

Глава 25. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА «МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЫШЦ» ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

¹Вьюненко Ю.Н., ²Хлопков Е.А., ³Волков Г.А.

¹ООО «Оптимикст Лтд»,

г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: 6840817@mail.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: hlopkovelisey@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: g.volkov@spbu.ru

Введение

История использования металлов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в технике длится уже более полувека. Однако, продолжительное время применения ограничивались устройствами однократного действия: креофитовые соединения, стенты, устройства расчекочки и т.п. [1-3]. Исключением можно условно считать противопожарные датчики. Потенциально это конструкции многократного срабатывания, однако, специфика их назначения не предусматривает большого количества рабочих циклов. В реальных же условиях устройства с ЭПФ работают в режиме термоциклирования лишь на испытательных стендах.

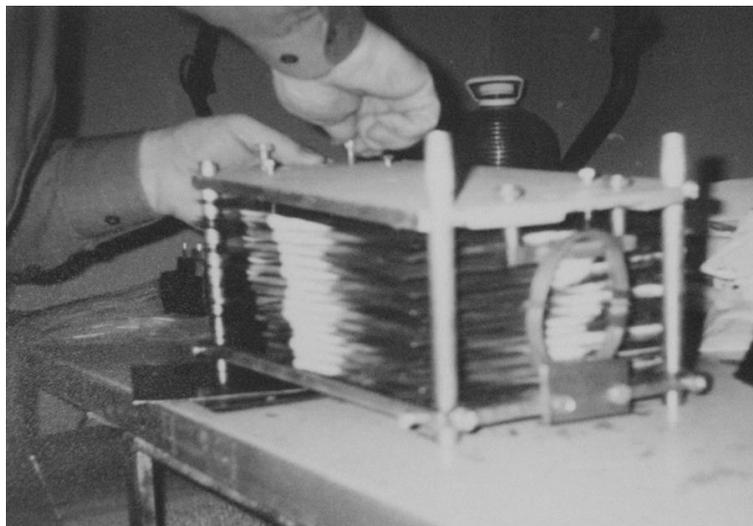


Рисунок 1.1 – Технологическая установка ШеР

С 2008 года в технологических процессах изготовления материалов специального назначения со слоистой структурой стали применять устройство ШеР (рис.1.1). Данные установки фактически являются специальными малогабаритными прессами, действующими с реализацией ЭПФ [4]. В настоящее время силовые элементы из сплава *TiNi* на первой установке отработали более 1480 технологических термоциклов. Наблюдение за работой «металлических мышц» позволило выявить у них некоторые особенности в механическом поведении. Целенаправленные экспериментальные исследования позволили определить ряд закономерностей деформационно-силовых свойств «металлических мышц» и найти способы совершенствования их работы.

1. Установка ШеР и динамометр ЛИНД

Технологическая установка ШеР состоит из неподвижной опорной пластины с четырьмя направляющими стойками (1, рис.1.2), подвижной силовой пластины (2, рис.1.2) и двух силовых элементов (3, рис.1.2). Между опорной и силовой пластинами размещён пакет заготовок (4, рис.1.2) для получения сэндвичей. Силовая и опорная пластины перед постановкой в термостат стягиваются «металлическими мышцами», которые сжимают пакет сэндвичей во время нагрева. Степень натяжения силовых элементов регулируется системой винт-гайка верхних захватов (5, рис.1.2),

установленных на силовой пластине. На опорной пластине «металлические мышцы» закреплены крюками нижних захватов (6, рис.1.2)



Рисунок 1.2 – Схема установки ШеР:

1– опорная пластина, 2 – подвижная силовая пластина,
3 – кольцевой силовой пучковый элемент (КСПЭ),
4 – пакет заготовок, 5 – верхний захват, 6 – нижний захват

Во время установки в ШеР круговые силовые элементы приобретают форму вытянутого овала. В процессе нагрева с достижением температур обратного мартенситного превращения «металлические мышцы», пытаясь вернуть первоначальную круговую форму, начинают стягивать силовую и опорные пластины. Тем самым происходит сжатие пакета заготовок сэндвичей, интенсифицирующее процесс взаимопроникновения разогретых материалов. Силовые нагрузки, генерируемые в результате перестройки кристаллической решетки, достигают ~1200Н. Развитие деформационных процессов ЭПФ определяется контролем расстояния между силовой и опорной пластинами ШеРа.

Наблюдая за нагревом устройства в технологическом термоцикле, было обнаружено, что до эффекта памяти формы, сближающего силовую и опорные пластины, промежуток между ними возрастает.



Рисунок 1.3 – Внешний вид
кольцевых силовых пучковых
элементов (КСПЭ)

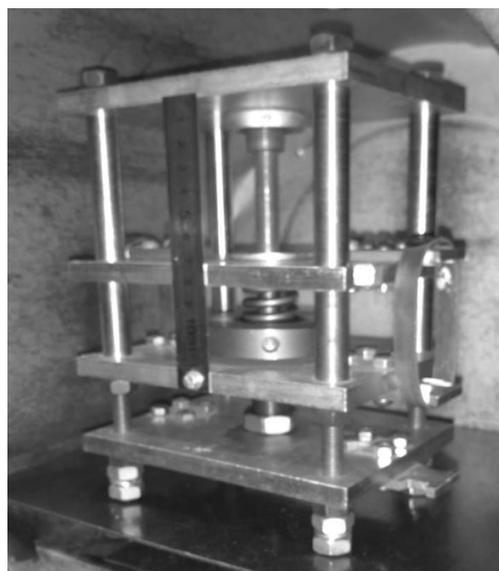


Рисунок 1.4 – Динамометр ЛИНД

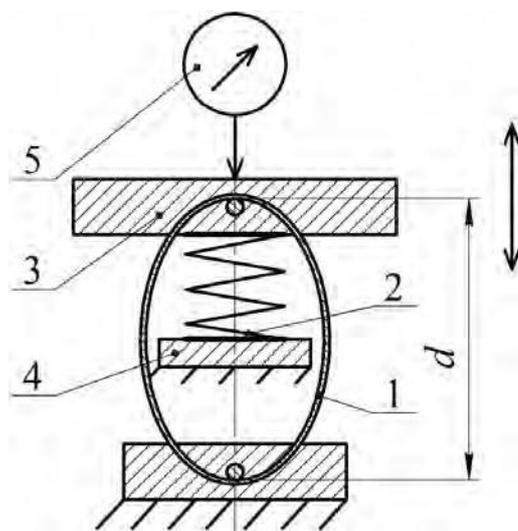


Рисунок 1.5 – Схема нагружения КСПЭ в динамометре ЛИНД: 1 – КСПЭ, 2 – контртело, 3 – подвижная пластина, 4 – регулирующая фиксируемая пластина, 5 – измерительная система, d – характеристический размер КСПЭ

Большой разброс физико-механических свойств и геометрических параметров материалов, используемых в производстве сэндвичей для антивибрационных средств индивидуальной защиты, не дает возможности определять деформационно-силовые характеристики «металлических мышц» непосредственно в технологических установках. Для изучения деформационно-силовых характеристик кольцевых силовых пучковых элементов (КСПЭ) (рис.1.3) был разработан и изготовлен специальный динамометр ЛИНД (рис.1.4). Конструкция ЛИНДа позволила моделировать взаимодействие силовых элементов с пакетами заготовок за счет контртела, в качестве которого используется спиральная стальная пружина. На рис.1.5 представлена принципиальная схема ЛИНДа. Одновременно в ЛИНДе исследуется работа пары КСПЭ (1, рис.1.5). Их расположение является симметричным относительно контртела в параллельных плоскостях. Силовое воздействие на «металлические мышцы» регулировали степень предварительного сжатия контртела (2, рис.1.5), которое определялось изменением расстояния между подвижными пластинами (3 и 4, рис.1.5.) При достижении требуемого уровня силового взаимодействия с КСПЭ положение нижней пластины жестко фиксируется. Температурные зависимости деформационно-силовых параметров определяются во время нагрева ЛИНДа в термостате.

2. Деформационное поведение кольцевых силовых пучковых элементов

Немонотонность в движении силовой пластины ШеРа в технологическом процессе смоделировали в ЛИНДе. Исследуемые в опыте КСПЭ были изготовлены из четырех замкнутых витков проволоки диаметром 2.5мм из сплава $TiNi$ с содержанием никеля ~50.3ат.%. При комнатной температуре пара «металлических мышц» приводилась в силовое взаимодействие с контртелом. Затем, во время нагрева ЛИНДа в термостате контролировали изменение температуры, смещение контрольной точки $\Delta = d_1 - d(t)$ (где $d_1 = d(0)$ – размер КСПЭ перед нагревом, $d(t)$ – характеристический размер в момент времени t) и степень силового взаимодействия $F(t) = F_0 + K \cdot \Delta$ (где F_0 – сила в начальный момент времени, $K=100\text{Н/мм}$). На рисунке 2.1 приведены временные зависимости контролируемых величин при разных уровнях начального силового взаимодействия КСПЭ и упругой спирали контртела.

При начальном значении силового взаимодействия $F_0=11\text{кГ}$ отмечено монотонное смещение подвижной опорной плоскости, обусловленное развитием эффекта памяти формы (рис.2.1, а). Сближение опорных плоскостей начинается на 40-

й минуте при нагреве печи до 86°C . При этом происходит почти четырехкратный рост силового взаимодействия КСПЭ с контртелом.

Во втором опыте начальная сила противодействия была повышена до 21кГ. В результате этого при нагреве термостата на 20-й минуте было замечено возрастание параметра d (рис.2.1, б). Первоначально это изменение было слабовыраженным, но после достижения температуры печи 84°C формоизменение стало усиливаться. К 88°C величина d возросла на 0.5мм, после чего пошел процесс восстановления формы.

В случае, когда противодействующая сила изначально равнялась 35кГ (рис.2.1, в), «протохода» (движение в направлении, противоположном действию эффекта памяти формы) начинается приблизительно в условиях, близких к ситуации предыдущего эксперимента. Однако, весь процесс роста d можно разделить на три этапа. Первый наблюдается в интервале между 22-й и 29-й минутами. В этом временном интервале подрастание d выражено слабо. С 30-й минуты нагрева термостата, когда температура достигла примерно 78°C , и до 39-й минуты (температура $\sim 85^{\circ}\text{C}$) смещение достигает 0.5мм. В течение следующих 5 минут нагрева (температура достигла 89°C) изменение d достигло 0.8 мм. Затем началось действие эффекта памяти формы.

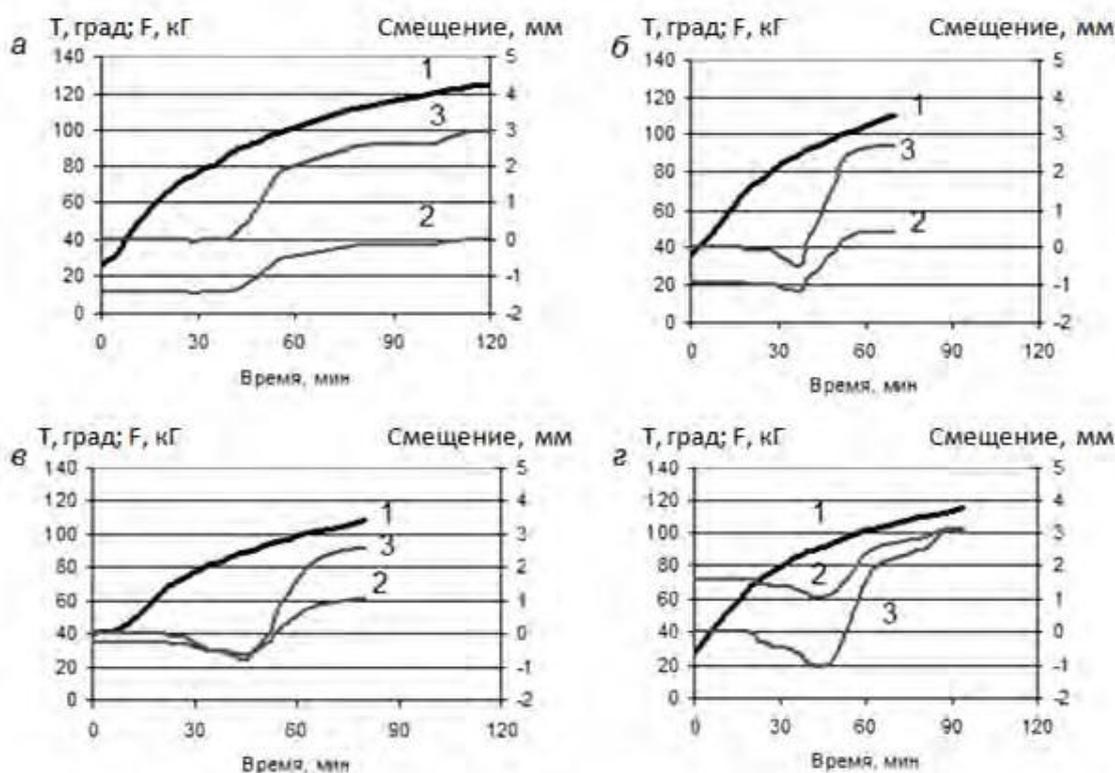


Рисунок 2.1 – Временная зависимость температуры T (1), силы противодействия эффекту памяти формы F (2) и смещения (3)

При нагрузке на КСПЭ в 72кГ (рис.2.1, г) деформационные процессы «протохода» начинаются, как и в предыдущих случаях, приблизительно на 20-й минуте. Однако, по сравнению с тремя первыми опытами, они идут интенсивнее, и отмеченная в предыдущих случаях первая стадия «протохода» не наблюдается. При этом смещение Δb два этапа достигает 1.1мм. Выше температуры 91°C развиваются процессы формовосстановления. Но, в отличие от предыдущих опытов, начало эффекта памяти формы развивается медленнее. Возможно, это является следствием протекания разнонаправленных деформационных процессов из-за изменения поля напряжения вдоль контура витка. В результате начального низкотемпературного деформирования кольцевых силовых пучковых элементов из-за увеличения кривизны

проволоки вблизи точек закрепления на внешней стороне витка материал находится в растянутом состоянии, а на внутреннем – в сжатом. В то же время вблизи равноудаленного положения от точек закрепления характер распределения напряжений по сечению проволоки будет иметь противоположный вид.

Отметим, что с ростом начального значения F_0 максимум Δ сдвигается в сторону повышенных температур. Если при $F_0=21\text{кГ}$ максимум «противохода» отмечен при 88°C , а при $F_0=35\text{кГ}$ экстремум соответствует 89°C , то при силе противодействия развитию деформации эффекта памяти формы, равной 72кГ , наибольшая величина Δ отмечена при 91°C .

Полученные результаты показывают, что величина «противохода» растет с повышением величины F_0 . На рисунке 2.2 показано, что соотношение $F_0 \propto \Delta$ на данном этапе исследований можно считать линейным.

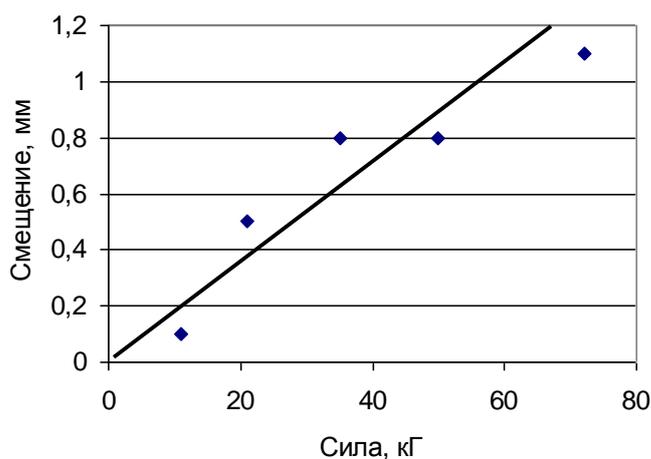


Рисунок 2.2 – Зависимость «противохода» от начальной силы взаимодействия контртела F_0 с КСПЭ

Наблюдение за работой ШерПа, помещенного в разогретый до температуры 110°C – 130°C термостат, показало, что деформационный процесс в этом случае монотонен. Опыт, проведенный с помощью ЛИНДа, даёт аналогичный результат. Из этого следует, что скорость нагрева может заметно влиять на деформационное поведение КСПЭ. На рисунке 2.3 приведены четыре режима изменения температуры в термостате. Начальная сила взаимодействия F_0 равнялась 72кГ . Как видно из временной зависимости смещений на рисунке 2.4, максимальная величина «противохода» соответствует третьему режиму нагрева ЛИНДа.

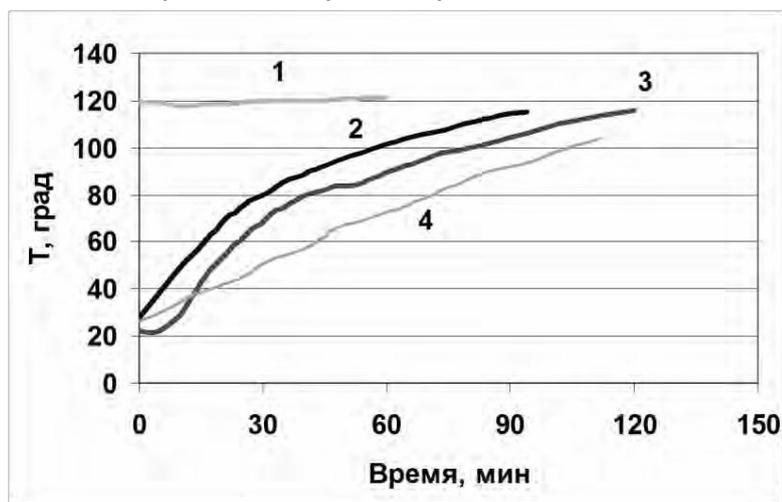


Рисунок 2.3 – Зависимость температуры термостата от времени

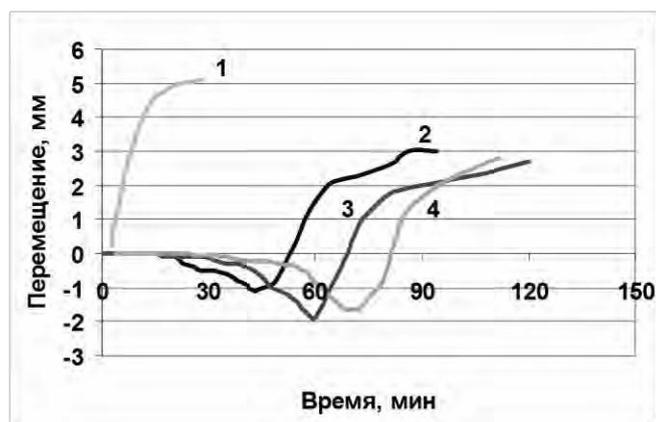


Рисунок 2.4 – Зависимость изменения расстояния между подвижными пластинами ЛИНДа от времени при разных режимах нагрева термостата

Анализ полученных результатов в рамках механизма остаточных напряжений ЭПФ показывает, что немонотонность деформационных процессов обусловлена температурной зависимостью упругих характеристик материала, неравномерностью полей деформаций и напряжений по объему КСПЭ, эволюцией поля температур и начальным напряженным состоянием, вызванным технологическими условиями эксплуатации «металлических мышц».

3. Оценка механических свойств КСПЭ

В первую очередь определили влияние степени пластического деформирования силовых элементов на формовосстановление в присутствии противодействия со стороны контртела. Пару КСПЭ из сплава $TiNi50.45at. \%$, изготовленную из проволоки диаметром 2мм, круговой замкнутой формы, состоящую из 5 витков и диаметром 63мм, деформировали растяжением. В результате круговое кольцо преобретало эллиптическую форму. Полученные «овалы» устанавливали в ЛИНД в вертикальном положении, таким образом, чтобы в процессе развития ЭПФ при нагреве силовые элементы преодолевали сопротивление контртела. При комнатной температуре их силовой контакт выводили на один уровень $\sim 640Н$. Затем ЛИНД устанавливали в термостат, разогретый до $138^{\circ}C$, и измеряли величину смещения верхнего края «овала» во время формовосстановления. При максимальной степени деформирования КСПЭ, когда расстояние наиболее удаленных точек «овала» составило 99мм, сближение подвижной и регулирующей (рис.1.5) в высокотемпературном состоянии составило 6.4мм (рис.3.1, кривая 1).

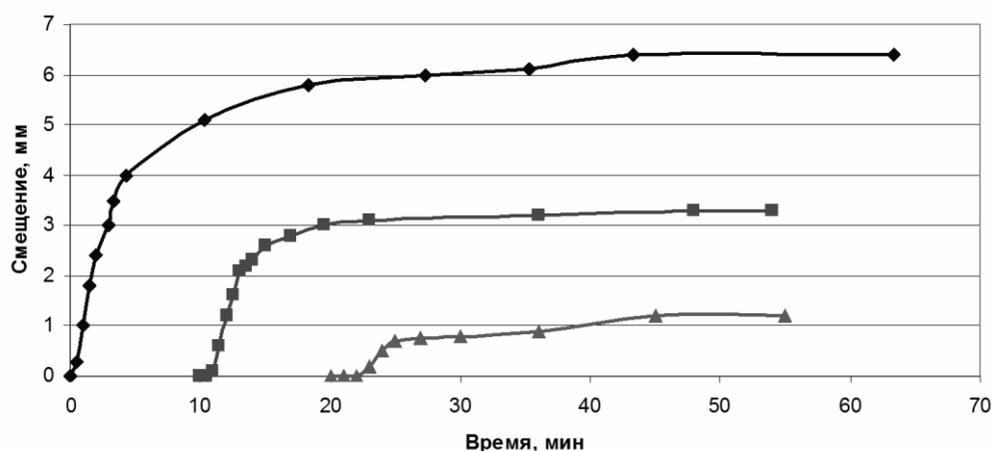


Рисунок 3.1 – Изменение расстояния между подвижными пластинами от времени при постоянном уровне начального противодействия контртела

При нагреве «металлических мышц» ($d_1=85\text{мм}$) было зафиксировано смещение в 3.3мм (рис.3.1, кривая 2). А при соответствующем начальном размере кольца в 82.5мм, формовосстановительный процесс обеспечил смещение чуть более 1мм. Таким образом, степень пластического деформирования даёт возможность наращивать деформационно-силовые характеристики КСПЭ.

Если же условия деформирования «металлических мышц» постоянны, то их возможности в формовосстановительном процессе ограничены силовыми характеристиками противодействующего объекта. На рисунке 3.2 показано, как с помощью стопорного цилиндра (6, рис.3.2) фиксируется начальная форма силовых элементов. При этом варьируется степень сжатия контртела и уровень воздействия на формовосстановительные процессы во время обратного мартенситного превращения.

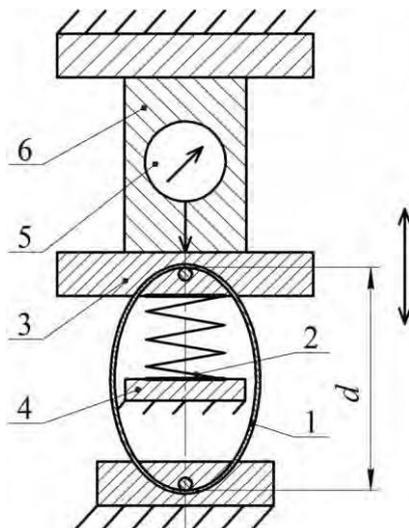


Рисунок 3.2 – Схема нагружения КСПЭ в динамометре ЛИНД: 1 – КСПЭ, 2 – контртело, 3 – подвижная пластина, 4 – регулирующая фиксируемая пластина, 5 – измерительная система, 6 – стопорный цилиндр, d – характеристический размер

На рисунке 3.3 приведены кривые роста смещений подвижной пластины со временем в зависимости от начальной силы противодействия деформационным процессам ЭПФ. Предварительно КСПЭ были продеформированы от диаметра 63мм до 85мм. При минимальной силе противодействия порядка 490Н (рис.3.3, кривая 1) и 637Н (рис.3.3, кривая 2) деформационные процессы начинались через 1мин и 1.5мин, соответственно. Возрастание противодействующей силы до 784Н продлило временную задержку деформационного процесса до двух минут, а при 931Н данный временной интервал достиг 4мин. Такое изменение времени старта ЭПФ вполне согласуется с результатами исследования сплава $TiNi$, приведенными в [5]. Так как для преодоления дополнительных сил сопротивления требуется некоторый перегрев материала. Эта задержка деформационного эффекта может носить негативный характер в технологических процессах. Ее регулирование может производиться за счет степени пластической деформации силовых элементов, как показано выше, или изменением химического состава с целью получения нужного интервала температур фазового перехода A_n-A_k [6].

Надо отметить, что изменение химического состава и геометрических параметров КСПЭ могут существенно влиять и на деформационно-силовые характеристики «металлических мышц». На рисунке 3.4 приведены два графика, полученные для силовых элементов из сплава $TiNi/50.45\text{ат.}\%$ с пятью кольцами из проволоки диаметром 2мм (кривая 1, рис.3.4) и сплава $TiNi/50.3\text{ат.}\%$ с четырьмя витками из проволоки диаметром 2.5мм (кривая 2, рис.3.4), соответственно.

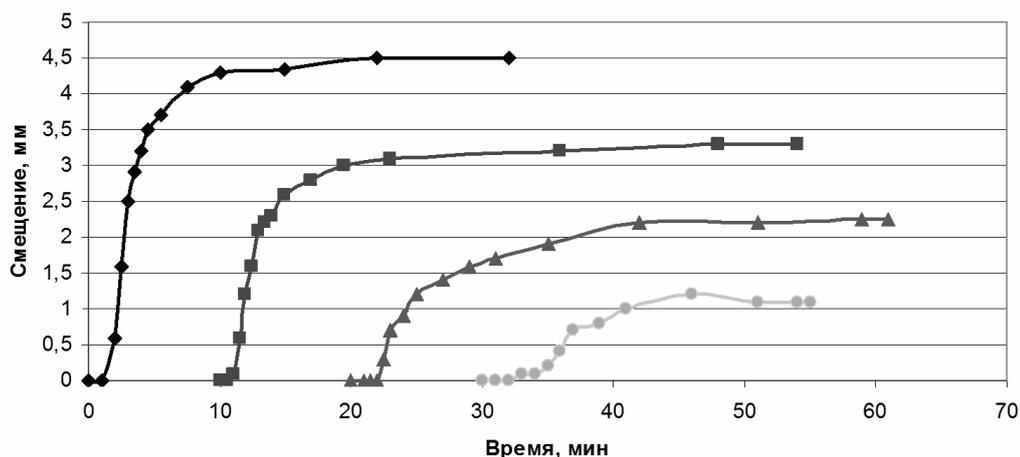


Рисунок 3.3 – Изменение расстояния между подвижными пластинами от времени при постоянной форме КСПЭ

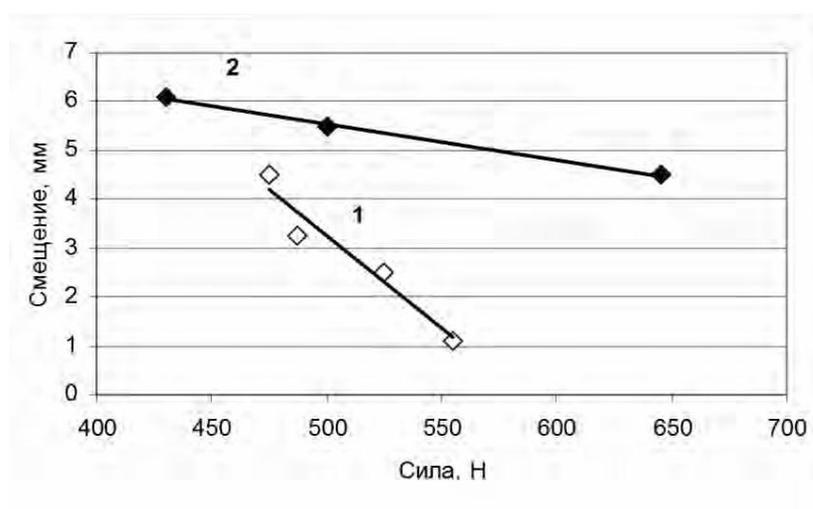


Рисунок 3.4 – Взаимозависимость деформационного эффекта и генерируемых усилий в результате развития ЭПФ в КСПЭ первой (1) и второй (2) пары

На графиках рисунка 3.4 приведена взаимосвязь генерации напряжений от деформационного эффекта памяти формы в условиях противодействия его развитию. Экстраполирование графиков влево показывает, в первом случае, при малых силах сопротивления, возможна высокая степень восстановления первоначальной формы силовых элементов. У второго варианта формовосстановление будет относительно невысоким. При высоких уровнях противодействия силовые элементы из сплава $TiNi_{50.3at.}\%$ показывают более высокие деформационные свойства.

4. Деформационно-силовые свойства КСПЭ и пластичность превращения

Данные, приведенные выше, показывают, что для повышения силовых характеристик «металлических мышц» необходим рост степени их пластической деформации. Этот простой, казалось бы, способ требует использования достаточно мощной техники, особенно, когда потребуются силовые элементы, развивающие усилия в несколько тонн. Обременение такими установками технологических линий, скорее всего, снизит конкурентоспособность оборудования, работающего на эффекте памяти формы.

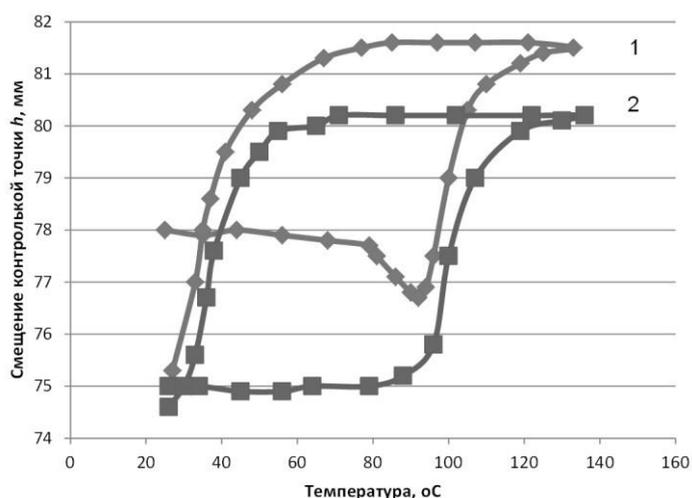


Рисунок 4.1 – Температурные зависимости положения контрольной точки в первом (1) и втором (2) термоциклах (а) при $F_0 \sim 500\text{Н}$

Выход из этой ситуации подсказывают результаты следующих опытов. В ЛИНДе были установлены два КСПЭ из сплава $TiNi50.3\text{ат.}\%$. Силовое взаимодействие с контртелом при комнатной температуре было доведено до $\sim 500\text{Н}$. При нагреве в термостате наблюдали явление «противохода», а затем, после 95°C , смещение контрольной точки демонстрировало развитие эффекта памяти формы. Конструктивные особенности ЛИНДа определили взаимосвязь положения контрольной точки h с характерным размером «овала» КСПЭ d следующим образом: $h=161-d$ (мм). В высокотемпературном состоянии КСПЭ сжимали стальную спираль контртела с усилием $\sim 850\text{Н}$ (кривая 1, рис.4.1). Во время охлаждения в состоянии пластичности превращения силовые элементы деформируются под воздействием стальной пружины. Контрольная точка смещается на 2.5мм относительно начального положения до нагрева, что привело к понижению уровня силового контакта до $\sim 250\text{Н}$. Восстановление уровня силового взаимодействия в 500Н поджатием спирали привело к дополнительному смещению контрольной точки на 0.5мм. В результате повторного нагрева деформационный эффект формовосстановления достиг 5мм, а сила сжатия контртела стала равной $\sim 1000\text{Н}$.

Для подтверждения вывода о возможности повышения деформационно-силовых свойств КСПЭ при термоциклировании была проведена серия опытов со стартовой силовой нагрузкой в $\sim 300\text{Н}$. Нагрев проводили до 138°C в термостате. Охлаждение до комнатной температуры велось на воздухе.

На рисунке 4.2, а (кривая 1) представлена зависимость положения контрольной точки от времени при нагреве ЛИНДа в термостате (кривая 2, рис.4.2, а) после активного деформирования КСПЭ в мартенситном состоянии. Начальная сила взаимодействия F_0 «металлических мышц» с контртелом в опыте была равна 294Н. После достижения термостатом температуры 80°C начинается изменение положения контрольной точки. При этом в интервале температур $80^\circ\text{C}–93^\circ\text{C}$ наблюдали увеличение параметра d . Происходит ослабление силового взаимодействия КСПЭ и контртела до 235.2Н. После 93°C изменяется направление смещения контрольной точки, обусловленное развитием эффекта памяти формы. Силовое взаимодействие «металлических мышц» с контртелом на этом этапе нарастает, а стальная спираль сжимается. В течение 30мин сила взаимодействия контртела и КСПЭ достигает 509.6Н. После этого рост силовых характеристик существенно замедляется. Температура в течение 116мин медленно увеличивается. К окончанию нагрева F достигает 578.2Н.

В процессе охлаждения в изотермических условиях ($\sim 23^\circ\text{C}$) контртело, деформируя силовые элементы, смещает контрольную точку к отметке 80.25мм. При этом, с возрастанием d происходит ослабление силового взаимодействия до 142.1Н.

Регулировочным винтом производится поджатие пружины до начального уровня F_0 при комнатной температуре. При этом d возрастает на 0.95мм. Изменение h во втором термоцикле приведено на рисунке 4.2, б. В отличие от первого нагрева, при температурах 80–88°C отмечено возрастание d лишь на 0.2мм. Дальнейшее повышение температуры сопровождается формоизменением, обусловленным эффектом памяти формы. При этом h достигает величины 84мм, что доводит силовое взаимодействие КСПЭ и пружины до 754.6Н. Это значительно выше максимального значения F в первом термоцикле. При остывании под воздействием упругой пружины силовые элементы деформируются до величины h , равной 78мм. Изменение h в термоцикле составило 1.3мм, а сила взаимодействия уменьшилась относительно F_0 на 127.4Н. Очередная коррекция силового взаимодействия с доведением F до 294Н приводит к изменению h на 0.2 мм.

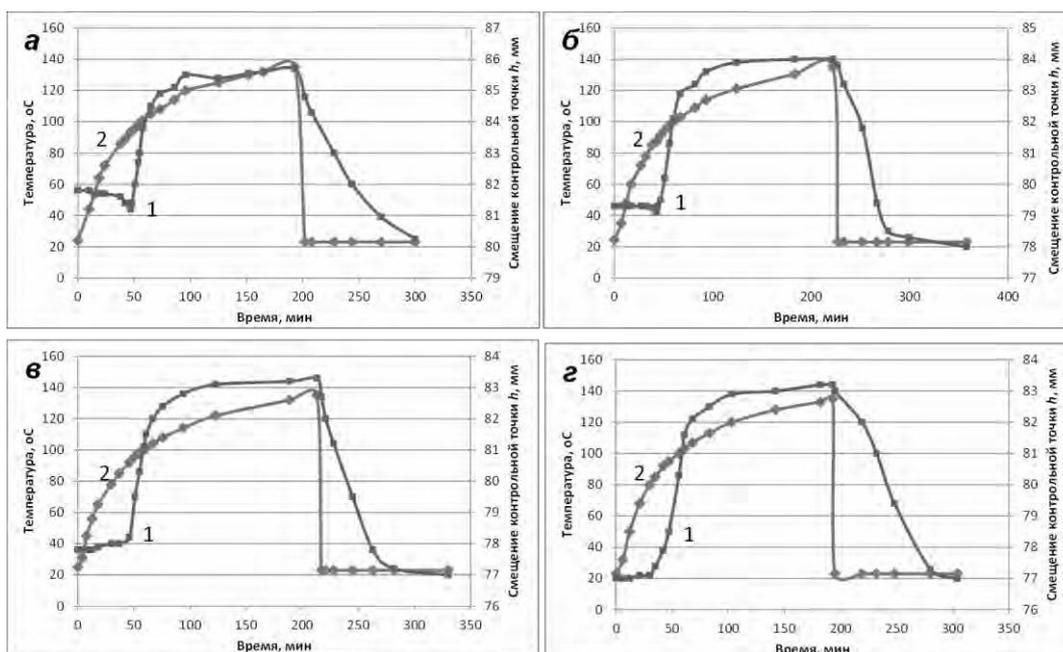


Рисунок 4.2 – Временная зависимость смещения контрольной точки h (1) и температуры (2) в первом (а), втором (б), третьем (в) и четвертом (г) термоциклах при $F_0 = 294$ Н

Во время третьего нагрева (рис.4.2, в) не наблюдали деформационные эффекты, приводящие к росту d . Деформация КСПЭ во время реализации эффекта памяти формы доводит силовое взаимодействие F до 833Н. А в процессе охлаждения силовые элементы вновь вытягиваются в вертикальном направлении во время прямого превращения. Величина h становится равной 77мм, а $F = 215.6$ Н.

При доведении силового взаимодействия КСПЭ с контртелом до F_0 изменение величины h не превысило 0.05 мм. В четвертом цикле нагрев-охлаждение (рис.4.2, г) наблюдали развитие эффекта памяти формы с ростом усилия в «металлических мышцах» до 911.4Н. При охлаждении исходное положение контрольной точки и начальный уровень силового взаимодействия F_0 были восстановлены. В пятом термоцикле деформационно-силовое взаимодействие КСПЭ и контртела не отличалось от предыдущего.

Таким образом, показано, что в результате деформирования КСПЭ в состоянии пластичности превращения, можно повышать их силовые характеристики.

5. Температурный фактор в управлении деформационно-силовыми характеристиками КСПЭ из сплава $TiNi$

Результаты наблюдения за деформационными процессами, происходящими в «металлических мышцах» при термоциклировании с переходом материала из мартенситного состояния в аустенитное и обратно, обратили внимание на существенную особенность. После активного деформирования КСПЭ в

низкотемпературном состоянии во время нагрева в присутствии сил, противодействующих развитию процесса ЭПФ, наблюдается явление «противохода», то есть «овалы» силовых элементов еще более вытягиваются. Затем начинается противоположный по направлению формовосстановительный процесс. После деформирования КСПЭ в состоянии пластичности превращения «противоход» после первого термоцикла резко уменьшается (рис.4.2), а после второго исчезает. Таким образом, можно предполагать, что деформирование силовых элементов при подготовке к работе в разных температурных условиях позволит варьировать их деформационно-силовые свойства. В пользу этого говорят и результаты исследований деформационных эффектов в сплаве $TiNi$ при частичном переводе материала в низкотемпературное состояние [7, 8].

Опыты проводили на КСПЭ из проволоки диаметром 2мм. Материал проволоки – сплав $TiNi/50.6$ ат.%. Силовые элементы состояли из пяти витков. Для стабилизации температурных интервалов мартенситных превращений КСПЭ использовали в 33-х технологических термоциклах. Прямое мартенситное превращение такого сплава находится вблизи 273К-293К.

Были проведены три серии экспериментов. В первой серии термоциклирование проводили в интервале температур от 299К до 403К, во второй – от 279К до 403К, в третьей – от 271К до 403К. Деформирование КСПЭ проводили при минимальной температуре термоцикла, изменяя силовое взаимодействие со стальной пружиной контртела. Перед этим «металлические мышцы» вместе с ЛИНДом выдерживались в постоянных температурных условиях не менее 10 часов. Нагрев проводили в аналогичном режиме, приведенным на рис.4.2.

Графики на рисунке 5.1 иллюстрируют развитие деформационных процессов при силовом взаимодействии КСПЭ с контртелом на уровне 250Н. Аналогичные кривые для уровня силового контакта в 430Н приведены на рисунке 5.2. Кривые 1 на рисунке 5.1 и 5.2 показывают изменение во времени Δ при минимальной температуре термоцикла в 299К. В отличие от двух других температурных интервалов термоциклирования в данном случае деформационные процессы начинаются одновременно с нагревом установки ЛИНД в термостате независимо от значения F . Различие в изменении параметра Δ при нагреве для этих опытов невелико. Деформационные эффекты формовосстановления КСПЭ на этапе повышения температуры от 279К (кривые 2, рис.5.1 и рис.5.2) и от 271К (кривые 3, рис.5.1 и рис.5.2) существенно больше. А процесс интенсивного деформирования начинается через 20–30мин после начала нагрева. При силовом взаимодействии с контртелом ~250Н на этапе роста температуры

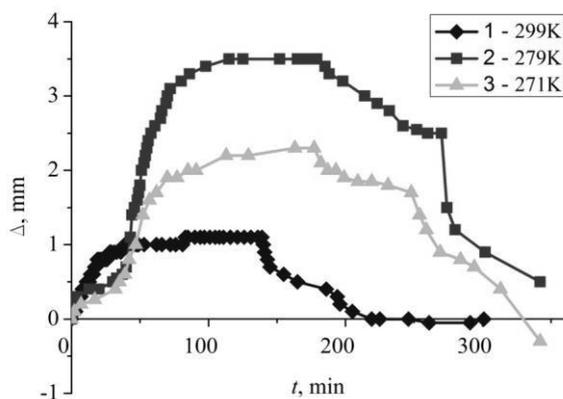


Рисунок 5.1 – Развитие ЭПФ в течение времени при нагрузке ~ 250Н

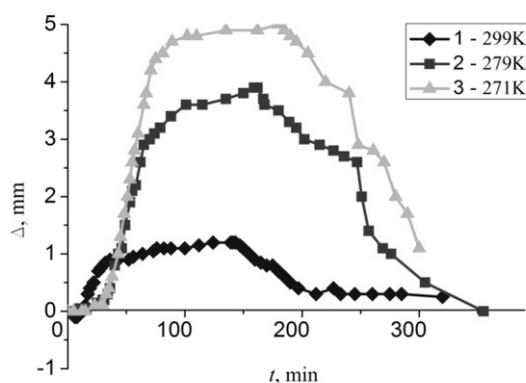


Рисунок 5.2 – Развитие ЭПФ в течение времени при нагрузке ~ 430Н

от 271К в результате эффекта памяти формы Δ достигает величины 2.3мм (кривая 3, рис.5). В аналогичной ситуации после деформирования КСПЭ при 279К значение Δ достигает 3.5мм (кривая 2, рис.5.1). Иное соотношение параметров формовосстановления при силовом контакте «металлических мышц» и контртела ~

430Н. При нагреве силовых элементов от 279К максимальное значение Δ равно 4мм (кривая 2, рис.5.2). А после деформирования КСПЭ при 271К отогрев приводит к росту Δ до 5мм (кривая 3, рис.5.2). Таким образом, при меньшем усилии противодействия развитию эффекта памяти формы нагрев от 279К дает большую степень восстановления формы по сравнению с термоциклом, имеющим минимальную температуру 271К. А при усилии ~ 430 Н соотношение значений Δ противоположное.

В отличие от исследований, проводимых на традиционных образцах, деформирование «металлических мышц» данной конструкции вызывает индивидуальное распределение полей напряжений и деформаций почти в каждом проволоочном сечении. По-видимому, и соотношение аустенитной и мартенситной фаз во всех трех случаях различно. При 299К по данным, приведенным в [6], материал может находиться полностью в аустенитном состоянии. В пользу этого можно привести зависимости d_1 от приложенной силы F , полученные в изотермических условиях (рис.5.3). Кривая 1 на рис.5.3 показывает почти линейную взаимозависимость F и d_1 при 403К. Близкий к линейному является и соотношение этих параметров при 299К. Однако, при 299К коэффициент пропорциональности линейной зависимости F от d_1 почти в 2 раза меньше. Это может быть результатом «дефекта» модуля упругости отмечаемого в никелиде титана вблизи температур превращения [9]. В отличие от первых двух кривых, указывающих на высокотемпературное состояние материала, графики, отражающие соотношение F и d_1 при температурах 279К (кривая 3, рис.5.3) и 271К (кривая 4, рис.5.3), оказались намного сложнее. Участки взаимосогласованного роста d_1 и F чередуются с наличием «площадок текучести», когда d_1 увеличивается при почти постоянном значении F . Их можно наблюдать на кривой 3 (рис.5.3) при $F \sim 250$ Н и при $F \sim 590$ Н. На кривой 4 (рис.5.3) такой участок отмечается при $F \sim 440$ Н. По-видимому, наличие такой «площадки текучести» при $F \sim 250$ Н привело к тому, что в данном силовом взаимодействии КСПЭ с контртелом формовосстановление после деформирования при 279К оказывается значительней эффекта, полученного после нагружения силовых элементов при 271К (рис.5.1). Такое соотношение деформационных эффектов сохраняется до уровня начального силового воздействия на КСПЭ в 330Н (кривая 2, рис.5.4).

Дальнейший рост начальной нагрузки на «металлические мышцы» приводит к тому, что формовосстановление при нагреве от 271К становится больше (кривая 3, рис.5.4). Кривая 1 на рисунке 5.4 показывает, что при нагружении КСПЭ при 299К деформационный эффект варьируется от 1мм до 1.8мм. Таким образом, генерация дополнительного усилия варьируется от 100Н до 175Н. Это может быть использовано в технологических процессах, требующих строгого ограничения силового воздействия на обрабатываемые объекты.

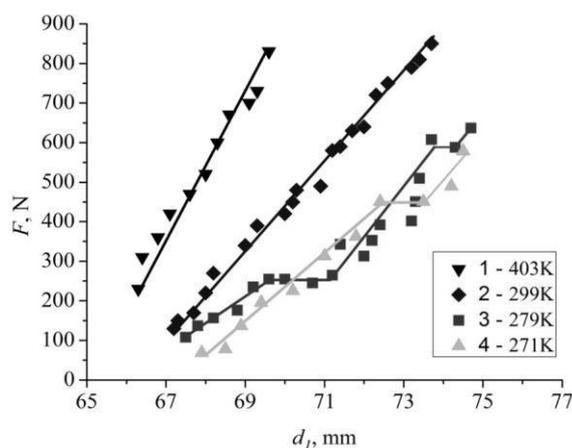


Рисунок 5.3 – Взаимозависимость размера d_1 и растягивающего усилия F

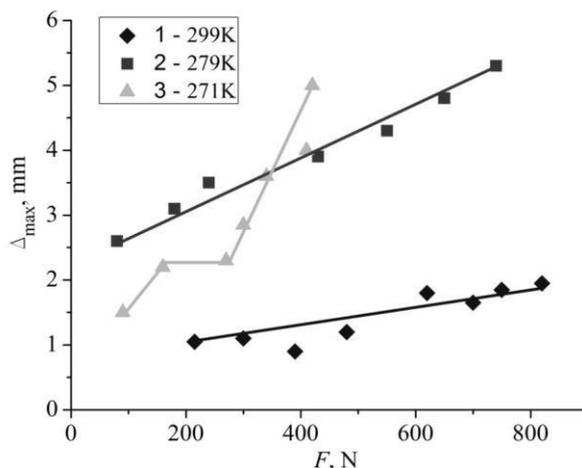


Рисунок 5.4 – Зависимость максимального значения параметра Δ от начального усилия F_0 при термоциклировании

Из полученных результатов следует подтверждение возможности варьирования деформационно-силовых характеристик КСПЭ изменением температуры их подготовки к технологическим процессам. Эта универсализация возможностей пары силовых элементов в перспективе может повышать рентабельность технологий, использующих ЭПФ.

6. Кольцевые силовые ленточные элементы

Наряду с КСПЭ в установках типа ШеР можно использовать ленточную конструкцию силовых элементов (рис.6.1).

Экспериментальные кольцевые силовые ленточные элементы (КСЛЭ) в ненагруженном состоянии представляют собой замкнутое кольцо круглой формы с внутренним диаметром $d_1=63$ мм, выполненные из полосы толщиной 1.5мм и шириной 11.5мм. Материал образца – сплав $TiNi49.9$ ат.%. Масса одного образца составляет ~23г.

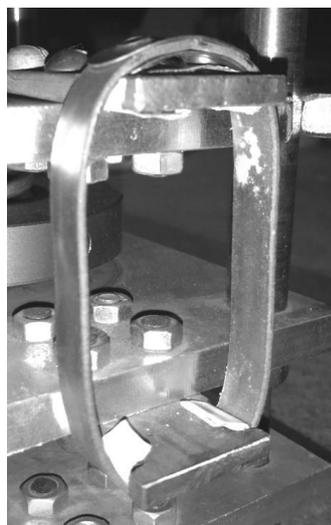


Рисунок 6.1 – Внешний вид КСЛЭ в нагруженном состоянии

Во время испытаний ленточных «металлических мышц» определили силовые и деформационные возможности КСЛЭ. В первом термоцикле ленточные силовые элементы в начальный момент при комнатной температуре взаимодействовали с контртелом с силой $F_0 \sim 800$ Н. В результате этого КСЛЭ приняли форму вытянутого овала с $d_1=73.8$ мм.

Установив ЛИНД в камеру термостата, предварительно разогретую до температуры 130°C, вели наблюдение за изменением характеристического размера Δ и температурой (рис.6.2). Максимальное смещение параметра Δ зафиксировано на 50 минуте. Удлинение «овала» достигло в этот момент времени 1мм (кривая 1, рис.6.2). Затем, величина Δ снизилась, остановившись на уровне равном 0.2мм. Отмеченный деформационный эффект обусловлен «дефектом» модуля упругости [9]. Поскольку эффект памяти формы отсутствовал, надо полагать, что предварительное деформирование КСЛЭ при комнатной температуре было чисто упругим. Остаточная величина $\Delta=0.2\text{мм}$ напоминает слабую форму пластичности превращения, которая в полной мере проявилась во время прямого фазового перехода. Охлаждение ЛИНДа проводили на воздухе при комнатной температуре ~25°C. При этом значение d_1 возросло на 4.2мм (рис.6.3).

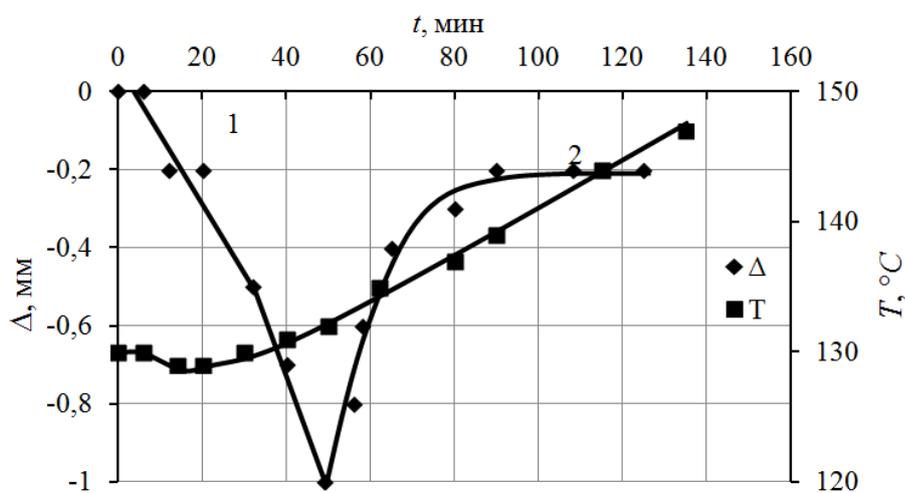


Рисунок 6.2 – Изменение Δ и температуры во время нагрева при $F_0 \sim 800\text{Н}$

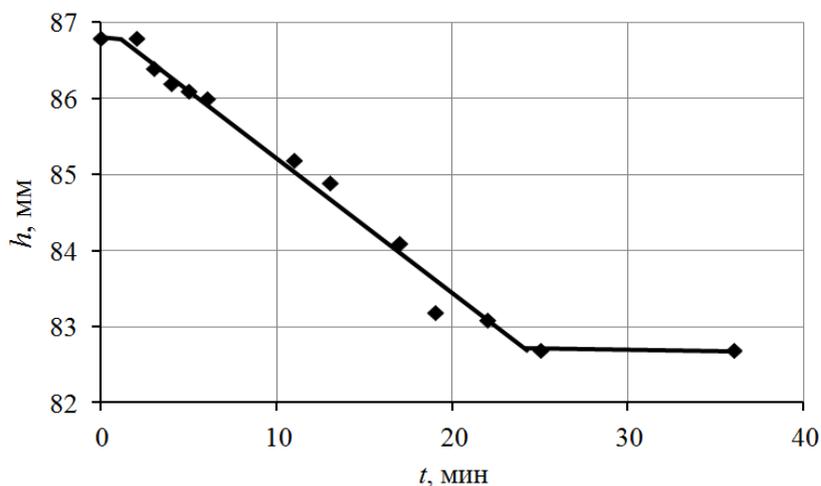


Рисунок 6.3 – Зависимость положения контрольной точки h от времени в процессе охлаждения в первом термоцикле

Во время второго термоцикла, который проводился от комнатной температуры до 147°C, развитие ЭПФ отмечено в интервале температур от 115°C до 135°C (кривая 1, рис.6.4). Режим нагрева представлен на рис.4.2. Охлаждение проводилось при комнатной температуре. При этом изменение геометрических параметров КСЛЭ соответствовало графику, полученному в первом термоцикле (рис.6.3).

Во время третьего термоцикла нагрев и охлаждение проводили в камере термостата. Деформация ЭПФ, как и в предыдущем опыте, развивалась в интервале температур 115°C–135°C (кривая 2, рис.6.4). Формоизменение «металлических мышц»,

обусловленное состоянием пластичности превращения сплава $TiNi$ и силовым воздействием на КСЛЭ со стороны контртела, происходило при охлаждении от 60°C до 40°C (кривая 3, рис.6.4).

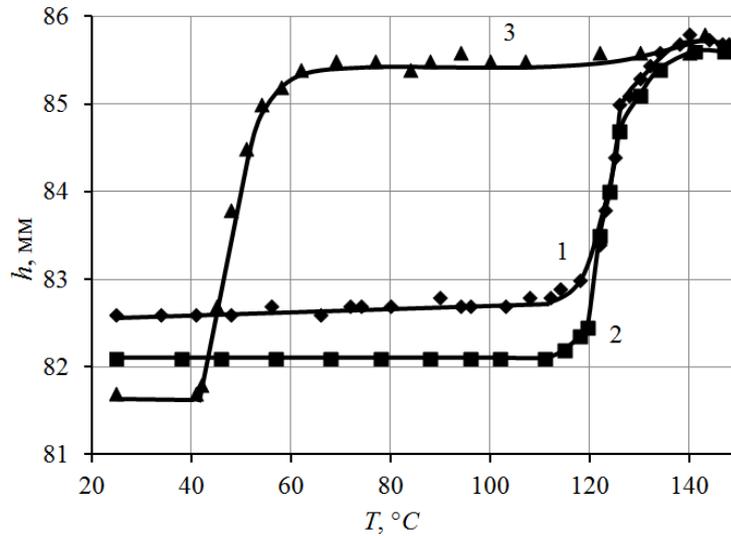


Рисунок 6.4 – Зависимость положения контрольной точки h от T во 2 и 3 циклах

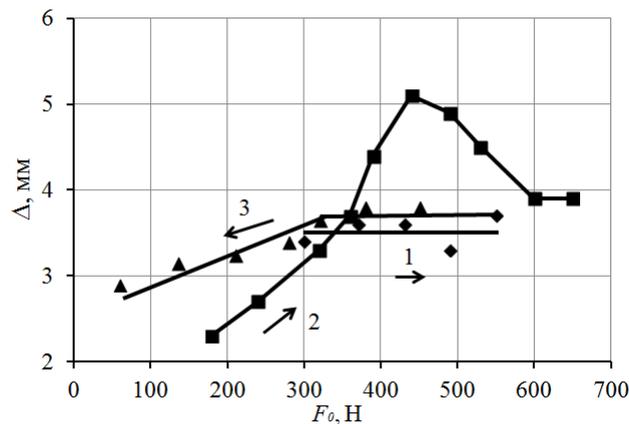


Рисунок 6.5 – Зависимость максимального значения параметра Δ от начального силового воздействия F_0 для КСЛЭ (1, 3), КСПЭ $TiNi50.45\text{ат.}\%$ (2)

В результате деформационных процессов, происходивших в течении трех термоциклов, силовое взаимодействие исследуемых образцов со спиральной пружиной при комнатной температуре установилось на уровне ~ 300 Н. В следующих пяти термоциклах увеличивали значение F_0 с 300 Н до 550 Н. На рис.6.5 кривая 1 показывает, что в этом диапазоне начальных силовых нагрузок на КСЛЭ формовосстановление, обусловленное эффектом памяти формы, в отличие от КСПЭ, почти постоянно. На проволочных силовых элементах из сплава $TiNi50.45\text{ат.}\%$ в аналогичных условиях деформации ЭПФ немонотонны (кривая 2, рис.6.5). Максимальное значение $\Delta \sim 5$ мм соответствует $F_0 \sim 440$ Н. Третий график на рис.6.5 показывает, что в случае постепенного понижения F_0 от 550 Н до 320 Н в следующих 3 циклах характеристика формовосстановления остается почти на прежнем уровне ~ 3.7 мм. Дальнейшее понижение F_0 вызывает заметный спад силовых возможностей ленточных «металлических мышц» (кривая 3, рис.6.5).

Таким образом, полученные результаты демонстрируют близость деформационно-силовых характеристик ленточных и пучковых силовых элементов. Нескольку уступая КСПЭ в деформационных свойствах, КСЛЭ достигают приблизительно того же уровня силовых возможностей на единицу массы. Коэффициент $K_{Fm} = F_{max}/m$ (где F_{max} – максимальное значение генерируемой силы, m – масса силового элемента) достигает величины ~ 20 Н/г, что сравнимо с

соответствующей характеристикой КСПЭ. Поэтому, кольцевые силовые ленточные элементы могут быть использованы в устройствах типа Шер.

7. Спиральные силовые элементы.

Во время разработки Шеров в качестве одного из вариантов рассматривалась возможность применения силовых элементов в виде спирали (рис.7.1). Главным достоинством этой конструкции является возможность изменения высоты спирали на 100% и более [10].

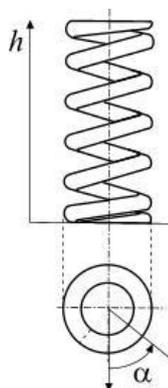
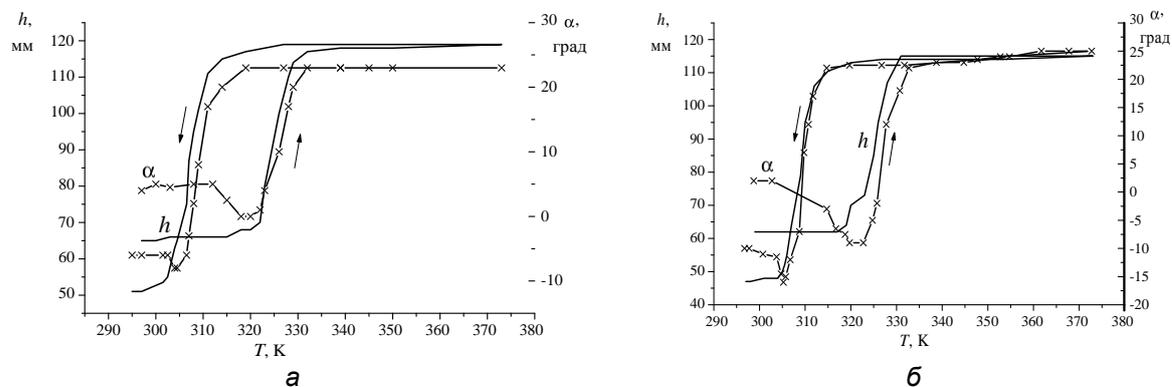


Рисунок 7.1 – Спираль из сплава $CuZnAl$

Для проведенных исследований спиральные образцы были изготовлены из проволоки сплава $CuZn18Al7$. Диаметр проволоки равен 4мм, высота спирали в состоянии плотного прилегания витков составляла от 42мм до 48мм. Внешний диаметр спирального цилиндра был равен ~ 20 мм. Для стабилизации температурных интервалов превращения образцы термоциклировали с переходом из низкотемпературного фазового состояния в высокотемпературное и обратно 3 раза. Скорость изменения температуры в процессе нагрева спирали поддерживали равной 1К/мин. Испытания образца в присутствии внешней нагрузки чередовали с термоциклами в разгруженном состоянии.

Определяли деформационно-силовые характеристики спиральных образцов во время термоциклирования. Нагрузка, препятствующая развитию деформаций эффекта памяти формы, прикладывалась к спирали при комнатной температуре перед нагревом и была постоянной в течении всего термоцикла. Фиксировали температурную зависимость высоты образца и угол поворота его верхнего витка относительно основания.

На рисунке 7.2 показаны температурные зависимости h и α при термоциклировании под воздействием разных нагрузок.



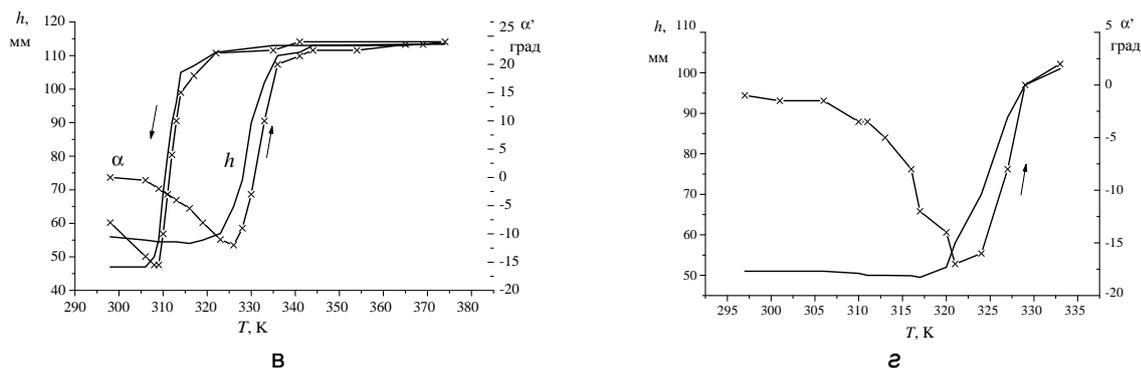


Рисунок 7.2 – Поведение спирали в условиях действия сжимающих усилий 8.0Н (а), 15.4Н (б), 23.8Н (в) и 29.4Н (г)

В отличие от ситуации без нагрузки, когда во время нагрева наблюдали монотонное изменение α [11] (с ростом h спираль закручивалась против часовой стрелки), вращение верхнего витка меняло направление. Уже при минимальной нагрузке, порядка 8Н (рис.7.2, а), начальное вращение происходит по часовой стрелке в температурном интервале от 310 до 320К. И лишь с началом роста h вращение верхнего витка меняет свое направление на противоположное. При охлаждении также обнаруживаем минимум на кривой температурной зависимости α при 304К (рис.7.2, а).

При повышении нагрузки до 15.4Н качественно картина не меняется, но угол поворота по часовой стрелке превысил 10° (рис.7.2, б). Кроме этого, после охлаждения высота спирали стала меньше, т.к. под воздействием данной нагрузки витки стали плотно прилегать друг к другу.

Повышение силы противодействия процессам ЭПФ до 23.8Н (рис.7.2, в) заметно изменило температуру начала вращения по часовой стрелке. Это движение началось при температуре 305К. Одновременно с поворотом было отмечено уменьшение h на 1.5мм к 317К. В этом случае рост высоты спирали начинался медленнее. При этом некоторое время продолжалось вращение по часовой стрелке. Таким образом, закручивание спирали (вращение против часовой стрелки) началось при более высокой температуре (326К).

Усилие в 29.4Н (рис.7.2, г) привело к разрушению спирали. После поворота на 17° по часовой стрелке в интервале от 305К до 321К, с началом роста h и противоположного вращения, произошло разрушение образца. Температура в момент разрушения достигла 330К.

Испытание десяти спиральных образцов показали, что максимальные нагрузки, при которых не происходит их разрушения при нагреве, не превышают 50Н. Следовательно, на грамм конструкции силового элемента возможна силовая нагрузка не более 1Н. Кроме этого, изготовление спиралей является более сложной технической задачей в сравнении с изготовлением КСПЭ и КСЛЭ. Это определило выбор кольцевых силовых элементов в качестве приводов в конструкции ШеРов.

Заключение

Опыт использования ШеРов, полученный в производственных условиях, и результаты исследований силовых элементов, проведенных в динамометре ЛИНД, показывают наличие перспектив внедрения материалов с ЭПФ в технологические процессы. Однако, параллельно с разработкой конструкций и производственных операций, использующих ЭПФ, необходимо решать проблемы по разнообразию выпускаемого сортамента материалов с памятью формы и повышению точности их химических композиций.

Список литературы:

1. Материалы с эффектом памяти формы: Справ. изд. / С.П. Беляев, А.Е. Волков, В.А. Ермолаев и др. / под ред. В.А. Лихачева – Т.4. – СПб: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998. – 268 с.

2. Эффект памяти формы в сплавах. / Пер. с англ. Л.М. Бернштейна / под ред. В.А. Займовского – М.: Металлургия, 1979. – 472 с.
3. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы: в 14 томах. Имплантаты с памятью формы в сосудистой хирургии. Т.10. / О.А. Ивченко, В.Э. Гюнтер, Г.Ц. Цамбаев, А.О. Ивченко и др. / под ред. В.Э. Гюнтера – Томск: Изд-во МИЦ, 2012. – 178 с.
4. Ю.Н. Вьюненко. Применение ЭПФ в производстве слоистых материалов / Перспективные материалы и технологии: сб.статей Междунар. науч. симпозиума – Витебск: УО «ВГТУ», 2011. – С.182-184.
5. Сплавы никелида титана с памятью формы. Ч.1. Структура, фазовые превращения и свойства / В.Г. Пушин, С.Д. Прокошкин, Р.З. Валиев и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 439 с.
6. И.М. Корнилов, Е.В. Качур, О.К. Белоусов. Дилатометрическое исследование превращения в соединении $TiNi$. / ФММ – Т.32, №2. 1971. – С.420-421.
7. Ю.И. Паскаль, Л.А. Монасевич. Закономерности гистерезиса мартенситного превращения никелида титана / ФММ – Т.52, №5. 1981. – С.1011-1016.
8. С.П. Беляев, М.Ю. Демина, Л.Н. Курзенёва. Эффект памяти формы в $TiNi$ при термоциклировании внутри температурного интервала мартенситно-аустенитного превращения / Вест. Тамб. Универс. – Т.3, вып.3. 1998. – С.300-301.
9. Ю.Н. Вьюненко, Б.С. Крылов, В.А. Лихачев, Ю.И. Мещеряков, А.И. Недбай. Исследование внутреннего трения в никелиде титана / ФММ – Т.49, №5. 1980. – С.1032-1038.
10. Ю.Н. Вьюненко, Г.З. Затульский. Деформационное поведение спирали из сплава $CuZnAl$ вблизи температур мартенситных превращений / XVII Петербургские чтения по проблемам прочности. (Санкт-Петербург, 10-12 апреля 2007г.): сб. материалов – Ч.II. Санкт-Петербург, 2007. – С.237-240.
11. П.Н. Журбенко, Г.З. Затульский, А.А. Носковец, Ю.Н. Вьюненко. Особенности деформационного поведения спиралей из сплава $CuZn18Al7$ в процессе развития эффекта памяти формы / XXI Петербургские чтения по проблемам прочности. К 110-летию со дня рождения Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова. Санкт-Петербург, 15-17 апреля 2014г.: сб. материалов – СПб.: Соло, 2014. – С.152-154.