

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ОБРАТИМУЮ ПАМЯТЬ ФОРМЫ В КОЛЬЦЕВЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА****Хлопков Е.А.<sup>1</sup>, Макарова Т.А.<sup>1</sup>, Белоусов Н.Н.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, [hlopkovelisey@mail.ru](mailto:hlopkovelisey@mail.ru)<sup>2</sup> Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк,

В настоящее время существует большое количество конструкций и моделей устройств, действующих на эффекте памяти формы (ЭПФ) [1]. Однако в технологических процессах изготовления серийных изделий эффективно применяется лишь пресс Шер [2]. Приводами такого малогабаритного оборудования являются кольцевые силовые пучковые элементы (КСПЭ), способные развивать усилия до 1200 Н в операционном цикле. В работе [3] показано как с помощью технологии сваривания концов материала кольцевых силовых элементов (КСЭ) расширили возможности технологического процесса. Замкнутый таким образом проволочный контур позволил производить работу не только с развитием ЭПФ, но и в процессе эффекта обратимой памяти формы (ОПФ). Была предложена схема наращивания ОПФ многократным термоциклированием образца по заданному режиму [3, 4]. В работе [5] показано, как с помощью деформирования при разных температурах интервала прямого мартенситного превращения изменялись деформационно-силовые характеристики КСПЭ. В рамках данной работы проведена оценка возможностей регулирования деформационных свойств в развитии процесса обратимой памяти в сварных кольцах при термоциклировании от температуры  $M_m$  до  $A_{sup}$ , где  $M_s \leq M_m \leq M_f$  до  $A_{sup} > A_f$  (где  $M_s$  и  $M_f$  – температуры начала и конца прямого мартенситного превращения соответственно,  $A_f$  – температура окончания обратного фазового перехода). Рассмотрено влияние величины активной деформирующей силы на степень формоизменения образцов во время охлаждения до температур  $M_m$  и ниже  $M_f$ .

Деформирование образца в условиях пластичности превращения проводили с помощью спиральной пружины (рис.1). Сварные кольца диаметром ~ 62мм были изготовлены из сплава TiNi. Охлаждение происходило в изотермических условиях при температурах холодильных камер 270 К – внутри интервала  $[M_s; M_f]$ , 255 К – ниже  $M_f$  (рис.1, положение 3). Нагрев КСЭ осуществляли без нагрузки в термостате. Температура в камере составляла 430 К (выше  $A_f$ ) (рис.1, положение 4). При этом первоначальная форма восстанавливалась полностью. На следующем за нагревом этапе остывания следили за величиной ОПФ (рис.1, положение 4). После первого описанного термоцикла делали несколько тренировочных теплосмен под нагрузкой на стадии понижения температуры и свободного развития ЭПФ во время нагрева. Затем повторяли наблюдения за деформационным процессом обратимой памяти формы. Проведены испытания 3 колец с разным уровнем начальной величины тренировочного усилия в каждом цикле: 8,2 Н, 18,8 Н, 32,7 Н.

На рис.2. показано как изменяется при термоциклировании размер колец вдоль оси деформирования в процессе ОПФ в заданных режимах. В трудах [3, 4] авторы отмечали рост обратимой памяти формы в изделиях из никелида титана при термоциклировании в режиме с полным превращением, что подтверждается и кривыми на рис.2, б. При усилии  $F = 8,2$  Н на протяжении 28 циклов наблюдали почти линейный подъем значений ОПФ. Повышение силового воздействия до 18,8 Н привело к выходу на насыщение процесса наращивания деформаций ОПФ, начиная с 10 цикла. А при усилии 32,7 Н характеристики деформационных явлений практически совпали с соответствующими величинами процесса при  $F = 18,8$  Н. В случае, представленном на рис 2, а, когда деформация пластичности превращения при термоциклировании развивается с нижней температурной границей внутри интервала прямого фазового перехода, рост обратимой памяти формы во всех случаях прекращается после достижения некоторой величины. Затем происходит спад значений характеристик ОПФ. При дальнейшем термоциклировании наблюдается немонотонное изменение параметров кольцевых силовых элементов при охлаждении в условиях развития ОПФ.

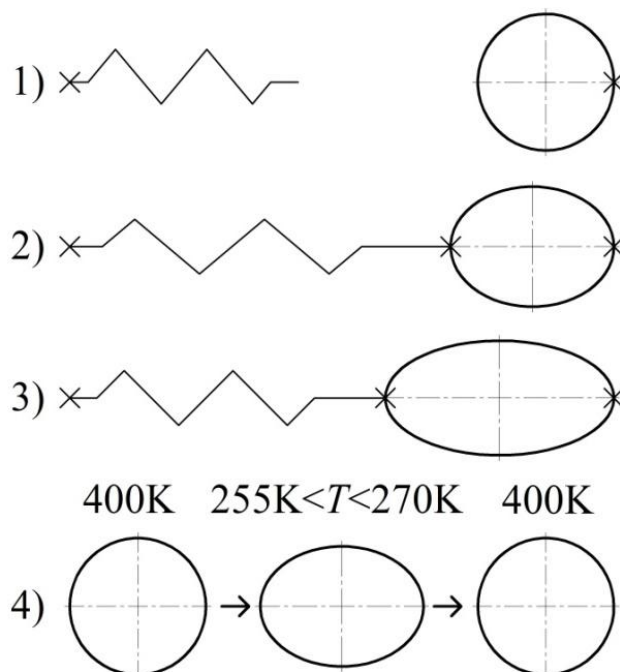


Рисунок 1 - Схема наращивания обратимой памяти формы КСЭ:  
 1 – КСЭ до нагружения, 2 – КСЭ в момент нагружения в аустенитном состоянии,  
 3 – КСЭ после деформации пластичности прямого превращения,  
 4 – реализация обратимой памяти формы КСЭ

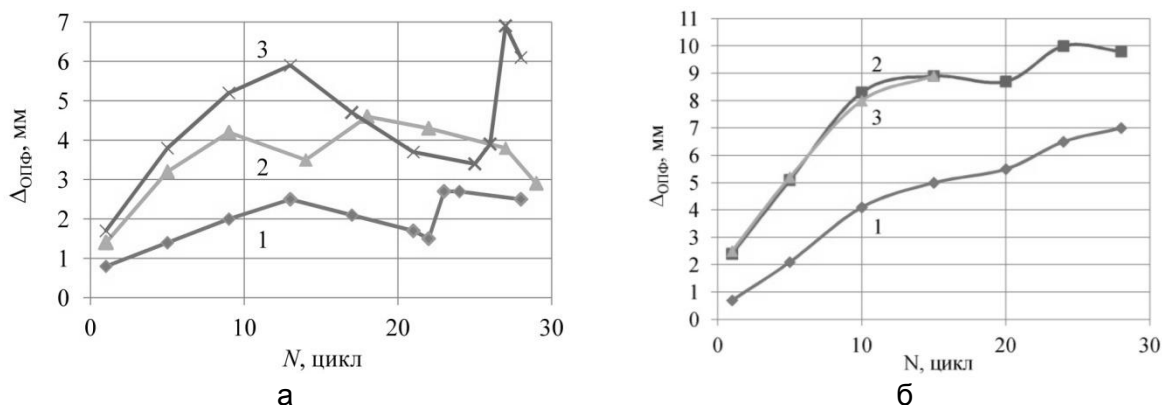


Рисунок 2 - Циклическое изменение величины обратимой памяти формы при подготовке с усилием  $F$ : 1 - 8,2 Н, 2 - 18,8 Н, 3 - 32,7 Н; и температурах термоциклов: а - 270 К, б - 255 К

Кривые на рис.3 демонстрируют характер формоизменений кольцевых силовых элементов, вызванный деформациями пластичности превращения, при термоциклировании. Отметим, что спады обратимой памяти формы (рис.2, а) происходят при росте формоизменений овалов, обусловленного пластичностью прямого превращения, во время охлаждения с нагрузкой. После 16 термоцикла образец, подготавливаемый к ОПФ с усилием 32,7 Н, разрушился в зоне сварки в результате нагружения в аустенитном состоянии. Ресурс КСЭ до выхода из строя составил 73 срабатывания, что значительно меньше получаемого с помощью замкнутых механическим способом кольцевых силовых пучковых элементов результата [6].

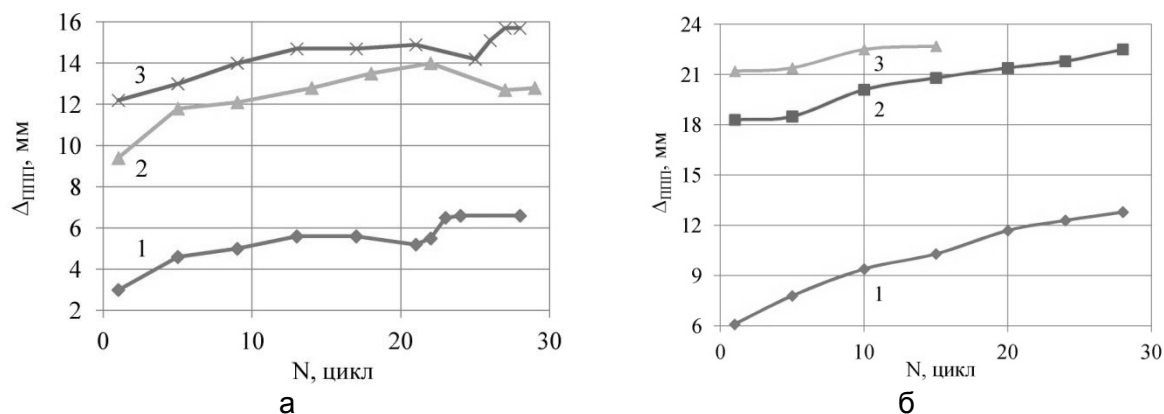


Рисунок 3 - Циклическое изменение величины деформации пластичности прямого превращения при подготовке с усилием  $F$ : 1 - 8,2 Н, 2 - 18,8 Н, 3 - 32,7 Н; и температурах термоциклов: а - 270 К, б - 255 К

Таким образом, для достижения контролируемого формоизменения силовых элементов за счет ОПФ в технологических установках необходимо обеспечить полноту прямого мартенситного превращения. Проведенные эксперименты показали необходимость повышения качества сварных соединений.

#### Список литературы

1. Беляев С.П., Волков А.Е., Ермолаев В.А., Каменцева З.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Мозгунов В.Ф., Разов А.И., Хайров Р.Ю. Материалы с эффектом памяти формы. Т.4. / под ред. В.А. Лихачева. – Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 1998. – 268с.
2. Вьюненко Ю.Н. Применение ЭПФ в производстве слоистых материалов // Перспективные материалы и технологии: сб.статей Междунар. науч. симпозиума. – Витебск: УО «ВГТУ», 2011. – С.182-184.
3. Вьюненко Ю.Н., Белоусов Н.Н. Обратимая память формы в кольцевых конструкциях // 60 Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности», 14–18 мая 2018 года, Витебск, Беларусь.: материалы конференции. – Витебск: УО «ВГТУ», 2018. – С.482-484.
4. Андронов И.Н., Вербатовская Р.А., Данилов А.Н., Корепанова В.С. Мартенситный тип обратимой памяти формы в устройстве для восстановления систолического размера кольца митрального клапана. // Заводская лаборатория. –Т.76, №8, 2010. – С. 38-42.
5. Вьюненко Ю.Н., Хлопков Е.А., Волков Г.А. Управление деформационно-силовыми свойствами "металлических мышц" из сплава TiNi // ФТВД. - Т.27, №4, 2017. - С. 65-72.
6. Вьюненко Ю.Н., Хлопков Е.А., Волков Г.А. Механические свойства "металлических мышц" из материалов с эффектом памяти формы / Перспективные материалы и технологии. Андреев В.А. и др. Монография. В 2-х томах. Т.1. // под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: УО "ВГТУ", 2017. – С. 412-429.