

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ  
ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В СПЛАВЕ Ti-Ni-Nb-Zr С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ  
ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В  
УСТРОЙСТВАХ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Попов Н.Н., Сысоева Т.И., Щедрина Е.В., Пресняков Д.А., Гришин Е.Н.**

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный  
Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики», Саров Нижегородской обл., Россия*

popov@astra.vniief.ru

Ранее авторами проводился ряд исследований по определению термомеханических характеристик (ТМХ) сплавов с памятью формы (СПФ) [1] с использованием созданной экспериментально-методической базы [2] для дальнейшей разработки различных технологий на их основе. Однако в настоящее время возникает необходимость расширять диапазон исследуемых систем СПФ и возможности их практического применения за счет поиска новых рецептов СПФ и режимов их обработки [3, 4]. Поэтому цель данной работы заключается в определении условий наведения деформации СПФ для получения у них наилучших эксплуатационных характеристик. Решение этих проблем действительно будет способствовать широкому инновационному внедрению этих уникальных материалов в промышленность, в частности, в бурно развивающуюся атомную энергетику.

Для проведения исследований был выбран СПФ состава 43Ti-46Ni-9Nb-2Zr (ат.%) в прессованном состоянии. Термообработку сплава проводили по режиму отжига в вакууме при температуре 850 °С в течение 4 часов, охлаждение с печью. Деформацию образцам сплава наводили растяжением: 1) при различной заданной общей деформации  $\epsilon_0$  (6 %, 11 %, 15 %, 25 %) при постоянных температуре  $T_d = (-60 \div -70)^\circ\text{C}$  и скорости  $\dot{\epsilon} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  наведения деформации; 2) при различной температуре  $T_d ((-60 \div -70)^\circ\text{C}, (0 \div -5)^\circ\text{C}, 24^\circ\text{C})$  при постоянных  $\epsilon_0 = 11\%$  и  $\dot{\epsilon} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ .

Методом электронно-микроскопического анализа исследована микроструктура прессованного сплава 43Ti-46Ni-9Nb-2Zr (ат.%) после проявления им ЭПФ в результате нагрева (см. рис. 1). Установлено, что во всех образцах основной фазой является интерметаллид TiNi в виде крупных зерен серого цвета с примесью ниобия (от 3,2 до 3,8 ат.%) и циркония (от 2,0 до 2,5 ат.%). В межзеренном пространстве наблюдается эвтектика (Ti,Ni,Nb) пластинчатой или скелетообразной формы, представляющая собой

чередование прослоек интерметаллида TiNi и твердого раствора на основе ниобия. Границы зерен TiNi окаймлены включениями ниобия белого цвета округлой или пластинчатой формы размером от 5 до 15 мкм, легированного Ti, Ni и Zr. Также в структуре сплава присутствуют отдельные включения темно-серого цвета размером от 15 до 30 мкм, которые расположены в более мягкой составляющей структуры – эвтектике (Ti,Ni,Nb) – и идентифицированы как Ti<sub>2</sub>Ni, легированный Nb и Zr.

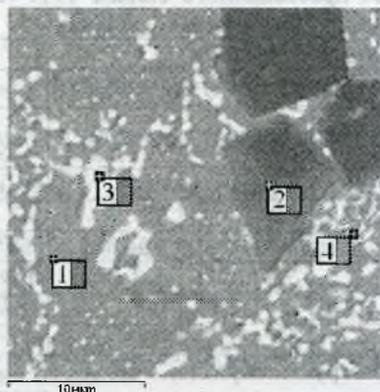


Рисунок 1. Микроструктура прессованного сплава 43Ti-46Ni-9Nb-2Zr (ат.%) после проявления им ЭПФ, полученная в режиме вторичных электронов: 1 – TiNi; 2 – Ti<sub>2</sub>Ni, 3 – Nb, 4 – эвтектика (Ti, Ni, Nb)

Методом рентгенофазового анализа исследованы мартенситные превращения (МП) при проявлении ЭПФ после наведения сплаву деформации растяжением при различных условиях; определены температуры МП с погрешностью ±5 °C (см. табл. 1).

Таблица 1. Схемы и температуры начала и окончания обратного мартенситного превращения в образцах прессованного сплава 43Ti-46Ni-9Nb-2Zr (ат.%) при проявлении ими ЭПФ после наведения деформации при различных условиях

Условия наведения деформации	Схема МП с указанием процентного содержания B2-аустенита и B19'-мартенсита	Температуры начала и окончания обратного МП при проявлении ЭПФ, °C		Ширина интервала $ A'_{s\text{ЭПФ}} - A'_{f\text{ЭПФ}} $
		$A'_{s\text{ЭПФ}}$	$A'_{f\text{ЭПФ}}$	
$T_d = (-60 \div -70) \text{ }^\circ\text{C}$ , $\dot{\epsilon} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$				
$\epsilon_0 = 6 \%$	62%B19'+38%B2→100%B2	-15	15	30
$\epsilon_0 = 11 \%$	80%B19'+20%B2→100%B2	25	40	15
$\epsilon_0 = 15 \%$	82%B19'+18%B2→100%B2	40	60	20
$\epsilon_0 = 25 \%$	100%B19'→31%B2+69%B19'	60	>100	>40
$\epsilon_0 = 11 \%$ , $\dot{\epsilon} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$				
$T_d = (-60 \div -70) \text{ }^\circ\text{C}$	80%B19'+20%B2→100%B2	25	40	15
$T_d = (0 \div -5) \text{ }^\circ\text{C}$	73%B19'+27%B2→100%B2	30	50	20
$T_d = 24 \text{ }^\circ\text{C}$	27%B19'+73%B2→20%B19'+80%B2	50	>100	>50

Рассчитаны параметры субструктуры сплава после проявления им ЭПФ. Показано, что при деформации в интервалах величин  $\epsilon_0$  от 6 % до 15 % и температур  $T_d$  от  $(-60 \div -70) \text{ }^\circ\text{C}$  до  $(0 \div -5) \text{ }^\circ\text{C}$  количество дефектов структуры в виде дислокаций

минимально и, соответственно, меньше препятствий для распространения мартенситного превращения.

Определены термомеханические характеристики прессованного сплава 43Ti-46Ni-9Nb-2Zr (ат.%) при проявлении ЭПФ после наведения ему деформации растяжением при различных условиях (см. табл. 2).

Таблица 2. Средние значения ТМХ прессованного сплава 43Ti-46Ni-9Nb-2Zr (ат.%) при проявлении ЭПФ после наведения ему деформации при различных условиях

ТМХ	Условия наведения деформации							
	$T_d = (-60 \div -70) \text{ }^\circ\text{C}$ , $\dot{\varepsilon}' \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$				$\varepsilon_0 = 11 \%$ , $\dot{\varepsilon}' \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$			
	$\varepsilon_0 = 6 \%$	$\varepsilon_0 = 11 \%$	$\varepsilon_0 = 15 \%$	$\varepsilon_0 = 25 \%$	$T_d = (-60 \div -70) \text{ }^\circ\text{C}$	$T_d = (0 \div -5) \text{ }^\circ\text{C}$	$T_d = 24 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\varepsilon_0, \%$	4,3	8,0	11	18,4	8,0	6,8	6,0	
$A_{s \text{ ЭПФ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	8	47	50	72	47	32	51	
$A_{f \text{ ЭПФ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	25	58	64	104	58	51	97	
$\varepsilon_{\text{ЭПФ}}, \%$	3	6,9	7,7	7,3	6,9	4,5	0,6	
$\eta_{\text{ЭПФ}}$	0,7	0,87	0,7	0,4	0,87	0,65	0,10	
$ A_{s \text{ ЭПФ}} - A_{f \text{ ЭПФ}} , \text{ }^\circ\text{C}$	17	11	14	32	11	19	46	

$\varepsilon_p$  – остаточная деформация после разгрузки образца;  $A_{s \text{ ЭПФ}}, A_{f \text{ ЭПФ}}$  – характеристические температуры начала и окончания формовосстановления при проявлении ЭПФ (во время нагрева);  $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}$  – величина термически обратимой деформации при ЭПФ;  $\eta_{\text{ЭПФ}}$  – степень восстановления формы;  $|A_{s \text{ ЭПФ}} - A_{f \text{ ЭПФ}}|$  – интервал формовосстановления

В результате проведенных экспериментов установлено, что наведение деформации прессованному сплаву 43Ti-46Ni-9Nb-2Zr (ат.%) необходимо проводить в интервалах  $\varepsilon_0$  от 11 % до 15 % при  $T_d = (-60 \div -70) \text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью  $\dot{\varepsilon}' \approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ . Соблюдение указанных условий наведения деформации позволяет получать в сплаве оптимальное сочетание структурных и термомеханических свойств, а именно структуру со значительным содержанием мартенситной фазы B19' перед проявлением ЭПФ ~80 % и минимальным количеством дефектов в виде дислокаций при высоких значениях характеристик памяти формы:  $\varepsilon_{\text{ЭПФ}} = (6,9 \div 7,7) \%$  и  $\eta_{\text{ЭПФ}} = (0,7 \div 0,87)$ . Это делает возможным использование данного сплава в устройствах безопасности, в частности, в атомной энергетике.

1. Попов Н.Н. Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. 315 с.
2. Попов Н.Н. Заводская лаборатория: Диагностика материалов, 2006, т. 72, № 12. С. 34-39.
3. Абрамов В.Я., Александрова Н.М., Боровков Д.В. и др. Физические основы материаловедения, 2007, № 7. С. 5-10.
4. Попов Н.Н., Ларькин В.Ф., Сысоева Т.И. и др. Сборник тезисов 54 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 11-15 ноября 2013 г., г. Екатеринбург. С. 165.