

PACS: 62.40.+i, 62.90.+k, 81.30.kf

Г.А. Волков¹, Ю.Н. Вьюненко², Е.А. Хлопков³

О ВЛИЯНИИ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА ВО ВРЕМЯ ПРЯМОГО МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ

²ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД», Санкт-Петербург, РФ

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, РФ

Статья поступила в редакцию 31 января 2019 года

Представлены результаты исследования различных режимов охлаждения кольцевых силовых элементов. Полученные данные демонстрируют заметную зависимость степени формоизменения кольца от скорости понижения температуры. Приведен анализ причин наблюдаемых явлений.

Ключевые слова: эффект памяти формы, скорость охлаждения, пластичность прямого превращения, кольцевые силовые элементы, никелид титана

До недавнего времени считалось, что скорость изменения температуры в металлах с эффектом памяти формы (ЭПФ) существенно влияет на диссипативные свойства материала в интервале температур превращения и положение этих интервалов на температурной шкале [1]. Наблюдение за работой малогабаритных прессов конструкции Шер, действующих на ЭПФ, выявило особенности формоизменения силовых элементов. Уже на стадии разработки этих устройств были получены первые результаты о влиянии скорости нагрева на деформационные характеристики силовых деталей спиральной формы [2].

Аналогичные данные о немонотонности деформационных процессов и влиянии на них скорости нагрева были получены при исследовании кольцевых силовых пучковых элементов («металлические мышцы») [3]. Изучение их формоизменения при понижении температур до интервала $[M_s, M_f]$ (температуры начала и конца прямого мартенситного превращения) под нагрузкой [4] не выявило заметного влияния скорости изменения температуры на величину деформации. Однако дальнейшие исследования показали, что охлаждение кольцевых силовых элементов до M_f и более низких температур может значительно повлиять на величину их деформации.

Влияние скорости остывания на формоизменения колец под нагрузкой изучали на одновитковом силовом элементе [5]. Образец был изготовлен из проволоки сплава Ti–50.4 at.% Ni диаметром 2 mm. После отжига при 723 K в тече-

ние 20 min силовой элемент подвергали трехкратному термоциклированию с переводом материала из аустенитного состояния в мартенситное и обратно. В ходе эксперимента образец, который имел форму вытянутого овала, нагревали до 400 К. При данной температуре кольцо нагружали вдоль максимальной хорды d_1 . Растягивающее усилие создавала растянутая спиральная пружина. Начальная нагрузка была равной ~ 6.4 N, $d_1 = 73$ mm. После этого проводили охлаждение образца, в процессе которого он вытягивался (рис. 1).

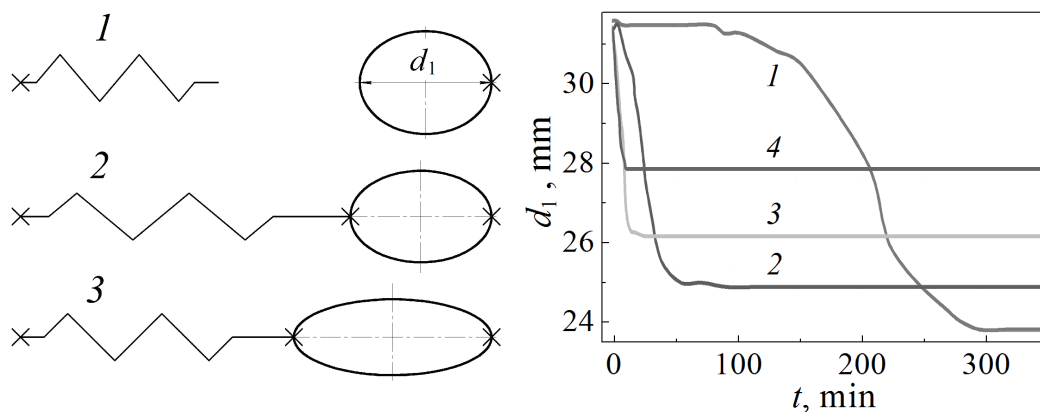


Рис. 1. Схема нагружения силовых элементов в динамометре: 1 – до нагружения, 2 – после нагружения в аустенитном состоянии, 3 – после деформации пластичности превращения

Рис. 2. Влияние скорости охлаждения на формоизменение овала: 1 – охлаждение вместе с термостатом; 2, 3, 4 – изотермическое охлаждение соответственно при 300, 280 и 270 К

При остывании силового элемента вместе с термостатом возрастание d_1 начинается при достижении температурной отметки ~ 320 К. На это потребовалось ~ 100 min. Формоизменение овала длилось ~ 200 min до достижения температуры ~ 300 К. Скорость остывания образца на этом временном участке равнялась ~ 0.1 K/min. Величина d_1 возросла на ~ 7.3 mm, а силовое воздействие на овал снизилось до 2.2 N (рис. 2, кривая 1).

При извлечении динамометра с силовым элементом из горячего термостата деформационный процесс наблюдается в интервале от 8 до 60 min. При этом хорда d_1 увеличилась на 6.5 mm, а силовое воздействие на овал понизилось до 2.75 N (рис. 2, кривая 2). Средняя скорость остывания силового элемента во время формоизменения оказалась равной ~ 0.4 K/min.

В случае переноса образца с динамометром из термостата в холодильные камеры с температурами ~ 280 и ~ 270 К изменение геометрических параметров силовых элементов начиналось соответственно на 4-й и 3-й минутах. В первом случае d_1 увеличилась на 5 mm, а во втором – на 3.5 mm (рис. 2, кривые 3 и 4). При этом силы, действующие на овал, уменьшились соответственно до 3.4 и 4.4 N. Усредненные скорости остывания во время деформи-

рования образца были равны 1.7 и ~ 2.9 K/min. Во всех четырех экспериментах нагрев силовых элементов приводил к полному восстановлению начальной формы.

С целью анализа наблюдаемого явления в рамках механизма остаточных напряжений ЭПФ [6] были проведены численные эксперименты по изучению распределения температур по сечению цилиндра и температурной зависимости модуля Юнга. При этом предполагали, что охлаждение цилиндра идет в изотермических условиях при температурах поверхности M_f и $M_f - 40$. Для расчетов выбрали уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\rho c(U) \frac{\partial U}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, k – коэффициент теплопроводности, U – температура, r – радиальная координата, t – время. Теплоемкость $c(U)$ вне интервала температур превращения является постоянной величиной c_0 , а в интервале температур превращения аппроксимируется квадратичной функцией

$$c(U) = c_1 \frac{(U - M_s)(M_f - U)}{(M_f - M_s)^2} + c_0. \quad (2)$$

Величину c_1 находили из формулы

$$Q_{tr} = \int_{M_s}^{M_f} c_1 \frac{(U - M_s)(M_f - U)}{(M_f - M_s)^2} dU, \quad (3)$$

где Q_{tr} – скрытая теплота превращения.

Температурную зависимость локального модуля упругости в математической модели принимали в виде следующей функции:

$$E = \begin{cases} E_a & \text{при } U > M_s, \\ E_a \left(1 - \frac{2(M_s - U)}{M_s - M_f} \right) & \text{при } \frac{M_f + M_s}{2} \leq U \leq M_s, \\ E_m \left(1 - \frac{2(M_f - U)}{M_s - M_f} \right) & \text{при } M_f \leq U \leq \frac{M_f + M_s}{2}, \\ E_m & \text{при } U \leq M_f, \end{cases} \quad (4)$$

где E_a и E_m – модули Юнга соответственно аустенитного и мартенситного состояний материала. Численные значения указанных характеристик материала выбирали равными соответствующим величинам никелида титана, близкого к эквиаtomному составу. Модуль Юнга для цилиндра определяли по формуле

$$E = \frac{1}{S} \int_S E(S) dS, \quad (5)$$

где S – площадь сечения цилиндра.

Проведенные вычисления показали наличие минимумов на температурной зависимости E при охлаждении (рис. 3), что зафиксировано во многих экспериментальных работах [1]. При охлаждении цилиндра до температуры M_f минимальное значение модуля в 2 раза ниже, чем при $M_f - 40$. Это обусловлено различием распределения температуры по сечению (рис. 4).

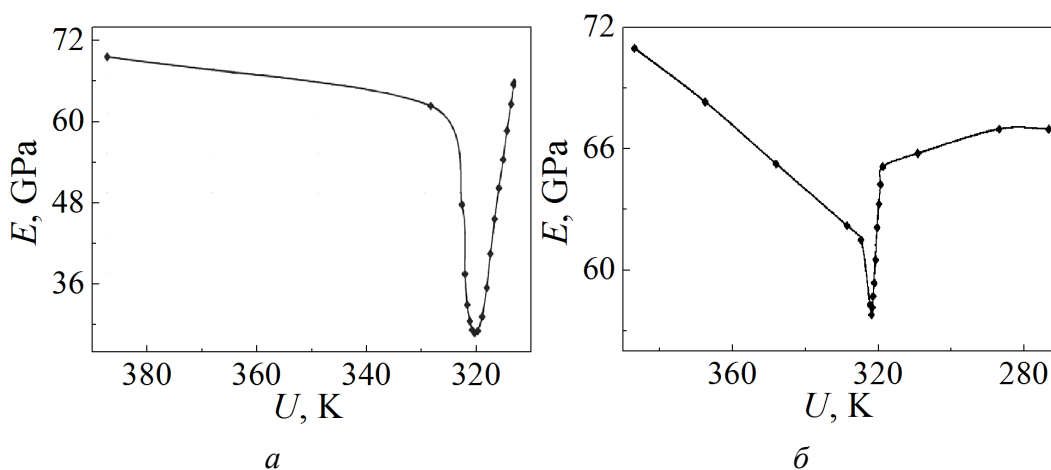


Рис. 3. Модуль упругости E в цилиндре радиусом $r = 1$ mm при резком изменении температуры поверхности от 400 К до M_f (а) и $M_f - 40$ К (б)

В результате сильного переохлаждения фазовое превращение движется в объеме материала цилиндра неширокой полосой. При охлаждении поверхности лишь до температуры M_f практически весь объем цилиндра находится в гетерофазном состоянии. По результатам численного эксперимента оно сохраняется длительный промежуток времени относительно второго режима охлаждения (рис. 5).

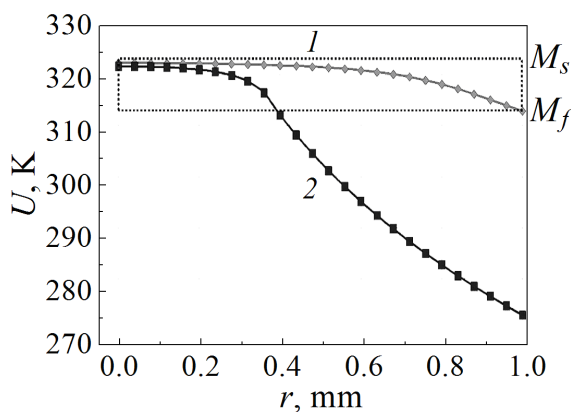


Рис. 4. Эволюция температурного поля при прямом мартенситном превращении в цилиндре радиусом $r = 1$ mm при резком изменении температуры поверхности от 400 К до M_f (1) и $M_f - 40$ К (2)

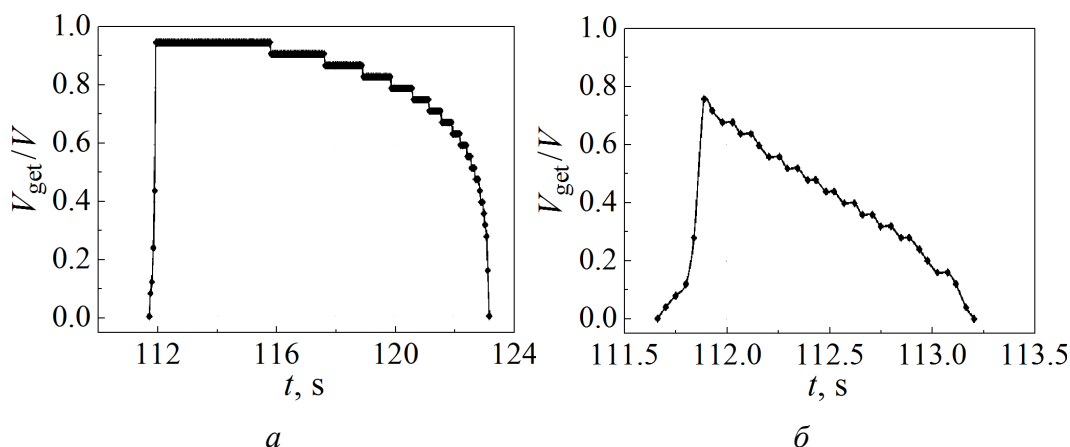


Рис. 5. Эволюция зоны прямого мартенситного превращения V_{get}/V в цилиндре радиусом $r = 1 \text{ mm}$ с течением времени при резком изменении температуры поверхности от 400 К до M_f (а) и $M_f - 40 \text{ К}$ (б)

Таким образом, значительное падение модуля Юнга в цилиндре и длительное гетерофазное состояние обеспечивают условия лучшей деформируемости кольцевого силового элемента при охлаждении под нагрузкой до температуры M_f . Полученные расчетные данные позволяют качественно объяснить экспериментальные результаты. Однако необходимо обратить внимание на большое расхождение между длительностью деформационных процессов лабораторных экспериментов и временем существования гетерофазного состояния в численных опытах. Указанное различие частично обусловлено конструкцией динамометра и теплоемкостью устройства. В отличие от лабораторных экспериментов, когда остывание шло за счет конвективного теплообмена с окружающей средой, в вычислениях предполагалось идеализированное мгновенное понижение температуры поверхности на 87 и 127 К в двух рассмотренных случаях. Возможны и неточности в выборе констант материала. Еще одной причиной может оказаться экзотермичность самого деформационного процесса, наблюдаемого в меняющих форму кольцевых силовых элементах.

Полученные результаты показывают необходимость учета при создании конструкций из никелида титана особенностей технологических условий их функционирования, связанных с температурными режимами работы оборудования.

1. С.П. Беляев, А.Е. Волков, В.А. Ермолаев, З.П. Каменцева, С.Л. Кузьмин, В.А. Лихачев, В.Ф. Мозгунов, А.И. Разов, Р.Ю. Хайров, в кн.: *Материалы с эффектом памяти формы: Справ. изд.*, В.А. Лихачев (ред.), Т. 1, Изд-во НИИХ СПбГУ, Санкт-Петербург (1997).
2. П.Н. Журбенко, Г.З. Затумский, А.А. Носковец, Ю.Н. Вьюненко, в сб.: *XXI Петербургские Чтения по проблемам прочности*, Соло, Санкт-Петербург (2014), с. 152–154.
3. Ю.Н. Вьюненко, *Мат. 55-й Междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности»*, ННЦ ХФТИ, Харьков (2014), с. 147.

4. Ю.Н. Вьюненко, Г.А. Волков, Е.А. Хлопков, ЖТФ **88**, 1201 (2018).
5. Н.Н. Белоусов, Ю.Н. Вьюненко, ФТВД **27**, № 1, 16 (2017).
6. Ю.Н. Вьюненко, Материаловедение **12**, 2 (2003).

G.A. Volkov, Yu.N. Vyunenکو, E.A. Khlopkov

ON THE EFFECT OF THE COOLING RATE ON THE FORM CHANGE OF THE TiNi RING-SHAPED FORCE ELEMENTS IN THE COURSE OF THE DIRECT MARTENSITIC TRANSFORMATION

The results of testing of different cooling modes for the TiNi ring-shaped force elements are presented. The obtained data demonstrate a significant dependence of the ring change degree on the rate of temperature decrease. The analysis of the causes of the observed phenomena is provided.

Keywords: shape memory effect, cooling rate, direct transformation plasticity, ring-shaped force elements, titanium nickelide

Fig. 1. Scheme of loading of the force elements inside the dynamometer: 1 – before loading, 2 – after loading in the austenitic state, 3 – after the direct transformation plasticity

Fig. 2. Effect of cooling rate on the oval shaping: 1 – cooling with the thermostat; 2, 3, 4 – isothermal cooling at 300, 280 and 270 K, respectively

Fig. 3. Elastic modulus E in a cylinder $r = 1$ mm with a sudden change in the surface temperature from 400 K to $M_f(a)$ and $M_f - 40$ K ($\bar{\sigma}$)

Fig. 4. Evolution of the temperature field in the cylinder $r = 1$ mm with a sudden change in the surface temperature from 400 K to $M_f(1)$ and $M_f - 40$ K (2)

Fig. 5. Evolution of the direct transformation plasticity zone V_{get}/V in the cylinder $r = 1$ mm with a sudden change in the surface temperature from 400 K to $M_f(a)$ and $M_f - 40$ K ($\bar{\sigma}$)