

О ВЛИЯНИИ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С
ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ В СПЛАВАХ С ЭПФ

Хлопков Е.А.¹, Вьюненко Ю.Н.², Журбенко П.Н.³, Затульский Г.З.⁴

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, hlopkov@elisey@mail.ru

² ООО "ОПТИМИКСТ ЛТД", Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ ЗАО "Пролетарий", Сураж, Российская Федерация

⁴ Физико-технологический институт металлов и сплавов НАНУ, Киев, Украина

Наблюдение за работой малогабаритных прессов ШеР, действующих на эффекте памяти формы (ЭПФ), выявило особенности формоизменения кольцевых силовых пучковых элементов (КСПЭ, "металлические мышцы"). Продеформированные растяжением и находящиеся под действием растягивающих усилий во время установки в ШеР "металлические мышцы" в процессе медленного нагрева с термостатом вблизи температур обратного превращения начинали удлиняться [1, 2]. Если же пресс помещался в разогретый термостат, то деформационного процесса, противоположного по направлению ЭПФ ("противоход") не отмечали. "Металлические мышцы" изготавливали из проволоки диаметром 2мм в виде бухты из 4–6 витков. Химический состав сплавов, выбранных для изготовления КСПЭ, близок к эквиаtomному.

Изучение возможности подготовки "металлических мышц" к работе в ШеРах за счет деформаций пластичности превращения показало, что возрастание скорости охлаждения конструкций под нагрузкой приводит к уменьшению деформационных эффектов (рис.1). Одновитковый силовой элемент при 130°С представлял вытянутый овал длиной 73мм. По направлению максимального диаметра к нему была приложена сила ~6,4Н. В процессе охлаждения с термостатом овал вытягивался на 7,3мм. При этом нагрузка, действующая на него, уменьшилась до 2,2Н (кривая 1, рис.1).

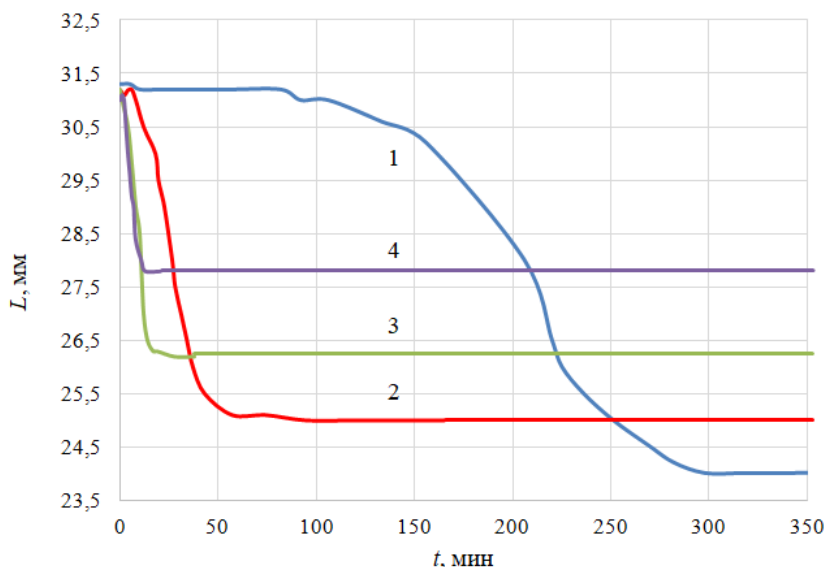


Рисунок 1 - Влияние скорости охлаждения на формоизменение овала из проволоки TiNi:

1 – охлаждение с печью; изотермически:

2 – при 26°С, 3 – 6°С, 4 – (-2)°С

При охлаждении силового элемента в изотермических условиях с комнатной температурой (26°C) деформационный эффект снижается на 1мм, а конечное усилие, действующее на кольцо составило ~2,75Н (кривая 2, рис.1).

Охлаждение при 6°C (кривая 3, рис.1) и при (-2)°C (кривая 4, рис.1) приводит к изменению характеристического размера на 5мм и 3,5мм соответственно. А конечные усилия были равны 3,4Н (для кривой 3, рис.1) и 4,4Н (для кривой 4 на рис.1).

В рамках математической модели механизма остаточных напряжений эффекта памяти формы был проведен расчет эволюции температурных полей при скачкообразном изменении температуры на поверхности цилиндра из сплава TiNi [3]. В численном эксперименте были приняты границами прямого превращения температуры $M_s=50^\circ\text{C}$, $M_f=40^\circ\text{C}$. На рис.2а видно, возникая в приповерхностном слое, гетерофазная зона, постепенно расширяясь, движется к центру цилиндра. При этом максимальный охват объема образца гетерофазным состоянием составил ~64%. В случае второго режима охлаждения (рис.2б) гетерофазное состояние охватывает практически всю конструкцию в течении нескольких секунд.

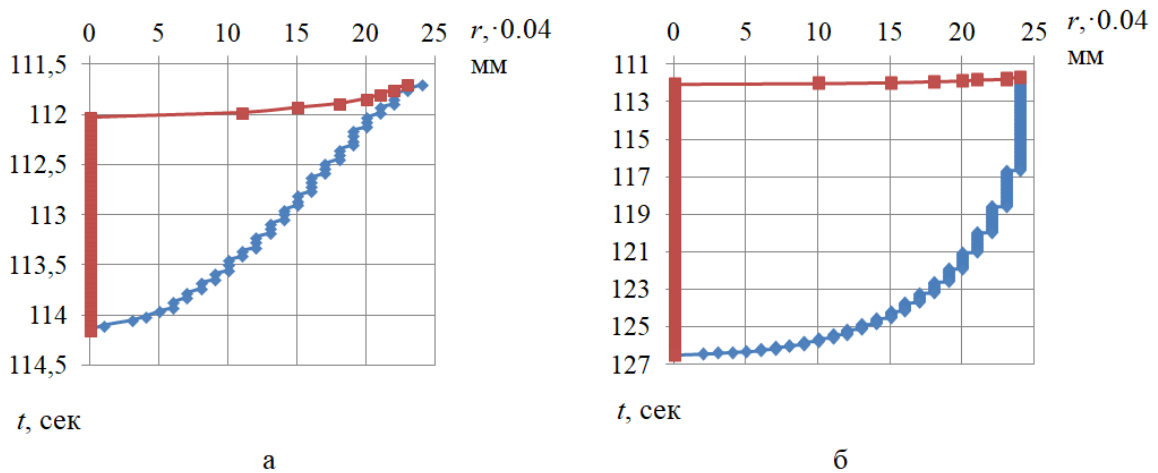


Рисунок 2- Границы прямого мартенситного превращения в круглом сечении с течением времени при резком изменении температуры на поверхности от 130°C до 0°C (а), до $M_f=40^\circ\text{C}$ (б) и дальнейшей скорости охлаждения $\dot{T}=0,1^\circ\text{C}$

Аналогичные результаты были получены и для случая "противохода" в нагруженных "металлических мышцах" при работе ШерПа. А также для спиралей из сплава CuZn18Al7 [4]. Изучение развития ЭПФ в этих конструкциях, в присутствии силового воздействия вдоль оси, показало, что наряду с изменением высоты спирали во время фазовых превращений происходит её закручивание. На начальной стадии нагрева спирали происходит вращение верхнего образца относительно основания "по часовой стрелке". С началом роста высоты h в условиях реализации ЭПФ направление вращения меняется. Диаметр проволоки ~4мм. Высота спиралей составляла 42-48 мм при плотном прилегании витков. Внешний диаметр образца был равен ~20мм.

Эксперименты показали, что изменение положения верхнего витка относительно основания также зависит от скорости нагрева (рис.3). Угол поворота при быстром нагреве составил лишь 2° (кривая 1 на рис.3), а при медленном – 7° (кривая 2 на рис.3). В первом случае образец помещали в разогретый до 120°C термостат, во втором образец нагревали вместе с термостатом со скоростью 1°C/мин.

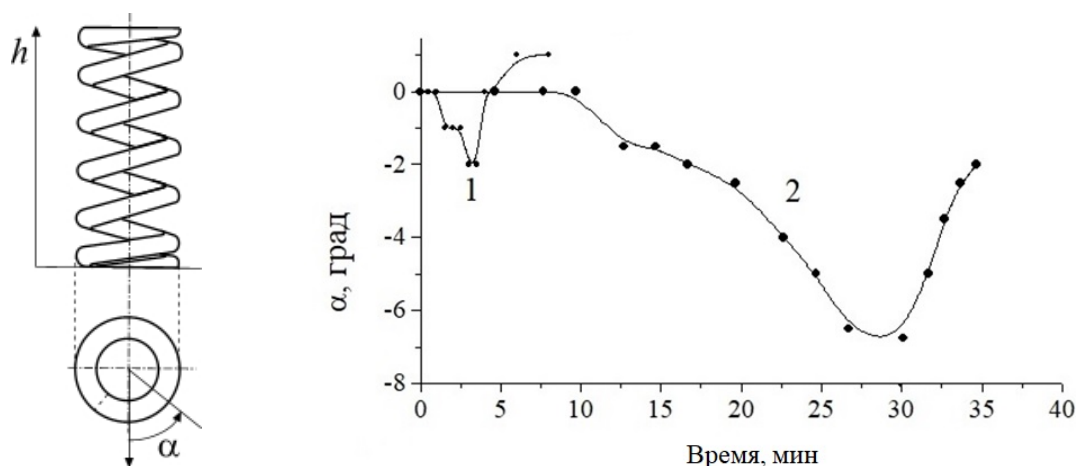


Рисунок 3 - Изменение α от времени при разных режимах нагрева спирали из сплава CuZn18Al7:
 1 – изотермически при $T=130^{\circ}\text{C}$,
 2 – от 26°C до 130°C при $\dot{T}=1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

Анализ опытных данных и результатов численного эксперимента показал, что охват гетерофазным состоянием всего объема конструкции гарантирует максимальные деформационные эффекты при реализации возможностей пластичности материала в области температур прямого превращения.

Во время медленного нагрева падение упругих характеристик материала по всему объему конструкции вблизи температур обратного мартенситного превращения дает возможность реализации деформационного эффекта "противохода".

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров А.А., Артемьев И.В., Вьюненко Ю.Н. Эффект памяти формы и деформационное поведение кольцевых силовых пучковых элементов / В сб. материалов XXI Петербургских чтений по проблемам прочности – С.-Петербург, 2014.– С.248-250.
2. Вьюненко Ю.Н., Хлопков Е.А., Волков Г.А. Механические свойства "металлических мышц" из материалов с эффектом памяти формы / Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х т. Т.1. Глава 25. / В.А. Андреев [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: УО "ВГТУ", 2017. – С. 412-429.
3. Вьюненко Ю.Н. Механизм эффекта памяти формы, обусловленный эволюцией поля остаточных напряжений // Материаловедение. - 2003. - N 12. - С. 2-5.
4. Вьюненко Ю.Н., Затульский Г.З., Куликов А.А., Солдатова Ю.В.. Исследование силовых спиральных ЭПФ-элементов из сплава CuZnAl / Науч. труды IV Междунар. семинара «Современные проблемы прочности» им. В. А. Лихачева. Т.2. – Великий Новгород, 2000. – С. 142-147.