} \int_{R_2}^r \frac{\beta_1 + \mu\beta_2}{1-\mu} r dr \right) - \frac{R_1 u(R_1)}{r^2}; \quad (2.14)$$

$$- \varepsilon_0 \left( \frac{\mu}{1-\mu} - \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{\mu r}{1-\mu} dr \right) + \left( \frac{\beta_1 + \mu\beta_2}{1-\mu} - \frac{1}{r^2} \int_{R_2}^r \frac{\beta_1 + \mu\beta_2}{1-\mu} r dr \right) - \frac{R_1 u(R_1)}{r^2};$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} = \frac{c}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)E} r dr - \frac{\varepsilon_0}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{\mu r}{1-\mu} dr + \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{\beta_1 + \mu\beta_2}{1-\mu} r dr + \frac{R_1 u(R_1)}{r^2}.$$

(2.15)

Аналогично получаем компоненты тензора напряжений

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ :

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\mu} \left( c \left( \frac{1+\mu}{E} - \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)E} r dr \right) + \varepsilon_0 \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{\mu}{1-\mu} r dr - \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \frac{(\beta_1 + \mu\beta_2)r}{1-\mu} dr - \frac{R_1 u(R_1)}{r^2} \right);$$

(2.16)

$$\sigma_z = c \frac{\mu}{1-\mu} + \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_0 - \beta_2 - \mu\beta_1);$$

(2.17)

$$\sigma_\theta = c \frac{1+\mu}{1-\mu} + \varepsilon_0 \frac{E}{1-\mu^2} - (\beta_1 + \beta_2) \frac{E}{1-\mu} - \sigma_z - \sigma_r. \quad (2.18)$$

Постоянные  $u(R_1)$ ,  $c$  и  $\varepsilon_0$  определяем из граничных условий (2.6)-(2.8). Подставляя (2.16) в (2.6) и (2.7), а (2.17) в (2.8), получа-

ем линейную систему алгебраических уравнений относительно неизвестных констант:

$$\begin{aligned}
 a_{11}c + a_{12}\varepsilon_0 - R_1u(R_1) &= f_1; \\
 a_{12}c + a_{22} &= f_2; \\
 a_{31}R_1c - u(R_1) &= 0, \\
 a_{11} &= \frac{1 + \mu(R_2)}{E(R_2)}R_2^2 - \int_{R_1}^{R_2} \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)E} r dr; \\
 a_{12} &= \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu}{1 - \mu} r dr; \quad a_{22} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{E}{1 - \mu^2} r dr; \quad a_{31} = \frac{1 + \mu(R_1)}{E(R_1)};
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \int_{R_1}^{R_2} \frac{\beta_1 + \mu\beta_2}{1 - \mu} r dr; \\
 f_2 &= \frac{P}{2\pi} + \int_{R_1}^{R_2} \frac{\beta_2 + \mu\beta_1}{1 - \mu^2} E r dr.
 \end{aligned}$$

Соотношения (2.14)-(2.18) точно удовлетворяют исходной системе уравнений и позволяют по известному температурному полю  $T(r, t)$ , известной внешней нагрузке  $P$  и экспериментально определенным зависимостям  $\mu(T)$ ,  $E(T)$ ,  $\beta_1(T)$  и  $\beta_2(T)$  рассчитать распределение перемещений  $u(r)$ , деформаций  $\varepsilon_r(r)$ ,  $\varepsilon_\theta(r)$ ,  $\varepsilon_0$  и напряжений  $\sigma_r(r)$ ,  $\sigma_\theta(r)$ ,  $\sigma_z(r)$  по сечению силового элемента в произвольный момент времени.

### 2.3 Определение температурного поля в цилиндрическом силовом элементе

В случае термоупругого мартенситного превращения необходимо учесть тот факт, что модели упругости и компоненты тензора структурной деформации являются функциями напряжений. Поэтому для расчета по соотношениям (2.14)-(2.18) использовался следующий итерационный алгоритм: по найденным значениям напряжений рассчитываются компоненты тензора структурной деформации и вновь рассчитываются величины напряжений.

Следует иметь в виду, что теплофизические характеристики сплава с памятью формы ТН-1 являются функциями от температуры:  $c = f_1(T)$ ;  $\lambda = f_2(T)$ ;  $a = f_3(T)$ .

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс нагрева в данном силовом элементе, нелинейное, и получение его аналитического решения связано с большими трудностями. Поэтому для решения поставленной задачи выбран путь численного моделирования процесса нагрева с применением конечно-разностного метода с неявной схемой дискретизации. Чтобы упростить решение уравнения, введем специальную функцию [15]:

$$G = \int_{T_0}^T \frac{\lambda(T) dt}{\lambda_0(T_0)}. \tag{2.20}$$

Полагая, что  $\frac{\partial T}{\partial G} = const$ , уравнение (2.9) становится линейным и его можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial G}{\partial t} = a(G) \left( \frac{\partial^2 G}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G}{\partial r} \right), \tag{2.21}$$

где  $a(G) = \frac{\lambda(G)}{c(G)\gamma}$ .

Граничные условия (2.10) и (2.11) с учетом (2.20) можно представить следующим образом:

$$-\frac{\partial G}{\partial r} + q = 0 \quad (2.22)$$

при  $r = R_2$ ,

$$\frac{\partial G}{\partial r} = 0$$

(2.23)

при  $r = R_1$ .

Исследуемое сечение силового элемента разбивалось сеткой на  $M$  узлов. Распределение теплофизических характеристик по сечению силового элемента в узлах конечно-разностной сетки аппроксимировалось в виде постоянной функции. Тогда уравнения (2.21), (2.22), (2.23) можно записать в виде системы из  $M$  линейных уравнений [16]:

$$-\left(\frac{a(G)t}{h^2} + \frac{a(G)}{h(R+h \cdot m)}\right)G_{m-1}^{n-1} + \left(1 + \frac{2a(G)t}{h^2} + \frac{a(G)}{h(R+h \cdot m)}\right)G_m^{n-1} - \frac{a(G)t}{h^2}G_{m+1}^{n-1} = G_m^n \quad (2.24)$$

$$-\frac{a(G)t}{h^2}G_{m+1}^{n-1} = G_m^n$$

для  $0 < m < M$ ;

$$G_0^n = G_1^n + q$$

(2.25)

для  $m=0$ ;

$$G_M^n = G_{M-1}^n$$

(2.26)

для  $m=M$ .

По времени процесс нагрева силового элемента рассматривается за  $N$  шагов. На каждом текущем шаге  $n$  путем численного интегрирования функции  $\lambda = f_2(T)$  для каждого узла  $m$  вычисляется функция  $G_m^{n-1}$ . Так же вычисляется приведенное значение коэффициента температуропроводности для каждого узла ко-

нечно-разностной сетки и решается система уравнений (2.24) – (2.26).

В результате решения данной системы уравнений вычисляются значения функции  $G_m^n$ , которые используются как начальные для последующего шага задачи. В конце процесса нагрева могут быть определены значения температуры для каждого узла сетки по зависимости  $G = f_4(T)$ .

Рассчитанные значения распределения температуры по сечению силового элемента могут быть использованы для анализа напряженно-деформированного состояния силового элемента с эффектом памяти формы при его проектировании.

#### **2.4 Инженерная методика расчета параметров напряженно-деформированного состояния силового элемента с памятью формы**

Как показали исследования [5], при больших градиентах температур по сечению силового элемента в нем возникают зоны пластического течения, приводящие к обратимым изменениям, которые не позволяют силовому элементу многократно и стабильно воспроизводить свои линейные размеры. Поэтому в области рабочих режимов стабильно работающего силового элемента (термоупругая область) возникает возможность сделать ряд упрощений, позволяющих получить значения напряжений и деформаций в виде явных выражений. Кроме того, при разработке оптимальной конструкции силового элемента такая упрощенная модель позволяет существенно уменьшить трудоемкость расчетов, а в ряде случаев получить относительно простые аналитические выражения, устанавливающие взаимосвязь между технологическими параметрами силового элемента.

В качестве примера рассматривается цилиндрический силовой элемент с эффектом памяти формы, работающий в условиях осевого растяжения из-за действующих внешних нагрузок.

С целью упрощения полученных уравнений, описывающих напряженно - деформированное состояние указанного силового элемента в выражениях (2.14) - (2.18), величины  $E$  и  $\mu$  принимаем постоянными и равными средним значениям функций  $E(T)$ ,  $\mu(T)$ . Полагаем, что величина структурной деформации, линейно зависящей от  $T$ :

$$\beta(T) = \begin{cases} \beta_0, & T < M^K \\ (\beta_0 - \beta_1)(T - M^K), & M^K \leq T \leq A^H \\ (\beta_0 - \beta_1)(A^H - M^K), & T > A^H \end{cases} \quad (2.27)$$

Силовой элемент рассматриваем как сплошной цилиндр ( $R_1=0, R_2=R$ ). С учетом (2.27) соотношения (2.19) примут вид

$$a_{11} = R^2 \frac{1+\mu}{E} \left( 1 - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \right) = R^2 \frac{1+\mu}{2E(1-\mu)}; \quad (2.28)$$

$$a_{12} = \frac{R^2}{2(1-\mu)}; \quad a_{22} = \frac{R^2 E}{2(1-\mu^2)};$$

$$f_1 = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \int_0^R \beta r dr;$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{P}{\pi} + \frac{(2-\mu)E}{1-\mu^2} \int_0^R \beta r dr \right).$$

Решив систему (2.19) с коэффициентами (2.28), получим

$$\varepsilon_0 = \frac{a_{11}f_2 - a_{12}f_1}{a_{11}a_{22} - a_{12}^2}; \quad c = \frac{f_1 - a_{12}\varepsilon_0}{a_{11}}; \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{R^2} \left\{ \frac{P}{\pi E} + 2 \int_0^R \beta r dr \right\};$$

$$c = \frac{E}{1+\mu} \left\{ \mu \varepsilon_0 + \frac{1-2\mu}{R^2} \int_0^R \beta r dr \right\}. \quad (2.30)$$

Подставив найденное решение  $c$  и  $\varepsilon_0$  (2.30) в выражение напряжений (2.14) - (2.18), получим для компонент тензора напряжений следующие выражения:

$$\sigma_r = -\frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)} \left( \frac{1}{R^2} \int_0^R \beta r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^R \beta r dr \right); \quad (2.31)$$

$$\sigma_z = -\frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)} \left( \frac{1}{R^2} \int_0^R \beta r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^R \beta r dr - \beta \right); \quad (2.32)$$

$$\sigma_\ominus = \frac{P}{\pi R^2} + \frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)} \left( \frac{1}{R^2} \int_0^R \beta r dr - \beta \right).$$

(2.33)

Если силовой элемент с эффектом памяти формы представляет собой полый цилиндр ( $R_2 > R_1 > 0$ ), компоненты тензора напряжений выражаются следующим образом:

$$\sigma_r = -\frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)r^2} \left( \frac{r^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \beta r dr - \int_0^r \beta r dr \right);$$

(2.34)

$$\sigma_\ominus = -\frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)r^2} \left( \frac{r^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \beta r dr + \int_0^r \beta r dr \right); \quad (2.35)$$

$$\sigma_\ominus = \frac{P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)} \left( \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \beta r dr - \beta \right).$$

(2.36)

Выражения компонент тензора напряжений (2.31) - (2.36) более удобны при анализе напряженно-деформированного состояния силового элемента с эффектом памяти формы.

Проведенные в СГАУ экспериментальные исследования показали, что принятые допущения, при использовании упрощенных выражений компонент тензора напряжений силового элемента, работающего в условиях осевого растяжения относительно внешних нагрузок, вносят погрешность в расчеты, не превышающую 35%. Такая точность допустима для проведения инженерных расчетов (например, при проектировочном расчете) в процессе разработки устройств с силовым приводом на основе эффекта памяти формы.

### 3 ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

#### 3.1. Деформационно-силовые зависимости силового элемента, работающего в условиях одноосного растяжения

Для проектирования силовых элементов из сплава с эффектом памяти формы с использованием математического аппарата, представленного во второй главе настоящего пособия, необходимы зависимости, устанавливающие связь величины деформации памяти формы с эксплуатационными нагрузками силового привода устройства. Данные зависимости называются деформационно-силовыми и могут быть получены в результате эксперимента.

При переходе материала силового элемента из низкотемпературной фазы в высокотемпературную при наличии внешних нагрузок развиваются значительные внутренние напряжения. Известно, температурный интервал фазового перехода с ростом напряжений расширяется и смещается в область более высоких температур. Напряжения памяти формы увеличиваются с ростом величины деформации наведения [17]. Вышесказанное иллюстрируется температурными зависимостями напряжений памяти формы при нулевой деформации, изображенными на рис. 3.1 [18].

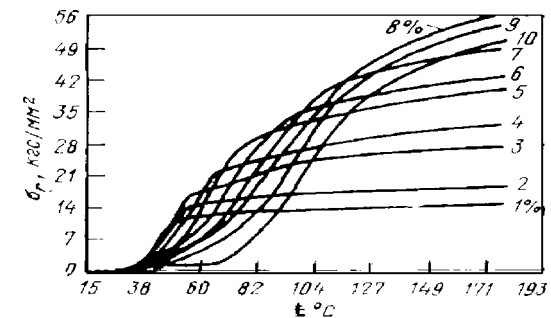


Рис. 3.1. Напряжения памяти формы  $\sigma_T$  в зависимости от температуры нагрева сплава системы Ni-Ti при разных деформациях наведения  $\epsilon_n$

Одним из основных параметров, определяющих ценность практического использования эффекта памяти формы, является величина деформации памяти формы, полученная в результате термоциклирования. На рис. 3.2 представлены температурно-деформационные кривые для материала ТН-1, термоциклированного с растягивающими напряжениями наведения, при различных напряжениях сопротивления, вызванных внешней нагрузкой [5].

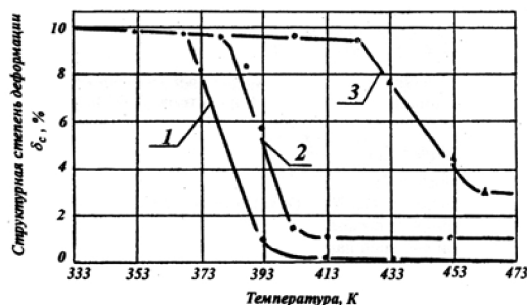


Рис. 3.2. Температурные зависимости деформации памяти формы при различных напряжениях сопротивления: 1 – 0; 2 – 100 МПа; 3 – 200 МПа

В практическом отношении важно, что мартенситное превращение происходит в интервале температур или напряжений (превращения, вызванные охлаждением и напряжениями, соответственно) и аналогично этому обратное превращение осуществляется также в интервале температур или напряжений. Рисунок 3.2 иллюстрирует то, что в случае превращений, вызванных напряжениями (определяемыми внешними нагрузками), для термоупругого мартенсита существует определенная эквивалентность напряжения и температуры. Кроме того, характеристические температуры  $M^H$ ,  $M^K$ ,  $A^H$ ,  $A^K$  являются функцией напряженного состояния, и наоборот, характеристические напряжения для реакций, вызванных напряжениями, являются функцией температуры

[5]. Это также иллюстрируется рисунком 3.2 (координаты точек перегиба кривых 1, 2 и 3 по оси «температура»).

Согласно исследованиям, описанным в работе [19], силовой элемент, выполненный из ТН-1, способен совершать максимальную механическую работу и генерировать максимальное перемещение, если он подвергся термоциклированию при напряжениях наведения 300 МПа. При этом деформация памяти формы силового элемента при отсутствии внешнего сопротивления составляет 10%. Действие напряжения сопротивления в силовом элементе 200 МПа приводит к уменьшению деформации памяти формы до 8%. Это иллюстрируется рисунком 3.3.

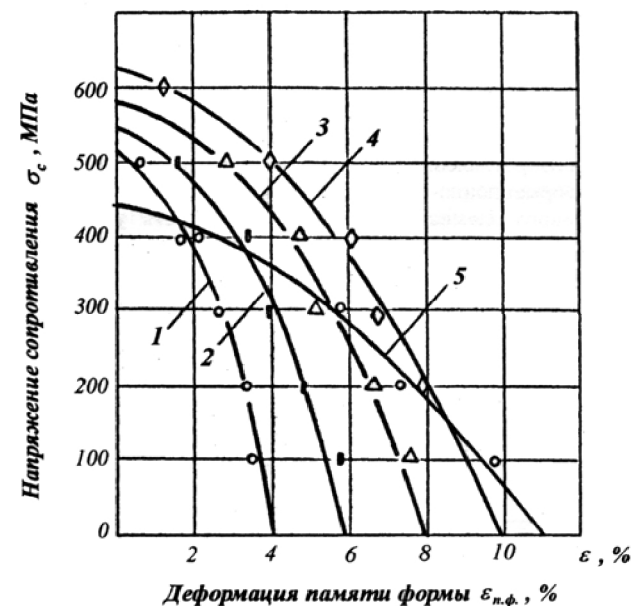


Рис. 3.3. Деформационно-силовая зависимость силового элемента из сплава ТН-1: 1 – 5 – зависимости для силовых элементов, термоциклированные соответственно с напряжением наведения 100, 150, 200, 300, 400 МПа

### 3.2. Деформационно-силовые зависимости силового элемента, работающего в условиях одноосного сжатия

При решении различных технических и технологических задач на основе эффекта памяти формы приходится разрабатывать устройства и технологическое оснащение с силовым элементом, в материале которого присутствуют как растягивающие, так и сжимающие компоненты тензора напряжений, вызванные внешней нагрузкой. Это можно наблюдать в силовом элементе, работающем на изгиб или в условиях осевого или радиального сжатия.

Опыт создания устройств с силовым приводом из сплава с эффектом памяти формы, накопленный в НИИ-204 СГАУ, показал, что силовой элемент из сплава с памятью формы, работающий в условиях осевого сжатия, по сравнению с аналогичным силовым элементом, работающим в условиях осевого растяжения, имеет иные деформационно-силовые характеристики.

Для прогнозирования параметров разрабатываемых устройств необходимы деформационно-силовые характеристики силового привода, работающего в условиях осевого сжатия или при сложном напряженно-деформированном состоянии, которые характеризуют возможность данного силового элемента восстанавливать при нагреве свою первоначальную форму, преодолевая при этом рабочие нагрузки.

Для исследования температурных зависимостей компоненты растяжения структурных деформаций материала с эффектом памяти формы экспериментально моделировались условия работы образца из материала с памятью формы при одноосном напряженно -деформированном состоянии.

Для термомеханической подготовки силового элемента из материала с памятью формы и проведения необходимых исследований характеристик силового элемента из материала с памятью формы, работающего в условиях внешнего осевого сжатия, ис-

пользовалась специально разработанная и изготовленная в СГАУ экспериментальная оснастка, предназначенная для работы с испытательной машиной МТВ-10.

В качестве образцов для экспериментальных исследований использовались втулки из сплава ТН-1 с размерами: внешний диаметр  $D_2=16$  мм, внутренний диаметр  $D_1=7$  мм, длина  $L=46$  мм.

В процессе экспериментов проводилось термоциклирование образцов при напряжениях наведения  $\sigma_n = 290$  МПа;  $\sigma_n = 475$  МПа;  $\sigma_n = 540$  МПа с последующими замерами величин деформаций памяти формы при различных нагрузках, соответствующих напряжениям сопротивления  $\sigma_c = 10$  МПа;  $\sigma_c = 200$  МПа;  $\sigma_c = 350$  МПа,  $\sigma_c = 500$  МПа.

В результате экспериментальных исследований получены температурные зависимости деформаций памяти формы и деформационно-силовые зависимости для силового элемента, работающего в условиях одноосного сжатия, которые представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

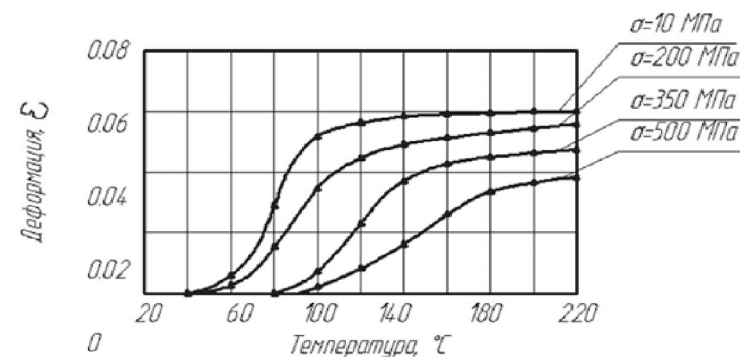


Рис. 3.4. Температурные зависимости деформации памяти формы при различных напряжениях сопротивления для силового элемента, прошедшего термосиловую подготовку с напряжениями наведения  $\sigma_n=540$  МПа при напряжениях сопротивления 10-500 МПа

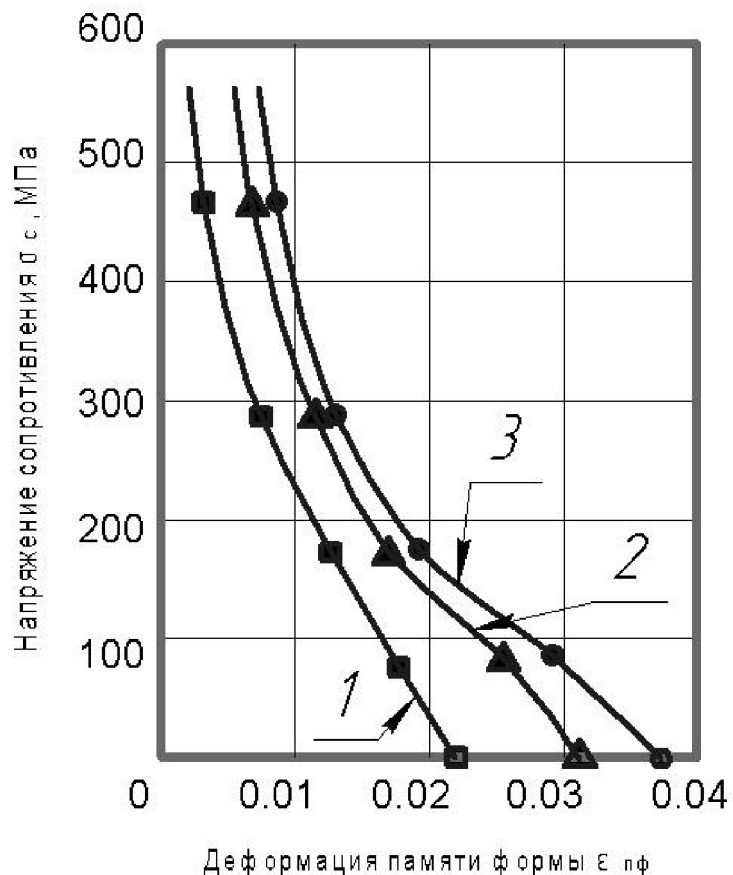


Рис. 3.5 Деформационно-силовые характеристики силовых элементов, работающих в условиях осевого сжатия, прошедших термоциклирование с различными напряжениями наведения:  
 1 –  $\sigma_n = 290$  МПа; 2 –  $\sigma_n = 475$  МПа; 3 –  $\sigma_n = 540$  МПа

Анализируя полученные результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что силовой элемент из сплава с памятью формы, работающий в условиях осевого сжатия, по сравнению с аналогичным силовым элементом, работающим в условиях осевого растяжения, имеет более высокие силовые параметры и более низкие деформационные характеристики.

Также установлено, что рост величины напряжения наведения  $\sigma_n$  при подготовке силового элемента существенно влияет на полученные деформационно-силовые характеристики при  $\sigma_n < 450-500$  МПа. При дальнейшем увеличении величины напряжения наведения  $\sigma_n$  напряжения памяти формы  $\sigma_{пф}$  и деформации  $\epsilon_{пф}$ , генерируемые силовым элементом, увеличиваются незначительно.

### 3.3 Аппроксимация температурных зависимостей ортотропных компонент тензора структурных деформаций

В результате экспериментальных исследований в табличном виде получены деформационно-силовые и температурные зависимости компонент тензора структурных деформаций для материала ТН-1, работающего в одноосном напряженно-деформированном состоянии в условиях растяжения и в условиях сжатия. Данные зависимости могут быть использованы для численного исследования напряженно-деформированного состояния силового элемента с помощью ранее разработанной математической модели.

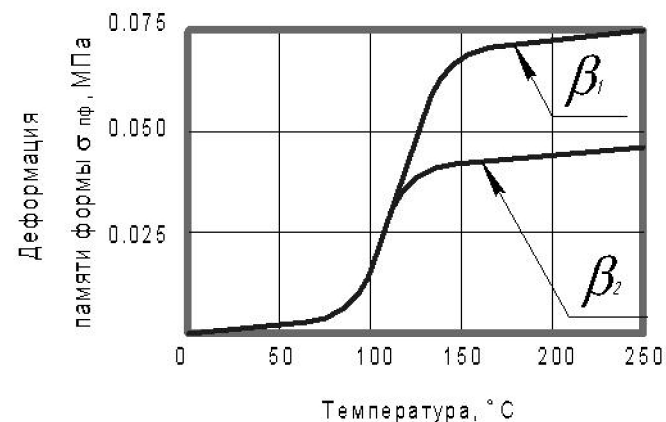


Рис. 3.6 Температурные зависимости ортотропных компонент тензора структурных деформаций для материала ТН-1

Подтверждено, что температурные зависимости структурных деформаций растяжения и сжатия (разного знака) имеют различный характер. Это необходимо учитывать при создании силовых элементов с эффектом памяти формы, работающих в условиях сложного нагружения. Температурные зависимости ортотропных компонент тензора структурных деформаций для материала ТН-1 представлены на рис 3.6.

Для удобства расчетов при моделировании процесса функционирования силового элемента с эффектом памяти формы, а так-же для проведения инженерных расчетов при проектировании силовых элементов, работающих в различных условиях нагружения, целесообразно выполнить аппроксимацию температурных зависимостей ортотропных компонент тензора структурных деформаций  $\beta_1$  и  $\beta_2$  кусочно-линейными функциями с учетом характера экспериментальных зависимостей и характеристических температур  $M^H, M^K, A^H, A^K$  для материала ТН-1.

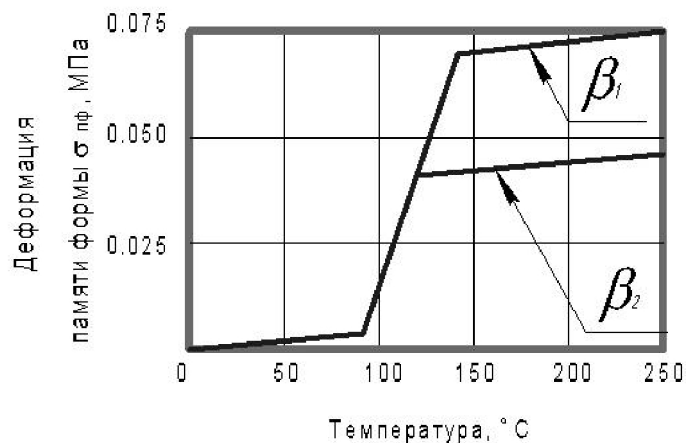


Рис. 3.7. Аппроксимация температурных зависимостей ортотропных компонент тензора структурных деформаций для материала ТН-1 кусочно-линейными функциями

На рисунке 3.7 представлена аппроксимация экспериментальных зависимостей составляющих структурной деформации памяти формы от температуры кусочно-линейными функциями.

Ниже представлены температурные зависимости ортотропных компонент тензора структурных деформаций в аналитическом виде:

$$\beta_1 = k_1 E + B_1, \quad (3.1)$$

$$\text{где } T \in [-\infty; 125] \quad k_1 = 0,0347 \quad B_1 = 0;$$

$$T \in [125; 135] \quad k_1 = 3,7 \quad B_1 = -0,26;$$

$$T \in [135; +\infty] \quad k_1 = 0,131 \quad B_1 = 0,05;$$

$$\beta_2 = k_2 E + B_2, \quad (3.2)$$

$$\text{где } T \in [-\infty; 103] \quad k_2 = 0,016 \quad B_2 = 0;$$

$$T \in [103; 127] \quad k_2 = 4,96 \quad B_2 = -0,31;$$

$$T \in [127; +\infty] \quad k_2 = 0,101 \quad B_2 = 0,03.$$

Полученные зависимости удобны в практическом применении как для инженерных расчетов, так и для проведения теоретических исследований процесса функционирования силовых элементов при решении широкого круга технических задач.

#### 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕВЕРСИВНЫХ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

##### 4.1 Конструктивные особенности реверсивного силового привода с эффектом памяти формы

Конструктивные особенности реверсивного силового привода с эффектом памяти формы отражены на примере разработанного в СГАУ силового привода для станочных приспособлений механической обработки деталей летательных аппаратов. Предлагаемый силовой привод способен заменить существующие гидравлические и пневматические приводы станочных приспособлений. Привод отличается компактностью, отсутствуют высоконагруженные пневматические и гидравлические магистрали, при этом сокращается энергоемкость и повышаются экологические свойства технологического оснащения.

Ниже описана конструкция универсального силового привода с эффектом памяти формы. Принцип действия данного привода заключается в том, что усилие зажима заготовки вызывается действием предварительно деформированной рабочей пружины, а для расфиксации заготовки в момент ее установки и снятия используется силовой элемент с эффектом памяти формы, который деформирует рабочую пружину и снимает усилие с заготовки.

Схема предлагаемого силового привода представлена на рисунке 4.1.

Силовой привод содержит разрезной корпус 1, в который установлена обойма 2. В корпусе 1 и обойме 2 выполнены осевые конические отверстия, в которых с помощью конических сухариков 3 и 4 закреплен силовой элемент с эффектом памяти формы 5. Сухарик 3 выполнен из диэлектрического материала.

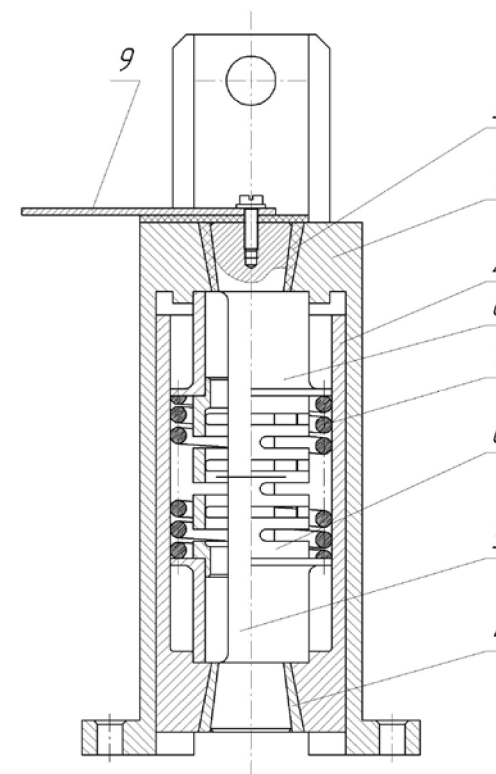


Рис. 4.1. Схема силового привода для станочных приспособлений механической обработки деталей летательных аппаратов:

1-корпус, 2-обойма, 3-сухарик из диэлектрического материала, 4-сухарик, 5-силовой элемент с эффектом памяти формы, 6-рабочая пружина, 7-возвратный привод

Соосно силовому элементу 5 установлена прорезная рабочая пружина 6. Также установлен возвратный привод силового элемента 7, выполненный в виде цилиндрической прорезной пружины, которая своими торцами через втулки 8 упирается в корпус 1 и обойму 2. Через эти втулки с корпусом 1 и обоймой 2 контактирует рабочая пружина 6. На верхнем конце силового

элемента 5 закреплен электрод 9, предназначенный для подключения силового элемента к источнику питания.

Силовой привод работает следующим образом. К силовому элементу 5 подключают источник питания и он нагревается за счет прохождения через него электрического тока (ТН-1 характеризуется высоким удельным сопротивлением). Материал силового элемента переходит в высокотемпературную фазу (аустенитную) и он сокращает свою длину, перемещает обойму 2 вниз относительно корпуса 1, деформирует рабочую пружину 6 и возвратный привод 7. После отключения питания силовой элемент охлаждается, его материал переходит в низкотемпературную фазу и при этом увеличивает свою длину, чему способствует возвратный привод 7, высвобождая рабочую пружину 6. Усилие пружины 6 используют для фиксации заготовок в станочных приспособлениях в процессе обработки.

#### *4.2 Методика проектирования реверсивного силового привода с эффектом памяти формы*

Задача проектирования силового элемента из сплава с памятью формы является наиболее важной в практическом отношении, поскольку непосредственно влияет на параметры разрабатываемого устройства, на технологический процесс, реализуемый с помощью силового привода из сплава с памятью формы или на конкретную конструкцию технологического оснащения и инструмента.

Основными характеристиками силового элемента из сплава с памятью формы являются: материал силового элемента с эф-

фектом памяти формы, эксплуатационное усилие  $P$ , время срабатывания  $\tau$ , перемещение  $\Delta l$  или угол кручения  $\Delta\theta$ .

Конструктивные параметры силового элемента характеризует его длина  $L$ , форма и размеры поперечного сечения. Например  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы соответственно внешней и внутренней поверхностей силового элемента с сечением в форме кольца.  $R_1$  может быть равен нулю, это означает, что силовой элемент – сплошной цилиндр. К конструктивным параметрам также относится величина плотности теплового потока  $q$ , действующего на поверхность силового элемента, или удельная мощность тепловой энергии, выделяемая в его сечении, например, за счет прохождения электрического тока.

Задачу проектирования сформулируем следующим образом. Выбрать значения параметров  $R_1$  и  $R_2$  и  $q$  так, чтобы силовой элемент развивал рабочее усилие  $F_0$ , причем время срабатывания не превышало максимально допустимое, а уровень напряжений  $\sigma_i$  в материале силового элемента не превышал предел текучести его материала.

Методика проектирования силового привода циклического действия с эффектом памяти формы подразумевает, что проектирование проводится за четыре этапа: 1-й этап - проектировочный расчет, 2-й этап - подбор параметров возвратного привода (например, параметров пружины), 3-й этап - поверочный расчет, 4-й этап - разработка заготовки силового элемента и технологической оснастки для его термосиловой подготовки.

1-й этап - проектировочный расчет. Заключается в следующем. Предварительно, исходя из условий решаемой задачи, принимается уровень эксплуатационных напряжений в силовом элементе в зависимости от материала, из которого он будет изготовлен. Уровень эксплуатационных напряжений  $\sigma_{\text{экспл}}$  должен быть меньше напряжений текучести данного материала на 20-

50%, в зависимости от решаемой технической задачи. Например, для сплава ТН-1 (при  $\sigma_{0.2} \approx 300$  МПа,  $\tau_{пр} \approx 150$  МПа) он составит 150...240 МПа. Исходя из условия непревышения интенсивности напряжений, вызванных эксплуатационными нагрузками установленного уровня, напряжений в материале силового элемента, подбирают размеры его поперечного сечения.

Для силового элемента, работающего в условиях одноосного растяжения-сжатия, площадь поперечного сечения  $A$  должна составлять:

$$A = \frac{F_0}{\sigma_{экспл}}, \quad (4.1)$$

где  $F_0$  – величина эксплуатационного усилия;  
 $\sigma_{экспл}$  – уровень эксплуатационных напряжений.

Для силового элемента, работающего на кручение, момент сопротивления его поперечного сечения  $W$  должен составлять:

$$W = \frac{M}{\tau_{пр}}, \quad (4.2)$$

где  $M$  – величина эксплуатационного момента;  
 $\tau_{пр}$  – предельные касательные напряжения для сплава с эффектом памяти формы.

С учетом эксплуатационных напряжений, принятых ранее, по деформационно-силовым зависимостям для материала с эффектом памяти формы (рис. 3.2 – если силовой элемент работает в условиях одноосного растяжения против внешних нагрузок, или рис. 3.4 – если силовой элемент работает в условиях одноосного сжатия против внешних нагрузок) определяется величина эксплуатационной деформации памяти формы. Для материала ТН-1 она может составлять  $\varepsilon_{пф} = 7...8\%$  - при работе силового элемента на растяжение,  $\varepsilon_{пф} = 2...4\%$  - при работе силового элемента на сжатие и  $\tau_{пф} = 4...7\%$  для силового элемента, работающего на кручение [19]. Исходя из величины потребного перемещения или угла

поворота силового элемента, вычисляется длина его рабочей части, путем деления величины потребного перемещения  $\Delta l$  (угла поворота  $\Delta \tau$ ) на соответствующее значение эксплуатационной деформации памяти формы.

Для силового элемента, работающего на растяжение или сжатие против внешних нагрузок:

$$L = \frac{\Delta l}{\varepsilon_{пф}}. \quad (4.3)$$

Для силового элемента, работающего на кручение против внешних нагрузок:

$$L = \frac{\Delta \Theta}{\tau_{пф}}. \quad (4.4)$$

2-й этап – подбор параметров возвратного привода. Заключается в подборе параметров упругого элемента, например, пружины для силового элемента, работающего в условиях одноосного растяжения-сжатия. Экспериментальными исследованиями, проведенными в СГАУ, установлено, что упругий элемент в процессе работы силового элемента с эффектом памяти циклического действия формы должен создавать в его сечении напряжения с интенсивностью, составляющей 2...3% от эксплуатационных – при мартенситной фазе материала силового элемента (начало рабочего хода силового элемента) и 6...7% от эксплуатационных при аустенитной фазе материала силового элемента (конец рабочего хода силового элемента). Этим напряжениям соответствуют значения усилия возвратного привода в начале  $F_1$  и конце  $F_2$  рабочего хода силового элемента. При этом рабочий ход упругого элемента  $h$  должен соответствовать рабочему ходу силового элемента  $\Delta l$ , который определен решаемой технической задачей. Исходя из этих условий, определяют конструктивные параметры возвратного привода [20].

3-й этап – поверочный расчет. Заключается в следующем. Определяется поле температур по сечению силового элемента с применением математического аппарата, изложенного в п. 2.3 настоящего пособия с учетом геометрических параметров силового элемента и значения теплового потока  $q$ . Далее по формулам (2.16)...(2.19) или (2.32)...(2.37) определяются компоненты тензора напряжений в материале силового элемента с эффектом памяти формы для заданного числа моментов рабочего цикла. Вычисляется интенсивность напряжений в сечении силового элемента и сравнивается с заданным уровнем эксплуатационных напряжений. Если интенсивность напряжений в сечении силового элемента в какой-либо момент времени рабочего цикла превышает уровень эксплуатационных напряжений, корректируют конструктивные параметры силового элемента или значение теплового потока  $q$ . Далее весь цикл вычислений повторяется вновь.

4-й этап - разработка заготовки силового элемента и технологической оснастки для его термосиловой подготовки. Заключается в определении размеров заготовки силового элемента с учетом изменений ее размеров в процессе термосиловой подготовки. При этом учитывается изменение размеров силового элемента, происходящее под действием напряжений наведения. Далее, исходя из размеров заготовки силового элемента, проектируется устройство для его термосиловой подготовки – устройство для растяжения, устройство для сжатия, штамп для обжима и т.п. в зависимости от условий работы силового элемента.

1. Курдюмов, Т.В. О термоупругом равновесии фаз при мартенситных превращениях / Т.В. Курдюмов, Л.Г. Хандрос. // ДАН СССР. -1949. -Т.66. -№2. -С. 211-215.
2. Cang L.C., Read T.A. Plastic deformation and diffusionless phase change in Metals – the Gold – cadmium Beta phase / Trans. of AIME. 1951. V. 191. P. 47.
3. Харрисон, Дж. Д. Использование сплавов системы Ti-Ni в механических и электрических соединениях. / Дж. Д. Харрисон, Д.Е. Ходгсон; под ред. В.А. Займовского. // Эффект памяти формы в сплавах. -М.: Металлургия, 1979. -С.429-434.
4. Saburi T., Wayman C.M., Takata K. and Nenno S. Acta Metall., Vol.28 p.15, 1980.
5. Барвинок, В.А. Физические основы моделирования и проектирования реверсивных силовых приводов из материала с эффектом памяти формы / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, В.С. Феоктистов. // Международный центр научной и технической информации. - М., 1997. -72 с.
6. А.с. 1486207 СССР. Устройство для обработки концов труб / Ломовской О.В., Феоктистов В.С. [и др.], опубл. 15.06.89, Бюл. №22.
7. Тихонов, А.С. О механизме мартенситной памяти в металлических материалах / А.С. Тихонов, А.П. Герасимов, М.Х. Шоршоров [и др.] // Физика и химия обработки материалов. -1976. -№5. -С. 78-84.
8. Хандрос, Л.Г. Мартенситное превращение, эффект памяти и сверхупругость / Л.Г. Хандрос, И.А. Арбузова. // Металлы, электроны, решетки. – Киев: Наукова думка, 1975. -С.149-143.
9. Арбузова, И.А. Рост упругих кристаллов мартенситной  $\gamma$  - фазы под действием внешних напряжений / И.А. Арбузова, Т.В. Курдюмов, Л.Г. Хандрос. // Физика металлов и материаловедение. -1961. -Т.11. -№2. -С. 272-280.
10. Ahlers M. On the usefulness of martensitic transformation for energy conversion / Scripta Metallurgica. 1975. V.9. №1. P. 71-74.
11. Rosner A.G., Wasilewski R.I. / Tensile properties of NiAl and NiTi. 1966. V.94. P. 169-175.
12. Беляев, С.П. Обратимый эффект памяти формы как результат термоциклической тренировки под нагрузкой / С.П. Беляев, С.Л. Кузьмин, В.А. Лихачев. // Проблемы прочности. -1988. -№7. -С.50-54.
13. Богданович, В.И. Определение напряжений в материале при термоупругом мартенситном превращении. / В.И. Богданович, В.А. Барвинок, В.С. Феоктистов. // Изв. вузов. Машиностроение. -1987. -№3. -С. 110-116.

14. Ройтбурд, А.Л. Теория формирования гетерофазной структуры при фазовых превращениях в твердом составе. / А.Л. Ройтбурд. // УФН. -1974. -Вып.1. -С. 105-128.

15. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. -600 с.

16. Барвинок, В.А. Исследование процесса нагрева силового элемента из сплава с эффектом памяти формы. / В.А. Барвинок, О.В. Ломовской, В.И. Богданович. // Проблемы машиностроения и автоматизации. -1995. -№1-2. -С. 52-54.

17. Перкинс, Д. Термомеханические характеристики сплавов с термоупругим мартенситом. / Д. Перкинс, Г.Р. Эдвардс, С.Р. Сач [и др.]; под ред. В.А. Займовского. // Эффект памяти формы в сплавах. – М.: Металлургия, 1979. -С. 230-429.

18. W. B. Cross, A. H. Karlotis and F. J. Stilmer, NASA CR—1433. September 1969.

19. Фавстов, Ю.К. Сплавы с памятью формы и их применение в машиностроении. / Ю.К. Фавстов. // Вестник машиностроения. -1984. -№1. -С. 52-55.

20. Анурьев, В.И. Справочник конструктора – машиностроителя. В 3 т. – изд. перераб. и доп. / В.И. Анурьев; под ред. И.Н. Жестковой – М.: Машиностроение, 2001. -Т.3. -864 с.

Учебное издание

*Богданович Валерий Иосифович,  
Родин Николай Петрович,  
Ломовской Олег Владиславович*

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Учебное пособие*

Технический редактор В. П. Самохвалов  
Редакторская обработка Л. Я. Чегодаева  
Корректорская обработка Е. П. Сеничкина  
Доверстка Т. К. Кретикина

Подписано в печать 11.12.07. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 4,0.

Тираж 120 экз. Заказ ИП-ж109/2007.

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.