

PACS: 62.20.-x, 81.30.kf

Ю.Н. Вьюненко¹, Е.А. Хлопков², А.С. Турзаков³

ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫЕ СВОЙСТВА РАВНОМАССОВЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СИЛОВЫХ ПУЧКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

¹ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД», Санкт-Петербург, РФ

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, РФ

³АО «ГосНИИхиманалит», Санкт-Петербург, РФ

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2020 года

Представлены данные о деформационно-силовых свойствах кольцевых силовых пучковых элементов (КСПЭ), изготовленных из проволоки Ti–55.16 wt % Ni диаметрами 1, 2 и 2.5 мм. С целью обеспечения одинаковой массы элементов они выполнены из 24, 6 и 4 витков соответственно.

Ключевые слова: эффект памяти формы, никелид титана, кольцевые силовые пучковые элементы, деформационно-силовые свойства

Наблюдение за работой малогабаритных прессов конструкции ШеР [1] выявило значительное влияние на их эксплуатационные характеристики ряда факторов. В работе [2] было показано различие деформационно-силовых свойств двух пар КСПЭ («металлических мышц»), которые не только отличались геометрическими параметрами конструкции, но и были изготовлены из разных композиций никелида титана. Вследствие этого и ввиду необходимости поиска путей совершенствования технологического оборудования, действующего на основе эффекта памяти формы (ЭПФ), встал вопрос о выборе исходного сортамента металла (в данном случае – проволоки соответствующего диаметра) для изготовления «металлических мышц» кольцевой формы.

Сравнительное исследование деформационно-силовых свойств было проведено на силовых элементах, изготовленных из сплава Ti–55.16 wt % Ni. Для получения близких по массе «металлических мышц» были изготовлены бухты, содержащие 24 витка из проволоки диаметром 1 мм, 6 витков из двухмиллиметровой проволоки и 4 витка из проволоки диаметром 2.5 мм. Масса образцов оказалась равной 26 ± 1 g, диаметр бухты каждого КСПЭ $d_0 \sim 60$ mm. Все образцы отжигали при 773 K в течение 20 min.

Для сравнения деформационно-силовых характеристик на установке ЛИНД (схема устройства приведена на рис. 1) «металлические мышцы» термоциклировали под нагрузкой. Силовые элементы приобрели форму вытянутого овала. Их характеристическим размером было выбрано макси-

мальное расстояние между двумя равноудаленными по контуру овала точками $d(t)$. Для всех образцов максимальное значение $d(t)$ достигло величины $d_{\max} = 79.65 \pm 0.05$ mm.

Нагрев силовых элементов проводили от 279 К. Максимальная температура в экспериментах была равной 410 К. График изменения температуры при нагреве приведен на рис. 2. Средняя скорость охлаждения в интервале прямого мартенситного превращения составляла 0.5 К/min.

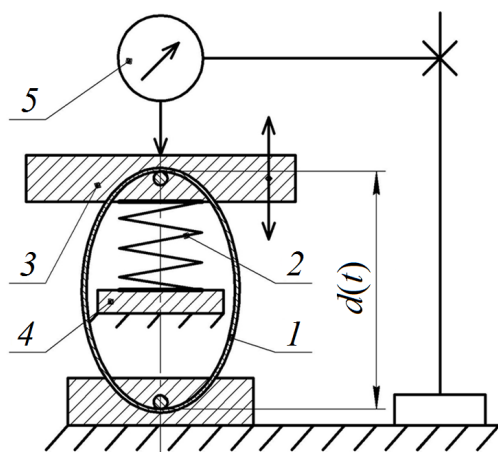


Рис. 1. Схема нагружения КСПЭ в динамометре ЛИНД: 1 – КСПЭ, 2 – контртело (спиральная пружина), 3 – подвижная пластина, 4 – регулирующая подвижная пластина, 5 – измерительная система, $d(t)$ – характеристический размер КСПЭ

Деформационные процессы инициировали двумя способами. Во-первых, при комнатной температуре в промежутке между циклами нагрев–охлаждение постепенно наращивали формоизменение «металлических мышц» за счет поджатия контртела гайкой, регулирующей силовое взаимодействие. В качестве контртела использовали спиральную пружину (рис. 1). Во-вторых, деформационные процессы интенсивно развивались во время остывания силовых элементов в интервале температур прямого мартенситного превращения. Учитывая прикладную направленность проводимых исследований, в динамометре ЛИНД деформировали расположенные параллельно пары КСПЭ. Это обусловлено условиями их эксплуатации в малогабаритных прессах ШЕР.

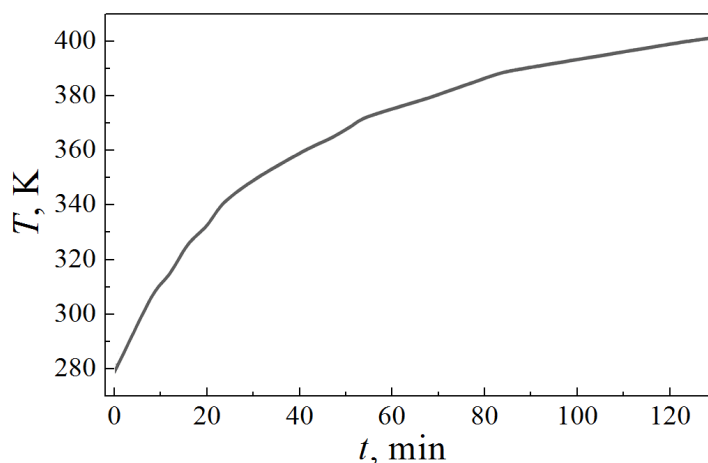


Рис. 2. Режим нагрева силовых элементов

Силовые элементы, изготовленные из проволоки диаметром 1 мм, были доведены до формы с $d_{\max} = 79.65$ мм за 14 термоциклов. Формоизменение ($\Delta d = d_{\max} - d_0$), накопленное за счет активной деформации в мартенситном состоянии, составило $\sim 63\%$ от общей величины. Начальное силовое взаимодействие F_0 с контртелом в 15-м термоцикле достигло ~ 870 N.

Конструкция из двухмиллиметровой проволоки была доведена до величины d_{\max} в результате 13 термоциклов. В начале 14-го нагрева $F_0 = 485$ N. В этом случае формоизменение, полученное за счет пластичности превращения, оказалось в 2 раза больше изотермического и достигло 66%.

У третьего варианта силовых элементов (из проволоки диаметром 2.5 мм) деформация в условиях пластичности превращения также была преобладающей в процессе формоизменения образцов. Этот фактор обеспечил более 61% удлинения 4-витковых КСПЭ. При этом до d_{\max} данная пара была доведена лишь шестью термоциклами. К 7-му нагреву $F_0 = 530$ N.

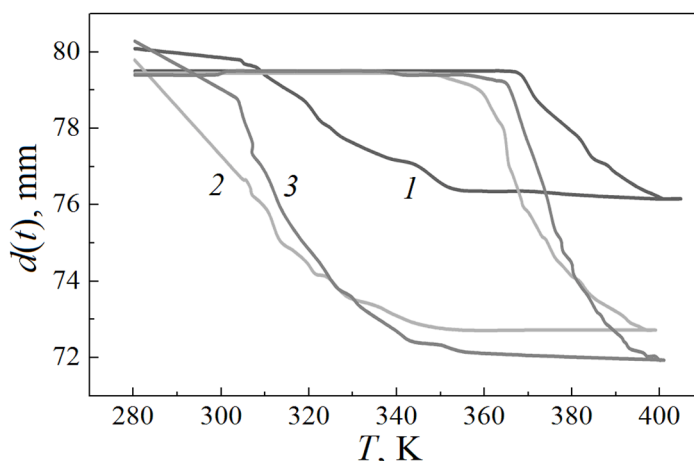


Рис. 3. Температурная зависимость характеристического размера КСПЭ $d(t)$ из проволоки диаметром, мм: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 2.5

Нагрев всех образцов от комнатной температуры до $T \sim 350$ К не вызывает изменений $d(t)$. Вблизи этой температуры отмечено начало формоизменения у пары 6-витковых КСПЭ (рис. 3, кривая 2), обусловленное развитием ЭПФ. При $T \sim 360$ К начинаются деформационные процессы у 4-витковой пары «металлических мышц» (рис. 3, кривая 3). И лишь при $T \sim 370$ К замечено начало изменения формы пары КСПЭ из проволоки диаметром 1 мм. Наиболее вероятно, что такая очередность срабатывания силовых элементов при нагреве обусловлена их начальным силовым взаимодействием с контртелом в контрольных опытах, когда начальное значение $d(t) = d_{\max}$. Величина F_0 минимальна у 6-витковой пары и максимальна у конструкции из проволоки диаметром 1 мм.

Процесс формоизменения сопровождается нарастанием силового воздействия на контртело (рис. 4). У 6-витковой пары «металлических мышц» из-

менение физико-механических характеристик завершается вблизи $T \sim 400$ К. У 4-витковой пары это происходит при нагреве до $T \sim 403$ К, а у конструкции, изготовленной из миллиметровой проволоки, формоизменение останавливается при достижении $T \sim 406$ К.

Максимальное усилие F было развито парой 4-витковых «металлических мышц». Оно достигло 1290 N. У 6-витковых силовых элементов максимум генерируемой силы оказался равным 1170 N. Немного выше результат у 24-витковой конструкции: $F_{\max} = 1210$ N. Таким образом, конструкции из проволоки 2.5 mm превосходят в силовом эффекте другие рассмотренные варианты. Однако это преимущество не превышает 10%.

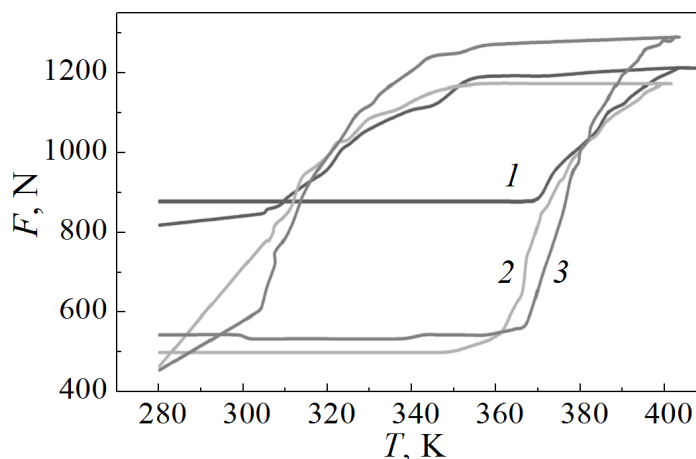


Рис. 4. Температурная зависимость изменения силового взаимодействия КСПЭ с контртелом F ; диаметр проволоки, mm: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 2.5

Иная ситуация наблюдается в деформационных эффектах. Если формоизменение в результате ЭПФ ($\Delta d_{\text{SME}} = d_{\text{max}} - d_A$, где d_A – величина $d(t)$ в аустенитном состоянии материала «металлических мышц») при максимальном силовом противодействии со стороны контртела у 4-витковых конструкций составляет 7.6 mm, а у 6-витковых – 6.9 mm, то у пары КСПЭ из миллиметровой проволоки этот параметр равен 3.4 mm.

Полученные результаты показывают преимущество силовых элементов, изготовленных из проволоки никелида титана диаметром 2.5 mm. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что одинаковое изменение формы исследованных конструкций сопровождается разной степенью деформации материала. Обладая максимальным диаметром проволоки, 4-витковые «металлические мышцы» в процессе изгиба (в данном случае он не идеален) раньше других конструкций достигают предела упругости материала в наружных слоях. В результате степень неупругой деформации в них выше и больше объем материала, претерпевший неупругую деформацию. Это обеспечивает преимущество в силовых характеристиках и, в данной ситуации, больший эффект формоизменения при наименьшем количестве витков.

Результаты исследования ставят вопрос об оптимальном соотношении активного деформирования в изотермических условиях и использования пластичности превращения при термоциклировании для получения максимальных деформационно-силовых характеристик КСПЭ. Необходимо отметить и тот факт, что проволока большего диаметра, как правило, дешевле. В данном случае это является дополнительным преимуществом 4-витковых «металлических мышц».

1. Ю.Н. Вьюненко, Е.А. Хлопков, Г.А. Волков, в кн.: Перспективные материалы и технологии: монография. Т.1., УО «ВГТУ», Витебск (2017), с. 412–429.
2. Ю.Н. Вьюненко, Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки **18**, № 4-2, 2023 (2013).

Yu.N. Vyunenکو, E.A. Khlopkov, A.S. Turzakov

DEFORMATION AND FORCE PROPERTIES OF EQUAL-MASS RING-SHAPED BUNDLE FORCE ELEMENTS

The data on the deformation and force properties of ring-shaped bundle force elements (RBFЕ) made of Ti–55.16 wt % Ni wires of 1, 2 and 2.5 mm in diameter are reported. To ensure the equal-mass elements, they have been made from 24, 6 and 4 bundle, respectively.

Keywords: shape memory effect, titanium-nickel, ring-shaped bundle force elements, deformation and force properties

Fig. 1. RBFЕ's strain scheme in dynamometer LIND: 1 – RBFЕ, 2 – counter-body (coil spring), 3 – movable plate, 4 – regulating movable plate, 5 – measuring system, $d(t)$ – characteristic size of the RBFЕ

Fig. 2. Power element heating mode

Fig. 3. Temperature dependence of the characteristic RBFЕ size $d(t)$; wire diameter, mm: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 2.5

Fig. 4. Temperature dependence of the force interaction change of the RBFЕ and the counterbody F ; wire diameter, mm: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 2.5