

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

Ю.Н. Вьюненко<sup>1</sup>, Е.А. Хлопков<sup>2</sup>, Г.А. Волков<sup>3</sup>

## УПРАВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫМИ СВОЙСТВАМИ «МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЫШЦ» ИЗ СПЛАВА TiNi

<sup>1</sup>ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД», Санкт-Петербург, РФ

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, РФ

<sup>3</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ

Статья поступила в редакцию 18 октября 2017 года

*Исследованы деформационно-силовые характеристики кольцевых силовых пучковых элементов (КСПЭ) из сплавов TiNi при развитии эффекта памяти формы в процессе термоциклирования. Показана возможность регулирования этих характеристик путем варьирования температурных интервалов работы и изменения химического состава КСПЭ. Установлено, что одинаковое механическое воздействие на «металлические мышцы» при разных температурах приводит к значительным изменениям их силовых возможностей.*

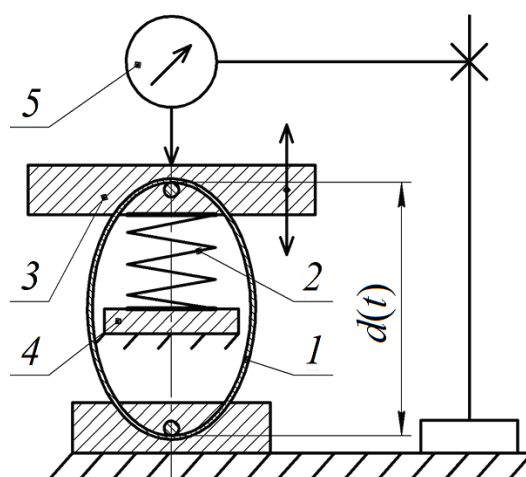
**Ключевые слова:** эффект памяти формы, кольцевые силовые пучковые элементы, деформационно-силовые свойства, температурные режимы работы, никелид титана

Работа КСПЭ в установках «ШЕР» показала перспективность использования «металлических мышц» в технологических процессах [1]. Однако во время наблюдения за поведением силовых элементов в технологических операциях были отмечены особенности в развитии деформационных явлений в области температур мартенситных превращений, претерпеваемых материалом КСПЭ. В условиях силового взаимодействия «металлических мышц» с пакетом обрабатываемых изделий при нагреве наблюдается формоизменение, направленное противоположно эффекту памяти формы [2]. Это явление зависит от уровня силового контакта [2] и скорости изменения температуры [3]. Кроме того, на деформационно-силовые характеристики «металлических мышц» оказывают влияние их химический состав [4] и режимы термомеханической обработки КСПЭ [5]. Перечисленные факторы могут быть использованы при разработке способов управления поведением силовых элементов.

В работах [6,7] представлены результаты исследования деформационных свойств образцов из никелида титана при частичном переходе материала из мартенситного состояния в аустенитное или в обратном направлении. Авторы указанных работ добивались этого остановкой нагрева (или охлаждения) при различных температурах внутри интервала превращения, что приводило

к изменению деформационных эффектов. Следствием анализа указанных данных стала гипотеза о возможности использования частичного мартенситного превращения в качестве фактора, управляющего работой «металлических мышц». Для проверки такого предположения была проведена серия опытов по определению деформационно-силовых характеристик КСПЭ при развитии эффекта памяти формы во время термоциклирования с различной степенью перевода материала силовых элементов в мартенситное состояние.

Конструкция «металлических мышц» в виде КСПЭ представляет собой бухту различной формы, состоящую из нескольких витков проволоки. Деформационно-силовые характеристики КСПЭ исследовали с помощью динамометра ЛИНД (рис. 1). Поскольку в технологических устройствах типа «ШеР» используется пара «металлических мышц», проводили испытания одновременно двух силовых элементов 1, расположенных в параллельных плоскостях симметрично относительно контртела 2.



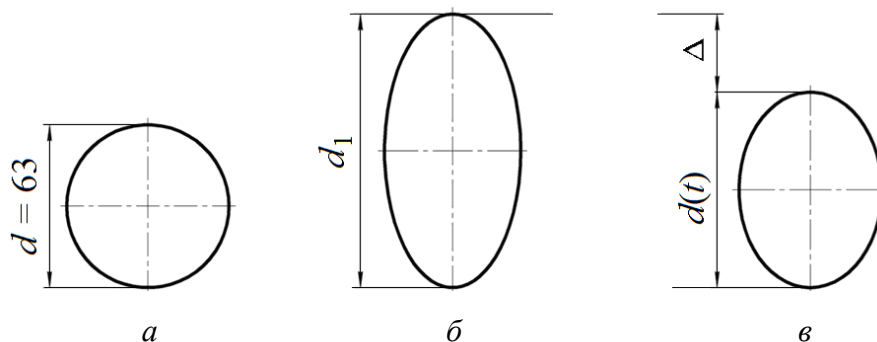
**Рис. 1.** Схема нагружения КСПЭ в динамометре ЛИНД: 1 – КСПЭ, 2 – контртело (спиральная пружина), 3 – подвижная пластина, 4 – регулирующая подвижная пластина, 5 – измерительная система;  $d(t)$  – характеристический размер КСПЭ

Силовое воздействие на «металлические мышцы» регулировали сжатием контртела, которое определялось изменением расстояния между подвижными пластинами 3 и 4. Необходимо отметить, что после достижения требуемого уровня сопротивления контртела нижнюю пластину 4 жестко фиксировали. Температурную зависимость деформационно-силовых параметров определяли, нагревая ЛИНД в термостате от 293 до 403 К. Охлаждение до 279 и 271 К проводили в холодильных камерах.

Исследованные силовые элементы изготовлены из проволоки диаметром 2 мм. Материалы проволоки – сплавы никелида титана с содержанием Ni 50.45 и 50.35 at.%. Конструкция КСПЭ состояла из пяти круговых витков. Их внутренний диаметр равен 63 мм. Предварительно силовые элементы отработали в технологических операциях не менее 30 раз с целью стабилизации температурных интервалов прямого и обратного превращений [8,9].

«Металлические мышцы» устанавливали в ЛИНД при комнатной температуре после нагрева в свободном состоянии до 403 К и охлаждения до 271 К. В динамометре КСПЭ и контртело приводили в состояние силового взаимо-

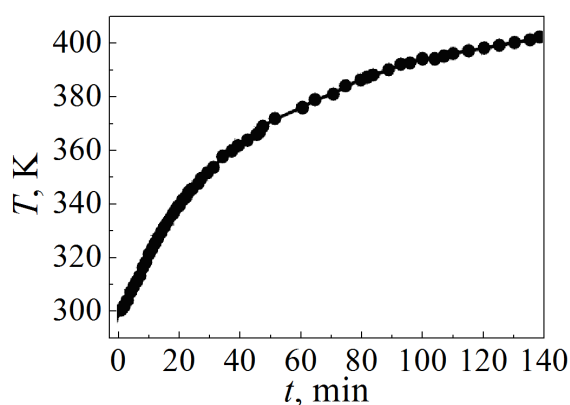
действия. При этом происходило изменение формы силовых элементов (рис. 2) от исходной формы круга (*a*). Во всех экспериментах условия нагрева и охлаждения сохранялись постоянными. Зависимость температуры от времени приведена на рис. 3.



**Рис. 2.** Формы КСПЭ на различных стадиях эксперимента: *a* – круговая (исходная), *б* – эллиптическая (после начального деформирования), *в* – эллиптическая (в процессе восстановления формы)

Охлаждение силовых элементов вместе с ЛИНДом проводили в изотермических условиях холодильных камер. При минимальной температуре «металлические мышцы» выдерживали не менее 10 h. В этих температурных условиях наращивали силовое воздействие на КСПЭ и выполняли следующий термоцикл. Во время нагрева следили за изменением величины  $\Delta = d_1 - d(t)$  (см. рис. 2), что позволило оценивать формовосстановление, обусловленное эффектом памяти формы, и генерацию усилий «металлическими мышцами». При повышении силового воздействия на КСПЭ перед нагревом увеличивается значение  $d_1$ . Вторая стадия возрастания этой величины отмечена в термоцикле во время охлаждения. После реализации эффекта памяти формы при нагреве в процессе понижения температуры до интервала прямого превращения материал силовых элементов оказывается в состоянии, свойством которого является пластичность превращения. Это позволяет контртелу не только восстановить значение  $d_1$ , но и, как правило, заметно его увеличить.

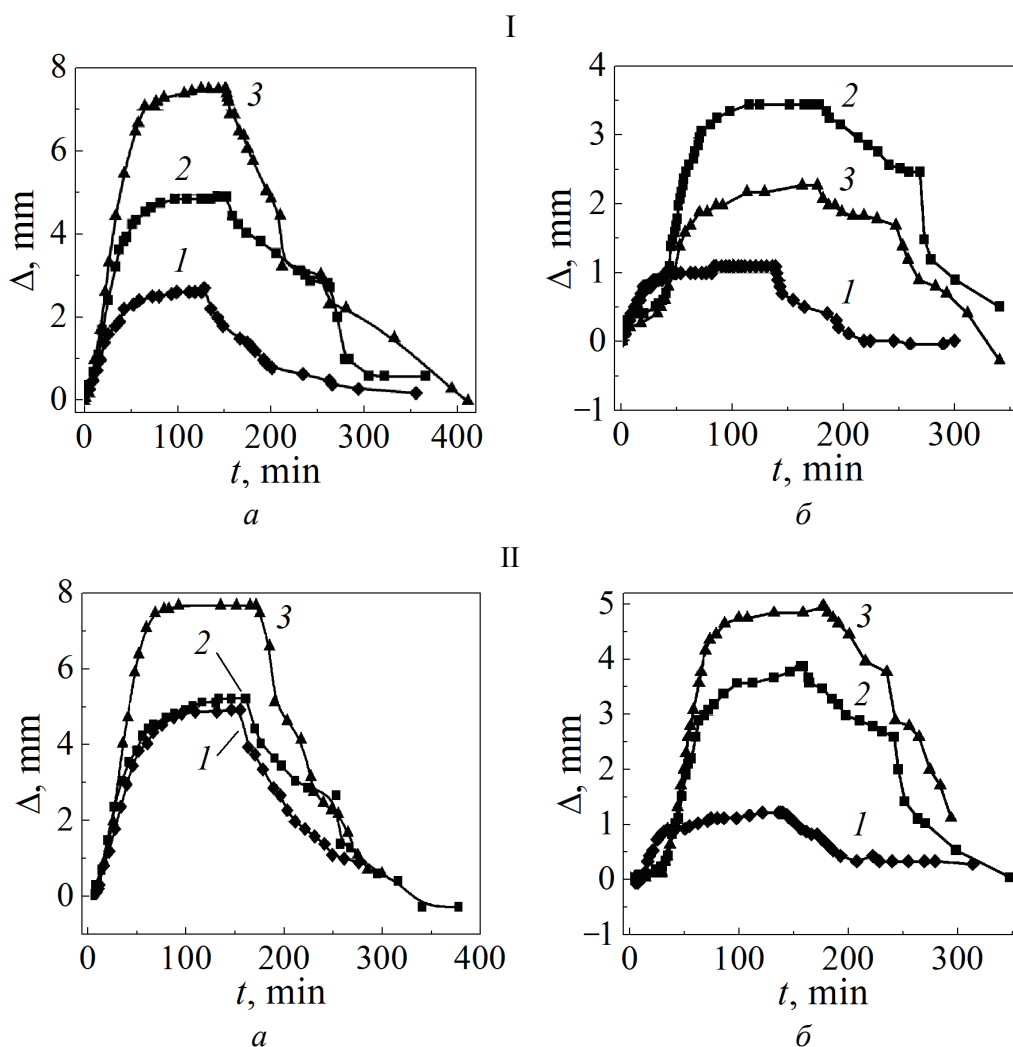
Графики на рис. 4 иллюстрируют развитие деформационных процессов при силовом взаимодействии КСПЭ с контртелом на уровнях 250 N (I) и 430 N (II). Для сплава с содержанием Ni 50.45 at.% (рис. 4, I, II, a) формоизменение КСПЭ начинается практически сразу с повышением тем-



**Рис. 3.** Временная зависимость температуры КСПЭ в процессе нагревания в термостате

пературы. При понижении температуры деформационной подготовки «металлических мышц» к работе происходит возрастание максимального значения  $\Delta$  при  $T = 403$  К. Лишь при начальном силовом взаимодействии с контртелом  $F_0 = 430$  Н разница в конечной величине  $\Delta$  на кривых 1 и 2 (рис. 4,II,a) существенно меньше, чем при  $F_0 = 250$  Н (рис. 4,I,a). Обращает на себя внимание и тот факт, что при обоих значениях  $F_0$  при минимальной температуре термоциклов  $T_{\min} = 279$  и  $271$  К различия в деформационных характеристиках КСПЭ (TiNi50.45 at.%) в результате действия эффекта памяти формы незначительны в сравнении с разницей в величинах  $\Delta$  при  $T_{\min} = 299$  К.

Кривые 1 на рис. 4,I,II,б показывают изменение во времени параметра  $\Delta$  при  $T_{\min} = 299$  К для сплава TiNi50.35 at.%. В отличие от двух других температурных интервалов термоциклирования в данном случае деформационные



**Рис. 4.** Развитие эффекта памяти формы КСПЭ из сплавов TiNi50.45 at.% (a) и TiNi50.35 at.% (б) в течение времени  $t$  при нагрузке  $F \sim 250$  Н (I) и  $F \sim 430$  Н (II) при различных температурах  $T$ , К: кривые 1 (♦) – 299, кривые 2 (■) – 279, кривые 3 (▲) – 271

процессы начинаются одновременно с нагревом установки ЛИНД в термостате при силе противодействия  $F = 250$  и  $430$  N. Различие в изменении параметра  $\Delta$  при нагреве для этих опытов невелико. Деформационные эффекты формовосстановления КСПЭ на этапе повышения температуры от  $279$  K (кривые 2 на рис. 4, I, б) и от  $271$  K (кривые 3, там же) существенно больше. Процесс интенсивного деформирования начинается через  $20\text{--}30$  min после начала нагрева. При силовом взаимодействии с контртелом  $F \sim 250$  N на этапе роста температуры от  $271$  K в результате эффекта памяти формы параметра  $\Delta = 2.3$  mm (кривая 3, рис. 4, I, б). В аналогичной ситуации после деформирования КСПЭ при  $279$  K  $\Delta = 3.5$  mm (кривая 2, рис. 4, I, б).

Иное соотношение параметров формовосстановления наблюдается при силовом контакте «металлических мышц» и контртела  $F \sim 430$  N. При нагреве силовых элементов от  $279$  K максимальное значение  $\Delta_{\max} = 4$  mm (кривая 2, рис. 4, II, б), а после деформирования КСПЭ при  $271$  K нагрев приводит к росту  $\Delta$  до  $5$  mm (кривая 3, рис. 4, II, б). Таким образом, при меньшем усилии противодействия развитию эффекта памяти формы нагрев от  $279$  K дает большую степень восстановления формы по сравнению с термоциклом, имеющим  $T_{\min} = 271$  K (рис. 4, I, б). При усилении  $F \sim 430$  N соотношение значений  $\Delta$  противоположное.

В отличие от исследований, проводимых на традиционных образцах, деформирование «металлических мышц» описываемой конструкции вызывает индивидуальное распределение полей напряжений и деформаций почти в каждом проволочном сечении. Видимо, и соотношение аустенитной и мартенситной фаз во всех трех случаях различно. По данным, приведенным в [10], при  $299$  K материал обеих химических композиций КСПЭ может находиться полностью в аустенитном состоянии. В пользу этого можно привести зависимости  $d_1$  от приложенной силы  $F$ , полученные в изотермических условиях (рис. 5). Кривые 1 на рис. 5, а и б показывают почти линейную взаимо-

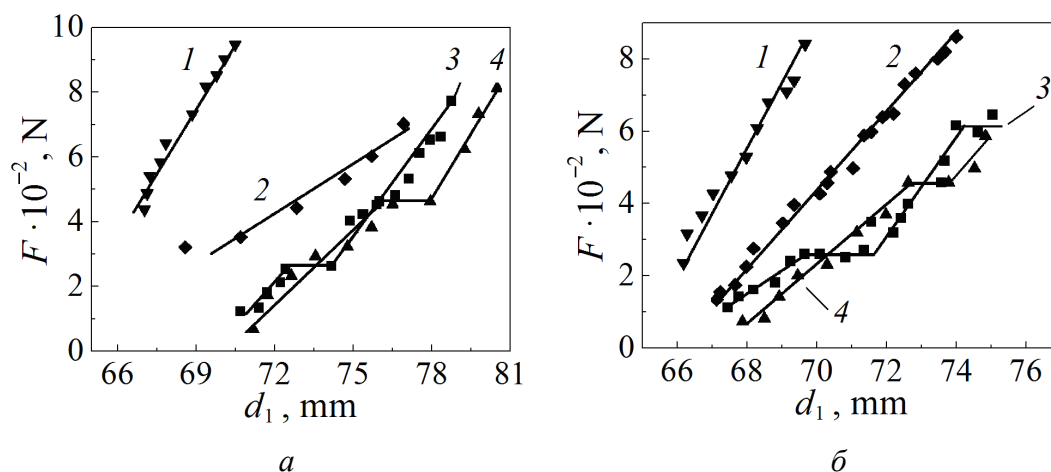


Рис. 5. Взаимозависимость размера  $d_1$  и растягивающего усилия  $F$  для КСПЭ из сплавов  $\text{TiNi}_{50.45}$  at.% (а) и  $\text{TiNi}_{50.35}$  at.% (б) при различных температурах  $T$ , K: кривые 1 ( $\blacktriangledown$ ) –  $403$ , кривые 2 ( $\blacklozenge$ ) –  $299$ , кривые 3 ( $\blacksquare$ ) –  $279$ , кривые 4 ( $\blacktriangle$ ) –  $271$

зависимость  $F$  и  $d_1$  при 403 К. Близким к линейному является и соотношение этих параметров при 299 К. Однако при такой температуре коэффициент пропорциональности линейной зависимости  $F(d_1)$  в 2 раза меньше для сплава TiNi50.35 at.%. Для сплава TiNi50.45 at.% изменение этого коэффициента равно приблизительно 2.5. Это может быть результатом «дефекта» модуля упругости, отмечаемого в никелиде титана вблизи температур превращения [11].

В отличие от первых двух кривых на рис. 5, указывающих на высокотемпературное состояние материала, графики, отражающие соотношение  $F$  и  $d_1$  при температурах 279 К (кривые 3) и 271 К (кривые 4), 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 при  $F \sim 250$  N на кривой 3, рис. 5,а и б и при  $F \sim 590$  N на кривой 3, рис. 5,б. На кривой 4, рис. 5,а такой участок отмечается при  $F \sim 470$  N, а на кривой 4, рис. 5,б аналогичную площадку можно наблюдать при  $F \sim 440$  N. По-видимому, наличие такой «площадки текучести» при  $F \sim 250$  N привело к тому, что в аналогичном силовом взаимодействии КСПЭ с контртелом формовосстановление после деформирования при 279 К оказывается значительней эффекта, полученного после нагружения силовых элементов из TiNi50.35 at.% при 271 К.

Такое соотношение деформационных эффектов сохраняется до уровня начального силового воздействия на КСПЭ  $F_0 = 330$  N (кривая 2, рис. 6,б). Дальнейший рост начальной нагрузки на «металлические мышцы» приводит к тому, что формовосстановление при нагреве от 271 К становится больше (кривая 3, рис. 6,б). Кривая 1 на рис. 6,б показывает, что при нагружении КСПЭ при 299 К деформационный эффект варьируется от 1 до 1.8 mm. Таким образом, генерация дополнительного усилия варьируется от 100 до 175 N. Это может быть использовано в технологических процессах, требующих строгого ограничения силового воздействия на обрабатываемые объекты.

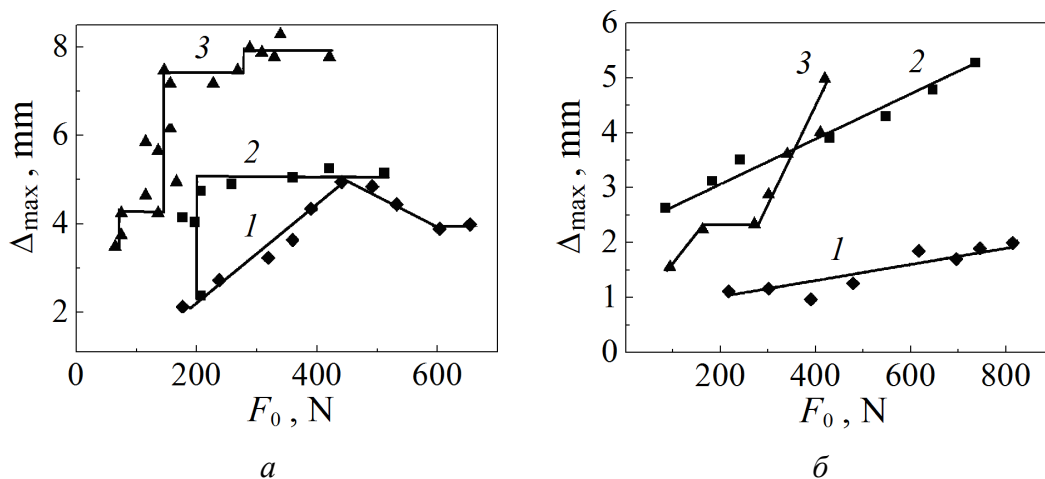


Рис. 6. Зависимость максимального значения параметра  $\Delta$  от начального усилия  $F_0$  при различных температурах  $T$ , К: кривые 1 (♦) – 299, кривые 2 (■) – 279, кривые 3 (▲) – 271

Для сплава TiNi50.45 at.% «площадка текучести» при  $F_0 = 250$  N может обеспечивать значительный прирост величины  $\Delta$  при минимальной температуре цикла  $T_{\min} = 279$  K (см. рис. 4, I, a, кривая 2). Для этого сплава характерна также близость к постоянству величины прироста силового взаимодействия с контртелом при  $F_0 > 200$  N как при  $T_{\min} = 271$  K, так и при  $T_{\min} = 279$  K (рис. 6, a). А при 299 K обнаружен максимум деформационного эффекта вблизи значения  $F_0 = 450$  N. Превышение этого уровня  $F_0$  приводит к возникновению силового воздействия на КСПЭ со стороны контртела  $F \sim 950$  N, препятствующего нарастанию деформаций эффекта памяти формы.

Таким образом, полученные данные показывают эффективность управления деформационно-силовыми параметрами «металлических мышц» посредством задания условий подготовки их к работе в области температур прямого мартенситного перехода.

Приведенные результаты также свидетельствуют о возможности разработки приводов и силовых конструкций, использующих «дефект» модулей упругости.

1. Ю.Н. Вьюненко, Матер. Междунар. симп. «Перспективные материалы и технологии», УО «ВГТУ», Витебск (2011), с. 182–184.
2. А.А. Тихомиров, И.В. Артемьев, Ю.Н. Вьюненко, Тр. конф. «XXI Петербургские чтения по проблемам прочности», Соло, Санкт-Петербург (2014), с. 248–250.
3. Ю.Н. Вьюненко, Матер. Междунар. симп. «Перспективные материалы и технологии», НШ «ВГТУ», Витебск (2015), с. 291–293.
4. Ю.Н. Вьюненко, Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки **18**, 2023 (2013).
5. Ю.Н. Вьюненко, Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки **21**, 791 (2016).
6. Ю.И. Паскаль, Л.А. Монасевич, ФММ **52**, 1011 (1981).
7. С.П. Беляев, М.Ю. Демина, Л.Н. Курзенева, Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки **3**, 300 (1998).
8. А.И. Лотков, В.Н. Гришков, С.В. Анохин, А.В. Кузнецов, Изв. вузов. Физика **25**, № 10, 11 (1982).
9. S. Miyazaki, Y. Igo, K. Otsuka, Acta Metall. **34**, 2045 (1986).
10. И.М. Корнилов, Е.В. Качур, О.К. Белоусов, ФММ **32**, 420 (1971).
11. Ю.Н. Вьюненко, Б.С. Крылов, В.А. Лихачев, Ю.И. Меццяков, ФММ **49**, 1032 (1980).

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

## THE CONTROL OF DEFORMATION-POWER PROPERTIES OF THE TiNi «METAL MUSCLES»

The deformation-power characteristics of ring-shaped bundle force elements (RBFE) made of the TiNi alloys are tested under progressing shape memory effect in the course of thermal cycling. The possibility of the control of these parameters by variation of the

temperature ranges of operation and chemical composition of is RBFЕ demonstrated. It is found that the same mechanical impact on the “metal muscles” at varied temperature results in substantial difference in the power abilities.

**Keywords:** shape memory effect, ring-shaped bundle force elements, deformation-power properties, temperature modes, titanium nickelide

**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 RBFЕ

**Fig. 2.** RBFЕ shape at different stages of the experiment:  $a$  – round shape (the initial one),  $\bar{b}$  – elliptic shape (after the initial deformation),  $\bar{c}$  – elliptic shape (in the course of the shape recovery)

**Fig. 3.** Time dependence of the RBFЕ temperature in the course of heating within the thermostat

**Fig. 4.** Evolution of the shape memory effect in the RBFЕ made of the alloys of TiNi50.45 at.% ( $a$ ) and TiNi50.35 at.% ( $\bar{b}$ ) during the time  $t$  under the strain  $F \sim 250$  N (I) and  $F \sim 430$  N (II) at the varied temperature  $T$ , K: curves 1 ( $\blacklozenge$ ) – 299, curves 2 ( $\blacksquare$ ) – 279, curves 3 ( $\blacktriangle$ ) – 271

**Fig. 5.** Interrelation of the size  $d_1$  and tension force  $F$  effect in the RBFЕ made of the alloys of TiNi50.45 at.% ( $a$ ) and TiNi50.35 at.% ( $\bar{b}$ ) at varied temperature  $T$ , K: curves 1 ( $\blacktriangledown$ ) – 403, curves 2 ( $\blacklozenge$ ) – 299, curves 3 ( $\blacksquare$ ) – 279, curves 4 ( $\blacktriangle$ ) – 271

**Fig. 6.** The maximum of the parameter  $\Delta$  vs the initial force  $F_0$  at varied temperature  $T$ , K: curves 1 ( $\blacklozenge$ ) – 299, curves 2 ( $\blacksquare$ ) – 279, curves 3 ( $\blacktriangle$ ) – 271