

УДК 531.8:669-1

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРОТИВОПОЖАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ГРАФИЧЕСКОГО ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ СПРИНКЛЕРА

<sup>1</sup>Дорош И.В., <sup>1,4</sup>Чуракова А.А., <sup>2</sup>Ямалетдинова К.Ш., <sup>1</sup>Мартынова О.Г.,

<sup>1</sup>Ахметшин Р.И., <sup>1</sup>Рахманова С.Т., <sup>1</sup>Попова Е.Е., <sup>3</sup>Курапина А.А.,

<sup>1</sup>Семашко М.А., <sup>1</sup>Нафикова Э.В., <sup>1</sup>Исмагилов А.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «УГАТУ», Уфа, e-mail: ahmetshin@bk.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ЧелГУ», Челябинск;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», Москва;

<sup>4</sup>ИФМК УФИЦ РАН, Уфа

Эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхупругости проявляется более ярко в сплавах на основе никелида титана своими функциональными характеристиками: повышенной прочностью, высокой коррозионной стойкостью, способностью работать в труднодоступных конструкциях с агрессивной окружающей средой, таких как устройства для автоматического пожаротушения – спринклеры. Восстановление исходной формы при реализации обусловлено превращением мартенсита в аустенит путем нагрева и, наоборот – из аустенита в мартенсит путем охлаждения. Многократные циклы «охлаждение-нагрев» (термоциклирование (ТЦ)) в сплаве TiNi приводят к генерации дислокаций в кристаллической решетке, которые влияют на повышение предела текучести. Однако ТЦ не применяется для повышения предела текучести, но с использованием ТЦ возможна имитация реальных условий эксплуатации изделий, которые подвергаются термоциклическим нагрузкам в условиях агрессивной среды. В 2005 г. был запатентован спринклер, оросительная головка которого была выполнена из сплава TiNi на основе ЭПФ, данный сплав предполагал лучшее быстродействие и меньшие затраты. Быстродействие обеспечивалось такой характеристикой, как *удлинение*, однако удлинение не всегда показатель быстродействия, поэтому необходимо также учитывать *предел текучести*. На сегодняшний день не в полной мере изучено поведение сплава TiNi в комплексе со старением. Предполагается, что таким сплавом является TiNi, однако это несет сугубо теоретический характер; именно поэтому данная работа нацелена на раскрытие поведения сплава TiNi в условиях агрессивной среды.

**Ключевые слова:** эффект памяти формы (ЭПФ), термочувствительный элемент (ТЭ), термоциклирование (ТЦ), никелид титана (TiNi), механические свойства, крупнозернистая структура (КЗ), ультрамелкозернистая структура (УМЗ), спринклер

## SELECTION OF MATERIAL OF THE THERMOSENSITIVE ELEMENT OF FIRE EQUIPMENT BY THE METHOD OF GRAPHIC EXPRESS ANALYSIS ON THE EXAMPLE OF A SPRINKLER

<sup>1</sup>Dorosh I.V., <sup>1,4</sup>Churakova A.A., <sup>2</sup>Yamaletdinova K.Sh., <sup>1</sup>Martynova O.G.,

<sup>1</sup>Akhmetshin R.I., <sup>1</sup>Rakhmanova S.T., <sup>1</sup>Popova E.E., <sup>3</sup>Kuranina A.A.,

<sup>1</sup>Semashko M.A., <sup>1</sup>Nafikova E.V., <sup>1</sup>Ismagilov A.A.

<sup>1</sup>FSBEI HE USATU, Ufa, e-mail: ahmetshin@bk.ru;

<sup>2</sup>FSBEI HE ChelSU, Chelyabinsk;

<sup>3</sup>FSBEI HE MGTU «STANKIN», Moscow;

<sup>4</sup>IPMK UFIC RAS, Ufa

The shape memory and super-elasticity effect is more pronounced in titanium nickelide-based alloys with their functional characteristics: increased strength, high corrosion resistance, ability to work in hard-to-reach structures with aggressive environments such as automatic fire extinguishing devices – sprinklers. The restoration of the original form upon realization of the shape memory effect is due to the transformation of martensite into austenite by heating, and vice versa, from austenite to martensite by cooling. Multiple cooling-heating cycles (thermal cycling (TC)) in the TiNi alloy lead to the generation of dislocations in the crystal lattice, which affect the increase in yield strength. However, the TC is not used to increase the yield strength, but using the TC it is possible to simulate the actual operating conditions of products that are subjected to thermocyclic loads in an aggressive environment. In 2005, a sprinkler was patented, the irrigation head of which was made of an EPF-based TiNi alloy, this alloy assumed better performance and lower costs. The performance was ensured by such a characteristic as elongation, however, elongation is not always an indicator of performance, therefore, it is also necessary to take into account the yield strength. At present, the behavior of the TiNi alloy in combination with aging has not been fully studied. It is assumed that such an alloy is TiNi, but this is purely theoretical in nature; that is why this work is aimed at revealing the behavior of the TiNi alloy in an aggressive environment.

**Keywords:** shape memory effect (EPF), heat-sensitive element (TE), thermal cycling (TC), titanium nickelide (TiNi), mechanical properties, coarse-grained structure (SC), ultrafine-grained structure (UFG), sprinkler

Современное противопожарное оборудование предполагает быстрое реагирование на возникновение локальной пожароопасной ситуации с целью дальнейшей ее ликвидации.

К устройствам быстрого реагирования относятся такие средства автоматического

пожаротушения, как спринклеры, выбор термочувствительного элемента которого явилось целью исследования, положенного в основу данной работы.

Выбор термочувствительного элемента спринклера в свою очередь основан на пра-

вильном подборе его материала, обладающего ЭПФ, и к которому предъявляются требования по величине *относительного удлинения* и *предела текучести*. Названные характеристики напрямую влияют на быстродействие спринклера.

Цель исследования: исследование влияния термоциклических нагрузок на поведение сплава TiNi на основе ЭПФ в условиях агрессивной среды.

### Материалы и методы исследования

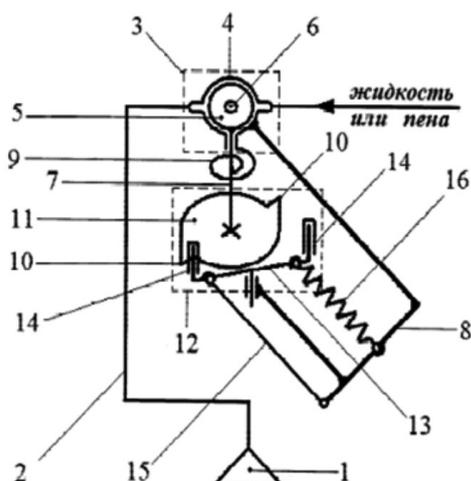
Недостатком известных моделей спринклеров является низкое быстродействие. В патенте [1; 2] был предложен спринклер, который отвечал бы большим быстродействием. Конструкция такого спринклера представлена на рис. 1.

Однако материал термочувствительного элемента спринклера, предложенный в данном патенте, не был подтвержден экс-

периментами, которые бы предоставляли необходимые значения параметров предела текучести и относительного удлинения при различных режимах термообработки, непосредственно влияющих на быстродействие.

Общеизвестно, что ЭПФ представляет собой восстановление формы термочувствительного элемента, которую ему придали при температуре фазового превращения, если этот элемент будет нагрет [3].

На конец XX века ЭПФ был обнаружен более чем у 20 сплавов, например в следующих системах: TiNi, AuCd, CuZnAl, CuAlNi и др. [4; 5]. Из представленного списка ни одна система не обладает лучшей, чем TiNi, характеристикой относительного удлинения, удлинения при разрыве. Для примера сравним механические и физические характеристики систем: TiNi (приведенной в патенте) и произвольно выбранной из списка системы CuZnAl (табл. 1, рис. 2).



1 – ороситель;  
 2 – трубопроводы;  
 3 – угловой шаровой клапан под давлением жидкости или пены;  
 4 – корпус клапана;  
 5 – затвор клапана;  
 6 – затворное отверстие клапана;  
 7 – вал управления клапаном;  
 8 – корпус спринклера;  
 9 – заводная пружина;  
 10 – клиновидные зубья;  
 11 – храповидная анкерная шестерня;  
 12 – анкерный механизм;  
 13 – коромысло анкерного механизма;  
 14 – упоры коромысла анкерного механизма;  
 15 – термочувствительный элемент из сплава, обладающего эффектом памяти формы (TiNi);  
 16 – реверсная пружина.  
 «ЭПФ» элемента 15 выражается в укорачивании при нагреве.

Рис. 1. Конструкция спринклера

Таблица 1  
 Сравнение механических и физических характеристик систем TiNi и CuZnAl

№ п/п	Показатели	Система	
		TiNi	CuZnAl
I	Температура плавления $t$ , °C	1300	1020
II	Плотность, г/см <sup>3</sup>	6,5	8
III	Теплопроводность при 20°C	18	120
IV	Предел прочности, МПа	1100	800
V	Удлинение при разрыве, %	50	15
VI	Предел текучести, МПа	800	350
VII	Модуль Юнга, ГПа	80	100
VIII	Усталостная прочность, МПа	350	270
IX	Размер зерна, мкм	100	150

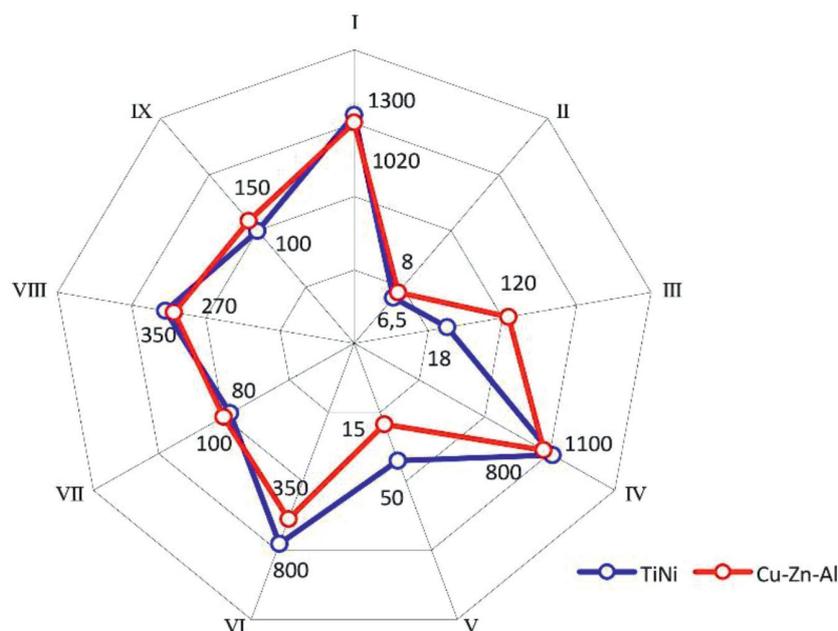


Рис. 2. Диаграмма сравнения механических и физических характеристик ЭПФ материалов

Из табл. 1 и рис. 2 видно, что предел текучести и относительное удлинение, удлинение при разрыве системы TiNi выше, чем у системы CuZnAl, что можно объяснить уникальной кристаллической решеткой [6–8].

Выбор системы TiNi лег в основу проведения эксперимента, который воспроизводил условия термоциклических нагрузок, что являлось необходимым для понимания: насколько в процессе нагрузок способна удлиняться проволока нитинола, а также насколько может повышаться предел текучести, т.к. именно эти свойства влияют на такой важный фактор, как быстрдействие спринклера [9–10].

Для имитации реальных условий эксплуатации в качестве материала для исследования был выбран интерметаллид системы TiNi: застехиометрический сплав  $Ti_{49}Ni_{51}$  – производства ЗАО «Промышленный центр МАТЭКС» (Россия), основная фаза которого – аустенитная, имеющая B2 кристаллическую решетку и фазу, обогащенную никелем  $Ti_2Ni_3$ .

Термоциклирование образцов в различных исходных состояниях осуществлялось путем последовательного погружения образцов в жидкий азот ( $-196^\circ\text{C}$ ), с последующим нагревом до температуры  $140^\circ\text{C}$ , что заведомо может быть как ниже, так и выше температур:  $M_n$  – прямого и  $A_k$  – обратного мартенситного превращения. Нагрев образ-

цов проводился на лабораторной электрической плитке. Число термоциклов «нагрев – охлаждение»  $n$  составило от 0 до 100 ( $n = 20, n = 100$ ). Толщина образцов, подвергнутых ТЦ, в сечении была менее 1 мм, что обеспечивало их быстрый прогрев и охлаждение. Время выдержки составило  $t = 8$  мин. для обеспечения полного нагрева/охлаждения образцов [10].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты механических испытаний образцов [10] до ТЦ приведены в табл. 2 и на рис. 3, 4. При этом рассматривались два состояния сплава TiNi: крупнозернистое (КЗ) и ультрамелкозернистое (УМЗ).

Представим данные табл. 2 как графики зависимостей состояний (структуры) сплава и пределов текучести от режимов термообработки до ТЦ [10].

Диаграммы, представленные на рис. 3, позволяют сделать вывод о том, что при любом режиме термообработки состояние УМЗ позволяет получить прирост предела текучести по сравнению с состоянием КЗ.

Графики зависимостей состояний сплава и относительных удлинений от режимов термообработки представлены на рис. 4 [10].

По рис. 4 можно сделать вывод, что в УМЗ- и КЗ-состоянии относительное удлинение практически неизменно и составляет в обоих случаях 33–35%.

Таблица 2

Результаты механических испытаний образцов сплава TiNi при различных состояниях [10]

Результаты механических испытаний до термоциклирования			
Состояние (структура) сплава	Режим термообработки, при $t$ , °С	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
крупнозернистое (КЗ)	Закалка, 800	460 ± 20	33 ± 5
	Отжиг, 250	570 ± 25	25 ± 5
	Отжиг, 400	595 ± 20	24 ± 5
ультрамелко-зернистое (УМЗ)	Закалка, 800	960 ± 20	42 ± 5
	Отжиг, 250	980 ± 20	35 ± 5
	Отжиг, 400	1037 ± 20	36 ± 5

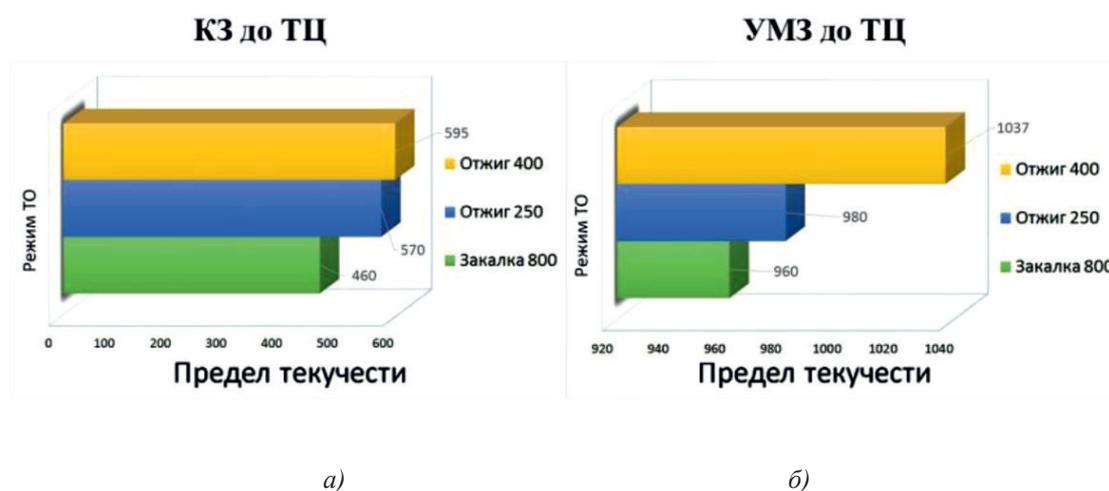


Рис. 3. Графики зависимостей состояний (структуры) сплава и пределов текучести образцов от режимов термообработки: а) КЗ до ТЦ; б) УМЗ до ТЦ

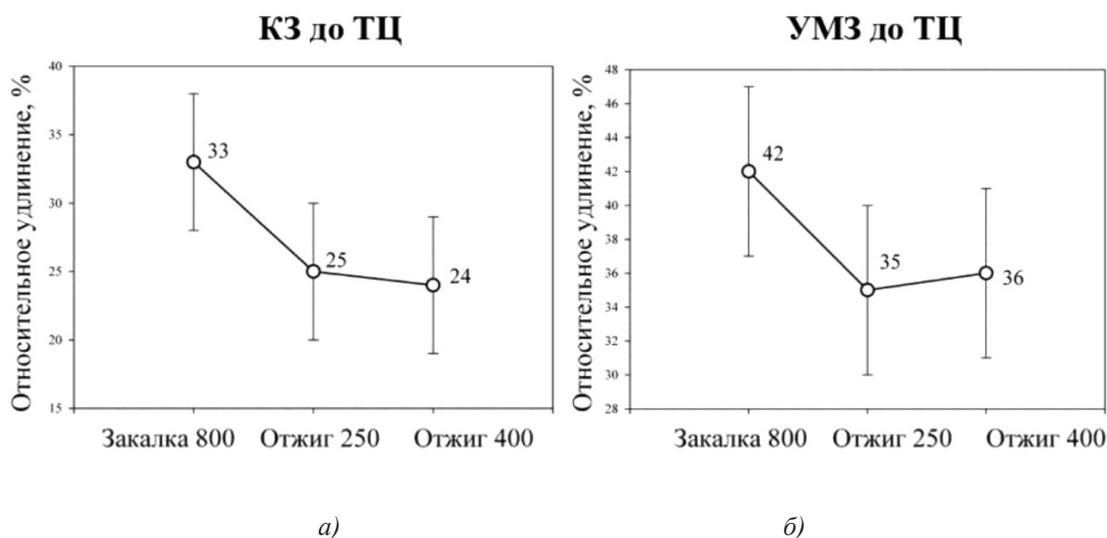


Рис. 4. Графики зависимостей состояний сплава и относительных удлинений образцов от режимов термообработки: а) КЗ до ТЦ; б) УМЗ до ТЦ

Результаты механических испытаний образцов после ТЦ приведены в табл. 3 и на рис. 5, 6. При этом рассматривались два состояния сплава TiNi: крупнозернистое (КЗ) и ультрамелкозернистое (УМЗ).

Представим данные табл. 3 как графики зависимостей состояний сплава и пределов текучести от режимов термообработки после ТЦ [10].

Диаграммы, представленные на рис. 5, позволяют сделать вывод о том, что состояние УМЗ по сравнению с состоянием КЗ не для всех режимов ТО позволяет получить прирост предела текучести. Это происходит по причине перенасыщения дислокаций.

Графики зависимостей состояний сплава и относительного удлинения от режимов термообработки представлены на рис. 6.

По рис. 6 можно сделать вывод, что в ультрамелкозернистом и крупнозерни-

стом состояниях относительное удлинение после термоциклирования практически неизменно.

### Выводы

Результаты исследования показывают, что в состояниях крупнозернистом и ультрамелкозернистом после термоциклирования наблюдается существенный прирост предела текучести, однако удлинение составляет всего 20%. Вполне возможно, что для повышения относительного удлинения необходимо провести большее количество циклов. С ростом предела текучести может возрасти быстродействие спринклера из-за его способности находиться в напряженном состоянии и противостоять стационарным или динамическим термоциклическим нагрузкам, в том числе и в агрессивной среде [10].

Таблица 3

Результаты механических испытаний образцов сплава TiNi при различных состояниях [10]

Результаты механических испытаний после термоциклирования			
	Число термоциклов ( $n$ ) + режим термообработки, при $t$ , °C	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
КЗ + ТЦ	$n = 20$	$665 \pm 20$	$18 \pm 5$
	$n = 100$	$635 \pm 20$	$20 \pm 5$
	20 + отжиг, 250	$660 \pm 20$	$20 \pm 5$
	100 + отжиг, 250	$670 \pm 20$	$24 \pm 5$
	20 + отжиг, 400	$690 \pm 20$	$20 \pm 5$
	100 + отжиг, 400	$570 \pm 20$	$18 \pm 5$
УМЗ + ТЦ	$n = 20$	$950 \pm 20$	$20 \pm 5$
	$n = 100$	$1170 \pm 20$	$20 \pm 5$
	20 + отжиг, 250	$1036 \pm 20$	$22 \pm 5$
	100 + отжиг, 250	$1160 \pm 25$	$24 \pm 5$
	20 + отжиг, 400	$1040 \pm 25$	$20 \pm 5$
	100 + отжиг, 400	$1165 \pm 25$	$20 \pm 5$

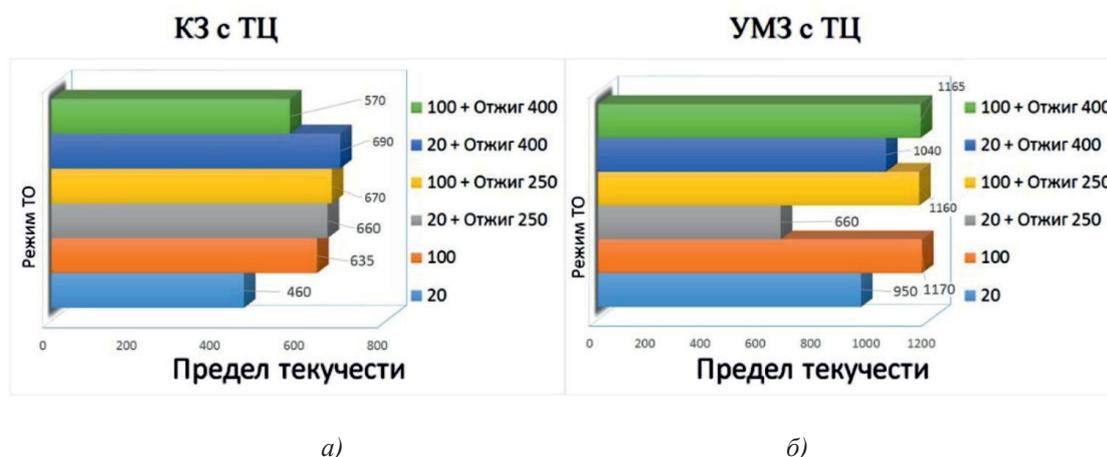


Рис. 5. Графики зависимостей состояний сплава и пределов текучести от режимов термообработки: а) КЗ с ТЦ; б) УМЗ с ТЦ

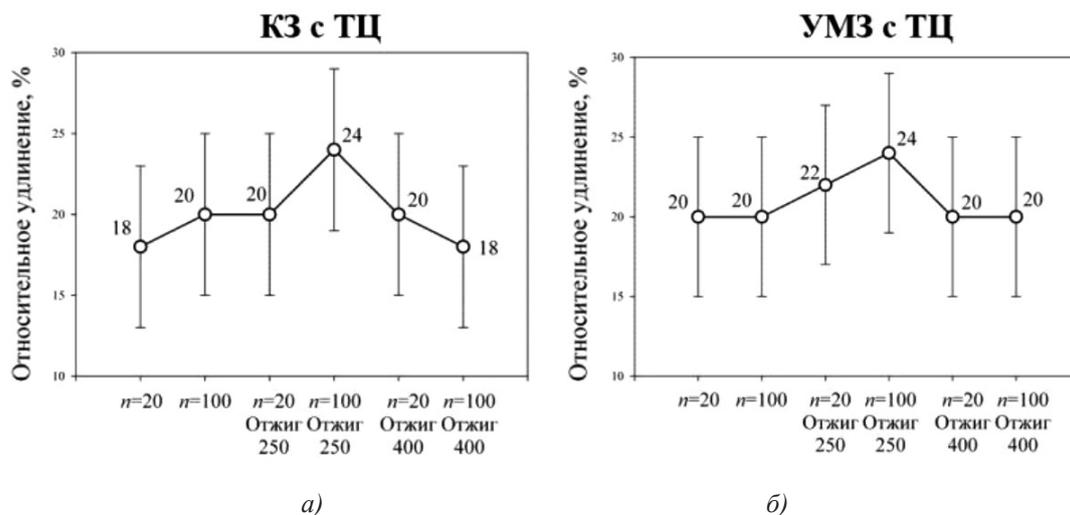


Рис. 6. Графики зависимостей состояний сплава и относительного удлинения от режимов термообработки: а) К3 с ТЦ; б) УМЗ с ТЦ

Результатом экспериментов, проведенных в рамках исследования [10], явилось подтверждение выбора материала термочувствительного элемента спринклера, напрямую влияющего на показатель быстродействия, что проявляется в существенном приросте предела текучести в условиях агрессивной среды. Тем не менее удлинение составляет всего 20%, что может быть объяснено тем, что происходит большое скопление дислокаций.

Несмотря на то что производство сплава TiNi является весьма дорогостоящим, экономический эффект может быть достигнут за счет того, что отпадает необходимость замены пластины из никелида титана после каждого срабатывания спринклера ввиду возврата пластины в исходное состояние за счет ЭПФ.

*Работа выполнена на базе Института физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра РАН при поддержке Гранта Республики Башкортостан Российской Федерации для молодых ученых (№ 28 ГР от 07.03.2019).*

#### Список литературы

1. Забегаев В.И., Миронов Б.Н., Лоцилина Л.Н. Спринклер // Патент РФ № 1839803. Патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МВД РФ. 2005. Бюл. № 21. 4 с.
2. Забегаев В.И., Миронов Б.Н., Дьяконов Ю.А. Спринклер // Патент РФ № 1839807. Патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МВД РФ. 2005. Бюл. № 21. 8 с.
3. Дорош И.В., Чуракова А.А., Мартынова О.Г., Ахметшин Р.И., Семашко М.А. Обоснование использования термочувствительного элемента TiNi в противопожарном оборудовании на примере спринклера с использованием графических моделей // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов Международ-

ной научно-практической конференции, посвященной 370-й годовщине образования пожарной охраны России (Иваново, 11 декабря 2019 г.). Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. С. 70–77.

4. Дорош И.В., Чуракова А.А., Ямалетдинова К.Ш., Мартынова О.Г., Ахметшин Р.И. Графическая интерпретация обоснования использования термочувствительного элемента TiNi в противопожарном оборудовании на примере спринклера // Научные технологии в решении проблем нефтегазового комплекса: материалы IX Международной молодежной научной конференции (г. Уфа, 14–15 ноября 2019 г.) / отв. редактор К.Ш. Ямалетдинова. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С. 179–187.

5. Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 2000. 352 с.

6. Бондарев А.Б., Хусаинов М.А., Андреев В.А. Технологические особенности производства тонкомерной проволоки из сплавов Ti-Ni с эффектом памяти формы // Фазовые превращения и прочность кристаллов: сборник тезисов VII Международной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика Г.В. Курдюмова. 2012. С. 148–149.

7. Хусаинов М.А., Бондарев А.Б., Летенков О.В., Андреев В.А. Формирование многократно-обратимой памяти формы в наноструктурированном никелиде титана // Фазовые превращения и прочность кристаллов: сборник тезисов VII Международной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика Г.В. Курдюмова. 2012. С. 148.

8. Бондарев А.Б., Хусаинов М.А. Технологическая схема и особенности производства тонкомерной проволоки из сплавов Ti-Ni с эффектом памяти формы // Вестник Новгородского гос. университета им. Ярослава Мудрого. 2012. № 68. С. 119–121.

9. Бондарев А.Б., Хусаинов М.А., Андреев В.А. Влияние степени обжата на функциональные свойства и фазовый состав сплавов Ti-Ni с памятью формы // Производство проката. 2012. № 1. С. 9–13.

10. Чуракова А.А., Дорош И.В. Сравнение процесса старения в крупнозернистом и ультрамелкозернистом сплаве TiNi с предварительным термодиклированием // Физическое материаловедение: IX Международная школа с элементами научной школы для молодежи (Тольятти, 9–13 сентября 2019 года); Актуальные проблемы прочности: LXI Международная конференция, посвященная 90-летию профессора М.А. Криштала (Тольятти, 9–13 сентября 2019 года): сборник материалов / ответственный редактор Д.Л. Мерсон. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2019. 254 с.