

К 90-ЛЕТИЮ  
ВЛАДИМИРА ГРИГОРЬЕВИЧА ШАВРОВА

УДК 538.95

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ni–Ti  
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
АКТУАТОРОВ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

© 2023 г. В. С. Калашников<sup>а, \*</sup>, В. В. Коледов<sup>а</sup>, В. Г. Шавров<sup>а</sup>, В. А. Андреев<sup>б</sup>, А. В. Несолонов<sup>б</sup>,  
Д. С. Кучин<sup>а</sup>, Р. Д. Карелин<sup>б</sup>

<sup>а</sup> *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

<sup>б</sup> *Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН,  
Ленинский просп., 49, Москва, 119334 Российская Федерация*

*\*E-mail: Vladimir.kalashnikovS@gmail.com*

Поступила в редакцию 03.10.2022 г.

После доработки 03.10.2022 г.

Принята к публикации 10.10.2022 г.

Представлены результаты исследования функциональных свойств сплавов системы Ni–Ti после различных деформационных обработок. Определено значение критических напряжений, при которых начинается деградация функциональных свойств: и установлено, что оно примерно в два раза ниже предела текучести. Рассчитаны коэффициенты полезного действия виртуальных термодинамических машин с рабочим телом из исследованных материалов и проведено его сравнение с коэффициентом полезного действия машины Карно на основе этого же материала – рассчитан коэффициент идеальности при условии срабатывания при напряжениях, не превышающих критических. Установлено, что в условиях однократного срабатывания наибольшим коэффициентом идеальности 9.7% обладает материал от прутков, полученных теплой ковкой при 350°C с диаметром от 20 до 5 мм. Для условий периодического действия при напряжениях в 1.2 раза ниже критических определено, что коэффициент идеальности составляет 7.4...7.7% для сплавов, прошедших горячую ковку и комбинацию равноканального углового прессования и теплойковки.

DOI: 10.31857/S0033849423040046, EDN: PEUBXW

## ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование методов выплавки и термомеханической обработки интерметаллических сплавов с термоупругим мартенситным переходом и эффектом памяти формы (ЭПФ) привело в последние годы к повышению качества сплавов, их надежности и функциональных свойств, а также расширению области применения в жизнедеятельности человека [1]. Наиболее известными и широко применяемыми являются сплавы системы Ni–Ti с ЭПФ, обладающие высокой прочностью, биосовместимостью, технологичностью [1, 2]. Повышение функциональных характеристик и надежности этих сплавов позволяет изготавливать миниатюрные исполнительные элементы с малой массой, повышенным быстродействием и, таким образом, добиваться высоких значений удельной мощности, постепенно приближаясь к фундаментальным пределам эффективности, ограниченным теоремой Карно. Однако использование этих сплавов ограничено отсутстви-

ем точных данных об особенностях мартенситного фазового перехода и предельных значений напряжений для функционирования сплава в условиях производства максимальной механической работы. Функциональные свойства этих сплавов можно регулировать за счет проведения последеформационных отжигов, корректировки режимов деформационной обработки, подбором химического состава и совершенствования режимов выплавки. Представляется актуальным усовершенствовать методику оценки функциональных свойств сплавов семейства TiNi так как до сих пор в литературе приняты методики оценки сплавов с ЭПФ как конструкционных. Часто в литературе измерение функциональных и эксплуатационных свойств материалов с ЭПФ проводится в условиях отсутствия механической работы со стороны самого материала, то есть либо при деформациях без нагрузки или при фиксированных размерах. В то же время, будучи исполнительным элементом в каких-либо актуаторах, материал с ЭПФ преодолевает сопротив-

ление внешней среды, совершая механическую работу [1, 2]. Необходимо отметить, что актуаторы из сплавов с ЭПФ являются тепловыми машинами, вкладывая тепло в которые, мы получаем механическую работу за счет изменения формы рабочего тела — исполнительного элемента из сплава с ЭПФ, под внешней нагрузкой. В связи с этим необходимо иметь оценку эффективности использования таких исполнительных элементов, опираясь на данные, полученные в результате исследований в условиях производства актуатором механической работы.

Цель данной работы — определить коэффициент полезного действия виртуальной термодинамической машины на основе сплава с ЭПФ в зависимости от функциональных свойств материала в условиях однократного и многократного срабатывания.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами для выполнения настоящей работы послужили ранее исследованные в [3] образцы системы Ni–Ti эквиатомного состава вырезанные из прутков с конечным диаметром от 5 до 20 мм, полученных методами теплойковки (ТК) при температурах ниже 630°C, горячейковки (ГК) при температурах от 630 до 800°C, равноканальным угловым прессованием (РКУП) при температуре 450°C и комбинацией РКУП и ТК.

Авторы предлагают напряжения, при превышении которых снижается обратимая деформация в результате накопления в образце пластически деформированных участков материала, называть предельными напряжениями  $\sigma_{пр}$ . Для определения положения предельных напряжений  $\sigma_{пр}$  на шкале  $\sigma_m - \sigma_\tau - \sigma_B$  ( $\sigma_m$  — критическое напряжение перехода из высокотемпературной фазы В2 в мартенсит В19' при постоянной температуре,  $\sigma_\tau$  — предел текучести,  $\sigma_B$  — предел прочности) проведено исследование прутков диаметром 5 мм после теплойковки в отожженном состоянии и микропровода, волооченной в теплую и в холодную до диаметра 0.1 мм, а именно исследована зависимость обратимой деформации  $\epsilon_r$  от температуры  $T$  и нагрузки  $\sigma$  и получены зависимости растяжения  $\epsilon(\sigma)$  на экспериментальных установках, описанных в [4, 5], и на универсальной установке “Instron 5966” в части растяжения (скорости перемещения траверсы 4 мм/мин) при комнатной температуре образцов 3-1 ТК450 и 3-2 ТК500. Микропровода диаметром 0.1 мм получена на промышленном оборудовании методом теплового и холодного волоочения (450...300°C до 0.5 мм и при 20°C до 0.1 мм) из прутков диаметром 5 мм, подвергнутых теплойковке (при темпе-

ратуре 450°C). Зависимость  $\epsilon(\sigma)$  была определена для образца 4-1 П при температурах 100% объемной доли исходной фазы В2 и мартенситной фазы В19'. Детальное описание образцов, использованных в данной работе, приведено в табл. 1.

В интерметаллидных сплавах Ti–Ni в отожженном (или состаренном) состоянии в результате термоупругого мартенситного превращения исходная фаза (В2) с упорядоченной ОЦК решеткой превращается в ромбоэдрическую решетку R-фазы, а затем в моноклинную решетку В19'-мартенсита: В2 → R → В19' [2]. В случае если материал не был подвергнут термической обработке или был предварительно подвергнут так называемой операции “обнуления” (охлаждение в воде после отжига в однофазной области в интервале 630...1310°C), превращение происходит минуя R-фазу. При этом проявление двухстадийного фазового превращения через R-фазу и влияние напряжений на его проявление было показано ранее [3]. Так, выбор режимов термической обработки, температуры деформационной обработки и предварительной термической обработки был основан на ранее проведенных авторами работах, например [3]. Указанные режимы термической обработки для образцов 1-1 ГК05 — 2-2 РКУП обеспечивают наилучшее сочетание функциональных свойств. Образцы 3-1 ТК450 и 3-2 ТК500 испытывались в состоянии поставки, т.е. уже будучи термообработанными с целью получения нужной температуры  $A_f$  обратного термоупругого мартенситного превращения после деформации образца на 2% при температуре –25°C (по методике, изложенной в стандарте ASTM F2082). Образец № 4-1 намеренно не подвергали термообработке, так как после теплойковки и волоочения при температуре 450°C он, предположительно, обладал достаточно большим объемом вторичных фаз, выделившихся в процессе деформации. Более того, с учетом размеров образца, а именно невозможностью его полировки, предполагали, что термическая обработка в воздушной атмосфере привела бы к окислению и науглероживанию поверхности самой проволоки (проволока покрыта тонким слоем графитовой смазки), а это неизбежно приведет к охрупчиванию. В свою очередь отжиг в вакууме не обеспечит высокой скорости охлаждения пространства печи и, как следствие, приведет к дополнительному выделению вторичных фаз, а также он сложно реализуем в условиях предприятия-изготовителя.

В данной работе произведено уточнение метода расчета величины изгибающих напряжений  $\sigma$  по сравнению с методом, приведенным в работе [4] в образцах и удельной механической работы  $a$ ,

Таблица 1. Характеристики образцов

Образец	Сплав	Режим деформации	Конечный диаметр, мм	Примечания
1-1 ГК05	Ni <sub>50,5</sub> Ti <sub>49,5</sub>	ГК при 900...950°C	5	Исходный образец для сравнения в состоянии после закалки
1-2 ТК		ТК при 350°C	5	Перед ковкой – закалка от 750°C, послековки – отжиг при 450°C, 1 ч, охлаждение в воде
1-3 РКУП + ТК		РКУП + ТК при 450°C	5	Без ТО
2-1 ГК20	Ni <sub>50,2</sub> Ti <sub>49,8</sub>	ГК при 900...950°C	20	Исходный образец для сравнения в состоянии после закалки от 800°C в воде
2-2 РКУП		РКУП при 450 °C, восемь проходов, с углом пересечения каналов 110°	20	Без ТО
3-1 ТК450	Ni <sub>50,5</sub> Ti <sub>49,5</sub>	ТК при 450°C	5	Отжиг при 450°C, 1 ч, охлаждение в воде
3-2 ТК500			5	Отжиг при 500°C, 0,5 ч, охлаждение в воде
4-1 П	Ni <sub>50,1</sub> Ti <sub>49,9</sub>	ТК и теплое волочение	0.1	Без ТО

Примечание: ГК – горячая ковка, ТК – теплая ковка, РКУП – равноканальное угловое прессование, ТО – термическая обработка.

а именно: максимальных напряжений в поперечном сечении при изгибе –

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ [МПа]}, \quad (1)$$

удельной механической работы при изгибе на единицу объема материала –

$$a = \frac{\sigma \epsilon_r}{9} \text{ [МДж/м}^3\text{]}, \quad (2)$$

где  $F$  – изгибающая сила, Н;  $L$  – расстояние между опорами при изгибе, мм;  $b$  и  $h$  – ширина и толщина образца соответственно, мм;  $\epsilon_r$  – обратимая деформация, %; под действием напряжений  $\sigma$ , МПа.

Формулы (1) и (2) следует также распространять на другие работы, где использовалась установка из [4, 5]. То есть указанные напряжения в других работах отражают размах напряжений в условиях изгиба от стороны образца, где происходит растяжение, до стороны, где происходит сжатие, и их следует делить на 2 для получения значений напряжения на одной из сторон.

Для оценки эффективности виртуальной термодинамической машины рассчитан КПД элемента с ЭПФ из сплава системы Ni–Ti, т.е. отношение полученной механической работы при изгибе и затраченной на нагрев тепловой энергии, для условий изгиба и растяжения.

Удельная затраченная тепловая энергия  $q$  для совершения в материале обратного термоупругого мартенситного превращения и совершения работы  $a$  равна

$$q = C_p \rho \Delta T + \gamma \rho, \quad (3)$$

КПД условного элемента из сплава с ЭПФ равен

$$K = (a/q) \times 100\%, \quad (4)$$

КПД тепловой машины Карно на основе сплава с ЭПФ равен

$$K_{\text{Карно}} = \Delta T / A_f, \quad (5)$$

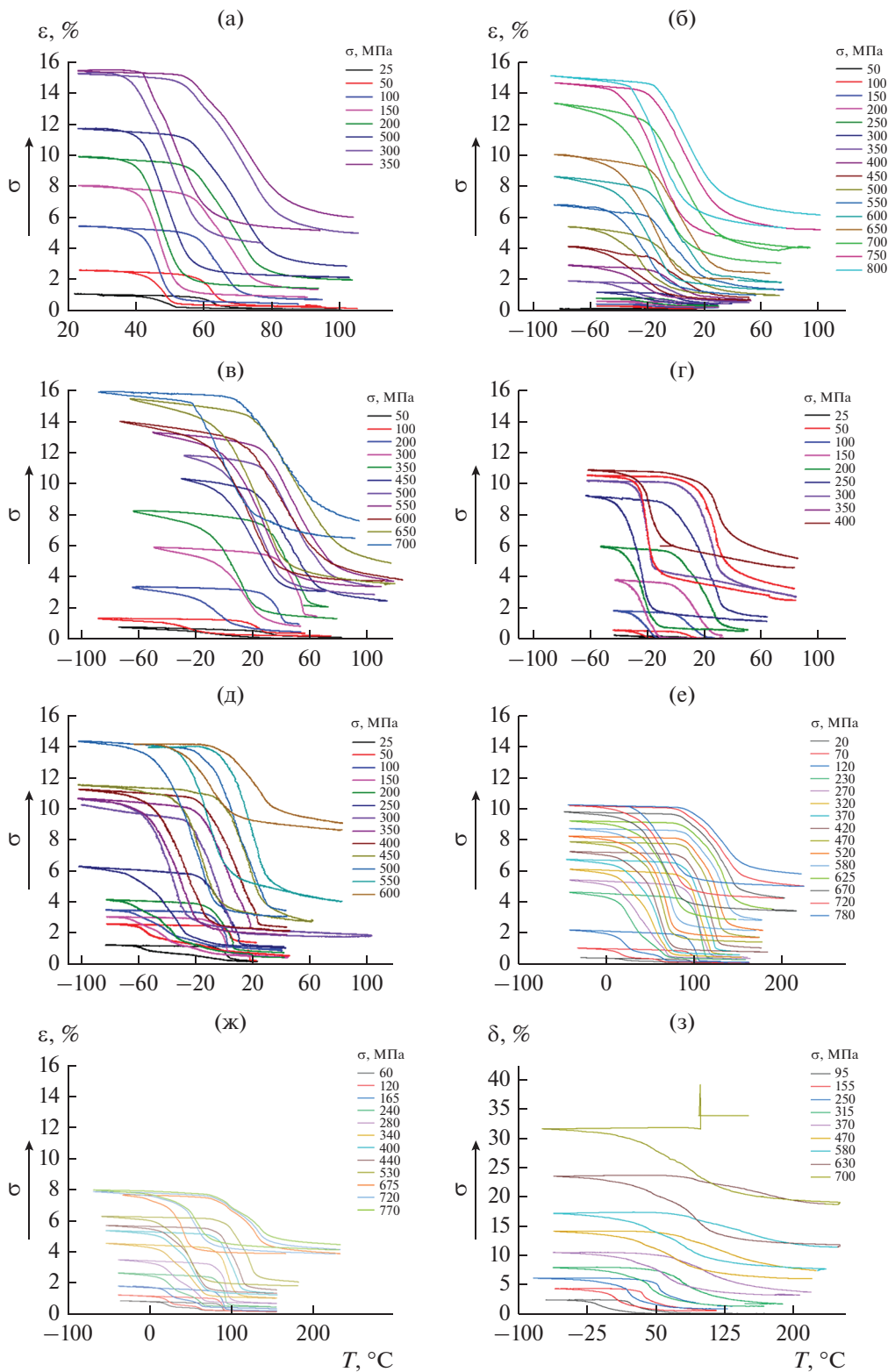
Коэффициент идеальности равен

$$K_i = (K / K_{\text{Карно}}) \times 100\%. \quad (6)$$

Здесь  $C_p = 490$  Дж/(кг К) – среднее значение удельной теплоемкости по данным [6],  $\rho = 6500$  кг/м<sup>3</sup> – плотность [7],  $\gamma = 9$  Дж/г – среднее значение скрытой теплоты превращения из мартенсита в аустенит по данным работы [8],  $\Delta T$  и  $A_f$  (в К) – полная ширина интервала и температура конца обратного термоупругого мартенситного превращения, соответственно.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости деформации при изгибе  $\epsilon$  от температуры  $t$  под действием постоянной на-



**Рис. 1.** Зависимость деформации от температуры и нагрузки для исследуемых образцов (см. табл. 1): 1-1 ГК05 (а), 1-2ТК (б), 1-3 РКУП + ТК (в), 2-1 ГК20 (г), 2-2 РКУП (д), 3-1 ТК450 (е), 3-2 ТК500 (ж), 4-1 П (з).

грузки  $\sigma$  для образцов из табл. 1 в уточненном виде приведены на рис. 1. По представленным зависимостям  $\epsilon = f(t, \sigma)$  в результате дальнейшей

обработки были определены предельные напряжения  $\sigma_{пр}$ , температуры конца обратного термоупругого мартенситного превращения  $A_f$  при  $\sigma_{пр}$ ,

**Таблица 2.** Экстремальные функциональные свойства исследованных образцов и КПД виртуальных исполнительных элементов на их основе

Образец	$\varepsilon_r$ , % при $\sigma_{пр}$	$\sigma_{пр}$ , МПа	$A_f$ , °C при $\sigma_{пр}$	$\Delta t$ , °C, при $\sigma_{пр}$	$a$ изгиба, МДж/м <sup>3</sup> при $\sigma_{пр}$	$q$ , МДж/м <sup>3</sup> при $\sigma_{пр}$	КПД, %	КПД цикла Карно, %	$K_i$ , %
При однократном формовозврате									
1-1 ГК05	10.0	300	89	55	3.3	233.7	1.4	15.2	9.4
1-2 ТК	8.6	750	30	75	7.2	447.1	2.4	24.8	9.7
1-3 РКУП + ТК	8.8	650	78	79	6.4	310.1	2.0	22.5	9.1
2-1 ГК20	7.1	250	34	70	2.0	281.5	0.7	22.8	3.1
2-2 РКУП	10.6	500	30	74	5.9	287.8	2.0	23.8	8.6
3-1 ТК450	6.2	470	150	158	3.2	536.3	0.6	34.8	1.7
3-2 ТК500	5.1	445	152	153	2.5	542.6	0.5	35.7	1.3
4-1 П	7.0	370	143	130	25.9	472.6	5.5	31.3	17.5
При многократном формовозврате с учетом результатов из [10] $\sigma_0 \leq 0.8 \sigma_{пр}$									
1-1 ГК05	8.5	240	84	50	2.3	217.8	1.0	14.0	7.4
1-2 ТК	5.7	600	20	59	3.8	246.4	1.4	23.5	5.8
1-3 РКУП + ТК	7.3	520	70	68	4.2	275.1	1.5	19.8	7.7
2-2 РКУП	8.5	400	24	72	3.8	294.2	1.3	24.2	5.4
4-1 П	5.5	315	109	100	17.3	377.0	4.6	26.2	17.6

величина полного интервала превращения  $\Delta T$  при  $\sigma_{пр}$ .

Для образца 4-1П были установлены температуры, при которых под действием постоянных растягивающих напряжений материал находится исключительно в В19' или В2, что необходимо при испытаниях на растяжение и определения предела текучести и прочности на растяжение, а также позволит с относительной определенностью указать на положение предельных напряжений  $\sigma_{пр}$  на шкале  $\sigma_m - \sigma_\tau - \sigma_B$ .

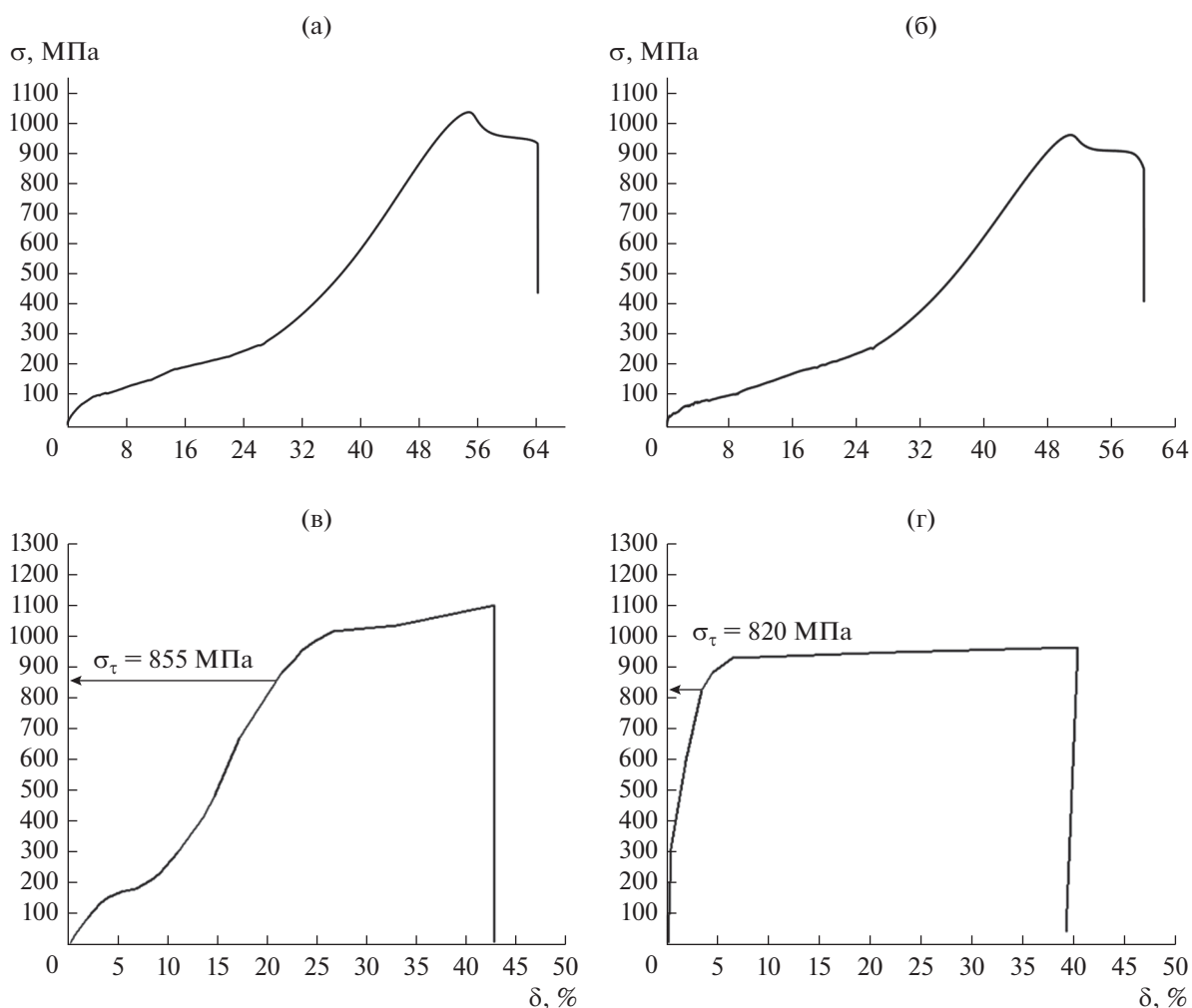
При этом следует обратить внимание на ключевое отличие предельных напряжений  $\sigma_{пр}$ , определяемых в данной работе, и реактивных напряжений  $\sigma_R$ : при определении  $\sigma_{пр}$  образец из материала с ЭПФ совершает работу, т.е. генерирует силу, необходимую для поднятия груза, а при определении  $\sigma_R$  образец жестко закреплен и при формовозврате не совершает механическую работу.

Результаты определения указанных выше характеристик при максимальных значениях обратимой деформации приведены в табл. 2. При расчете КПД цикла Карно значения температур переводились в градусы Кельвина из градусов Цельсия. По результатам измерения зависимостей  $\varepsilon = f(t, \sigma)$  установлено, что наибольшим  $K_i$  в условиях однократного срабатывания обладают материалы, прошедшие теплую ковку (образец 1-2 ТК – 9.7%), горячую ковку (1-1 ГК05 – 9.4%) и комбинацию РКУП и теплойковки (образец 1-3 РКУП + ТК). В табл. 2 также приведены значения обратимой

деформации и развиваемых напряжений для условий многократного (периодического) срабатывания условного исполнительного элемента с учетом результатов, полученных ранее [9]. Именно в работе [9] было установлено, что для сплавов системы Ni–Ti интенсивное накопление пластической деформации при многократном формовозврате под нагрузкой, приводящее к резкому снижению обратимой деформации  $\varepsilon_r$ , начинается при напряжениях свыше  $0.8 \sigma_{пр}$ .

Столь высокие показатели предельных напряжений  $\sigma_{пр}$  в образцах, прошедших теплую ковку (1-2 ТК) и равноканальное угловое прессование в комбинации с теплой ковкой (1-3 РКУП + ТК), объясняются высокой степенью проработки исходной микроструктуры, а именно при деформации ниже  $630^\circ\text{C}$  происходит интенсивная рекристаллизация с уменьшением размера зерна и выделением вторичных фаз типа  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  и  $\text{Ti}_3\text{Ni}_4$ . Однако, как было отмечено выше, наилучшими показателями в части функциональных свойств, а именно комбинацией обратимой деформации и предельных напряжений, обладает образец 1-2 ТК – режим предварительной термической обработки заготовок (“обнуление”) и последующая деформация при пониженной температуре обеспечили минимальное выделение вторичных фаз и высокую рекристаллизацию.

Для установления положения предельных напряжений  $\sigma_{пр}$  на шкале  $\sigma_m - \sigma_\tau - \sigma_B$  отдельно были проведены испытания на растяжение для об-



**Рис. 2.** Кривые растяжения образцов 3-1 ТК450 (а), 3-2 ТК500 (б) и 4-1 П (в, г) при разных температурах испытания: 20°С (а, б), –70°С (в) и 250°С (г).

разцов 3-1 ТК450 и 3-2 ТК500 при комнатной температуре и для 4-1 П при –70 и 250°С – эти температуры были установлены по результатам измерения зависимости  $\epsilon = f(t, \sigma)$ , т.е. при этих температурах материал даже будучи под действием внешних напряжений находится в однофазной области. Кривые растяжения образцов и результаты испытаний на растяжение представлены на рис. 2 и в табл. 3.

По представленным кривым зависимостей были определены следующие механические свойства: деформация в псевдопластической области  $\delta_m$ , %, напряжение превращения из В2 в В19' под нагрузкой  $\sigma_m$ , МПа; напряжение,  $\sigma_{mps}$ , МПа по достижении которого реализуется деформация 6% в В19'; предел текучести  $\sigma_\tau$ , МПа; разница между  $\sigma_m$  и  $\sigma_\tau$ , предел прочности  $\sigma_B$ , МПа; и удлинение  $\delta$ , %.

**Таблица 3.** Механические свойства образцов после испытаний на растяжение

Образец	$T_{испыт}$ , °С	$\delta_m$ , %	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_{mps}$ , МПа	$\sigma_\tau$ , МПа	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\Delta\sigma$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
3-1 ТК450	20	19	75	125	825	470	750	942	48
3-2 ТК500	20	15	75	105	825	445	750	916	36
4-1П	–70	6	–	180	855	370	–	1090	42
	250	0	–	–	820	370	–	965	32

**Таблица 4.** Характеристики виртуальной тепловой машины для условий напряженного состояния при растяжении

Образец	$a$ изгиба, МДж/м <sup>3</sup> при $\sigma_{пр}$	$q$ , МДж/м <sup>3</sup> при $\sigma_{пр}$	КПД, %	КПД цикла Карно, %	$K_i$ , %
При однократном формовозврате					
1-1 ГК05	30.0	233.7	12.8	15.2	84.5
1-2 ТК	64.5	297.4	21.7	24.8	87.6
1-3 РКУП + ТК	57.2	310.1	18.4	22.5	82.0
2-1 ГК20	17.8	281.5	6.3	22.8	27.7
2-2 РКУП	53.0	294.2	18.0	24.3	74.0
3-1 ТК450	29.1	389.7	7.5	28.3	26.4
3-2 ТК500	22.7	294.2	7.7	21.6	35.7
4-1 П	25.9	472.6	5.5	31.3	17.5
При многократном формовозврате с учетом результатов из [10] $\sigma_{-1} \leq 0.8 \sigma_{пр}$					
1-1 ГК05	20.4	217.8	9.4	14.0	66.9
1-2 ТК	34.2	246.4	13.9	20.1	68.9
1-3 РКУП + ТК	38.0	275.1	13.8	19.8	69.6
2-2 РКУП	34.0	294.2	11.6	24.9	46.4
4-1 П	17.3	377.0	4.6	26.2	17.6

Так, предельные напряжения  $\sigma_{пр}$  достаточно сильно отличаются от предела текучести и находятся между  $\sigma_T$  и  $\sigma_m$  и примерно в два раза ниже, чем  $\sigma_T$ .

Возвращаясь к результатам эффективности использования тех или иных видов полуфабрикатов при изготовлении актуаторов на основе сплавов с ЭПФ, следует обратить внимание на высокое КПД образца 4-П, который испытывали на растяжение. В формуле (2) множитель 1/9 появился в результате вывода формулы для случая изгиба, в случае растяжения этот множитель отсутствует, деформацию можно считать однородной по всему сечению и, как следствие, эффективность использования исполнительных элементов в условиях растяжения должна увеличиваться. В табл. 4 приведены характеристики виртуальной тепловой машины для условий напряженного состояния при растяжении.

Так, при условии использования элементов из сплавов с ЭПФ в условиях растяжения, КПД условного исполнительного элемента возрастает в девять раз. Правомочность применения условия  $\sigma_0 \leq 0.8\sigma_{пр}$  для периодического формовозврата под одной и той же нагрузкой, описанного в работе [9], для условий растяжения, будет рассмотрена в дальнейших работах по исследованию функциональной усталости в микропроводах в условиях растяжения на экспериментальной установке [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что по достижении определенного значения изгибающих или растягивающих постоянных напряжений в образце из сплава с ЭПФ при термоциклировании происходит снижение обратимой деформации. Такие напряжения предлагается считать предельными. Экспериментально показано, что для изученных образцов они значительно ниже предела текучести  $\sigma_T$ , примерно в два раза. Наибольшим коэффициентом идеальности 9.7% в условиях однократного срабатывания при изгибе из изученных материалов, обладает термодинамическая машина, рабочим телом которой является материал прутков, полученных методом тепловойковки при 350°C. Для условий периодического действия при напряжениях изгиба в 1.2 раза ниже предельных определено, что коэффициент идеальности составляет 7.7% для материалов, прошедших горячую ковку и комбинацию равноканального углового прессования и тепловойковки. На примере проволоки, полученной методом теплового волочения, показано, что использование сплавов с ЭПФ в условиях растяжения наиболее эффективно. Так, КПД и коэффициент идеальности составляют соответственно 5.5 и 17.5% при однократном формовозврате и 4.6 и 17.6% при периодическом формовозврате.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00783, экспериментальное исследование термомеханических свойств образцов), а также в рамках государственного задания ИМЕТ РАН (тема № 075-00715-22-00, изготовление и термообработка образцов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A.* // *Materials and Design*. 2014. V. 56. P. 1078.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>
2. *Otsuka K., Ren X.* // *Prog. Mater. Sci.* 2005. V. 50. P. 511.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>
3. *Калашиников В.С., Андреев В.А., Коледов В.В. и др.* // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019. Т. 770. С. 45.
4. *Калашиников В.С., Коледов В.В., Кучин Д.С. и др.* // *Приборы и техника эксперимента*. 2018. № 2. С. 139.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816218020155>
5. *Калашиников В.С., Коледов В.В., Кучин Д.С. и др.* // *Приборы и техника эксперимента*. 2022. Т. 65. № 1. С. 139.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816222010049>
6. *Smith J.F., Lück R., Jiang Q. et al.* // *J. Phase Equilibria*. 1993. V. 14. № 4. P. 494.  
<https://doi.org/10.1007/BF02671969>
7. *Stachiv I., Alarcon E., Lamac M.* // *Metals*. 2021. V. 11. № 3. Article No. 415.  
<https://doi.org/10.3390/met11030415>
8. *Wang X., Verlinden B., Humbeeck J.V.* // *Intermetallics*. 2015. V. 62. P. 43.  
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.03.006>
9. *Калашиников В.С., Мусабиров И.И., Коледов В.В. и др.* // *ЖТФ*. 2020. Т. 90. № 4. С. 603.  
<https://doi.org/10.21883/JTF.2020.04.49084.110-19>