

**ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ТЕМПЕРАТУРЫ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ И ЭФФЕКТ
ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА TiNiFe**

Ю.Н. Платонова¹

Научные руководители: гл.н.с., д.ф.-м.н. И.В.Киреева², профессор, д.ф.-м.н. Ю.И. Чумляков²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

² Сибирский физико-технический институт Томского государственного университета,

Россия, г. Томск, пл. Новособорная, 1, 634050

E-mail: lesoto@sibmail.com

**THE INFLUENCE OF HYDROGEN ON TEMPERATURES OF MARTENSITIC
TRANSFORMATION AND SHAPE MEMORY EFFECT IN TiNiFe SINGLE CRYSTALS**

Yu.N. Platonova¹

Scientific supervisors: Chief Scientist., Dr. I.V. Kireeva², Prof., Dr. Yu.I. Chumlyakov²

¹ Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, 30 Lenina Ave., 634050

² Siberian Physical-Technical Institute at Tomsk State University, Russia, Tomsk, sq. Novosobornaya, 1, 634050

E-mail: lesoto@sibmail.com

Annotation. On $[1\bar{2}3]$ single crystals Ti-49Ni-1Fe alloy investigated the influence of hydrogen on thermoelastic martensitic transformations. It is shown, that hydrogen increases the temperatures of direct martensitic transformation, does not affect the temperature of the reverse transformation, reduces the value of the shape memory effect under tensile.

Сплавы на основе никелида титана используются в промышленности и медицине благодаря их уникальным функциональным свойствам, таким как эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ). Известно, что титан и никель являются гидридообразующими материалами. Кроме того концентрация водорода в материале зависит от фазы, в которую он входит. А именно, мартенситная фаза поглощает водород в меньших количествах, чем высокотемпературная [1].

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния насыщения водородом на температуры мартенситного превращения (МП) и ЭПФ для монокристаллов сплава Ti-49%Ni-1%Fe (ат.%), ориентированных вдоль $[1\bar{2}3]$ направления, которые при комнатной температуре находятся в мартенситном состоянии.

Монокристаллы сплава Fe-49%Ni-1%Fe (ат.%) получены методом Бриджмена в среде инертного газа. Монокристаллические образцы гомогенизировали при $T=1223\text{K}$ в гелии в течение времени 0,5 ч с последующей закалкой в воду при комнатной температуре. Наводороживание осуществлялось в 1М растворе H_2SO_4 при 295K и плотности тока 1400 A/m^2 .

На рис.1 представлены кривые зависимости электросопротивления от температуры $\rho(T)$, на рис.2 – термические гистерезисы в координатах «объемная доля мартенсита-температура» для кристаллов Ti-49Ni-1Fe в состоянии без водорода и после насыщения водородом. Количественные изменения температур МП и величин, характеризующих термический гистерезис, представлены в таблице 1.

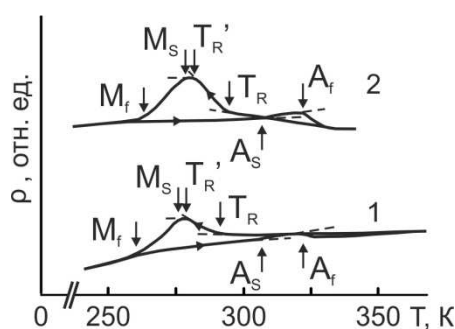


Рис. 1. Зависимость электросопротивления от температуры для $[1\bar{2}3]$ монокристаллов Ti-49Ni-1Fe: 1 – без водорода; 2 – после наводороживания в течение 2 ч. в H_2SO_4 при $T=295K$ и $j=1400 A/m^2$

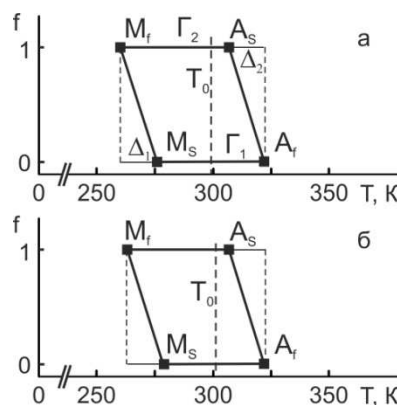


Рис. 2. Термические гистерезисы для $[1\bar{2}3]$ монокристаллов Ti-49Ni-1Fe: 1 – без водорода; 2 – после наводороживания в течение 2 ч. в H_2SO_4 при $T=295K$ и $j=1400 A/m^2$

Таблица 1

Температуры мартенситного превращения для монокристаллов сплава Ti-49Ni-1Fe

	T_R, K	$T_{R'}, K$	M_s, K	M_f, K	A_s, K	A_f, K	T_0, K	Δ_1, K	Δ_2, K	Γ_1, K	Γ_2, K
Кристалл без H_2	292	279	276	260	307	322	299	16	15	46	47
+2ч H_2	295	282	280	264	307	322	301	16	15	42	43

Из рис.1 видно, что в исследуемом сплаве в состоянии с водородом и без водорода при охлаждении наблюдается двухстадийное МП через промежуточную R-фазу: B2-R-B19' МП. При нагреве обратное превращение не разделяется, и наблюдается общий большой переход B19'-B2. Наводороживание в течение 2 часов приводит к повышению температур прямого МП (M_s , M_f) на 4K, в то время как температуры обратного МП (A_s , A_f) водород не изменяет. Аналогичное влияние водорода на температуры МП в TiNi получено в работе [2], где водород вводили при комнатной температуре в аустенитную фазу. После насыщения водородом пики переходов становятся более выраженными по отношению к кривым в состоянии без водорода. Резкое падение электросопротивления после температуры A_f не относится к обратному R-B19' переходу, поскольку R-фаза обладает узким температурным гистерезисом, а связано, согласно [2], с влиянием водорода на образование новой фазы.

В состоянии без водорода значения переохлаждения $\Delta_1=M_f-M_s$ и перегрева $\Delta_2=A_s-A_f$, равны, соответственно, 16K и 15K, и свидетельствуют о накоплении упругой энергии при прямом МП и её снятии при обратном переходе. Величины термического гистерезиса $\Gamma_1=A_f-M_s$ и $\Gamma_2=A_s-M_f$ в исходном состоянии оказываются близкими друг другу, в результате гистерезис имеет симметричный вид: $\Delta_1/\Delta_2 = 1,06$, $\Gamma_1/\Gamma_2 = 0,98$. После насыщения водородом симметричность не изменяется, но термический гистерезис становится меньше из-за повышения M_s при наводороживании, то есть водород способствует облегчению зарождения мартенсита. При введении водорода в аустенитную фазу сплава TiNi при B2-B19' МП [2], напротив, наблюдается значительное понижение температур МП, и гистерезис становится

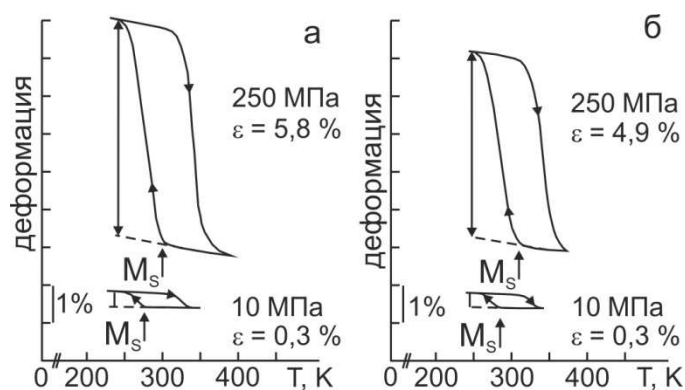


Рис.3. Кривые зависимости величины ЭПФ от уровня приложенных внешних напряжений для $[\bar{1}23]$ монокристаллов Ti-49Ni-1Fe при деформации растяжением: а - без водорода, б - после наводороживания в течение 2 ч. в H_2SO_4 при $T=295K$ и $j=1400 A/m^2$

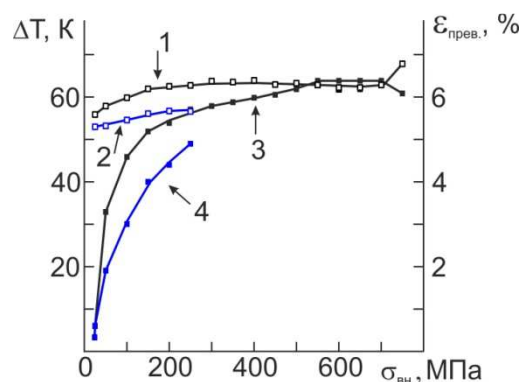


Рис.4. Зависимость термического гистерезиса (1,2) и величины ЭПФ (3,4) от уровня приложенных внешних напряжений для $[\bar{1}23]$ монокристаллов Ti-49Ni-1Fe при деформации растяжением: 1,3 - без водорода, 2,4 - после наводороживания в течение 2 ч. в H_2SO_4 при $T=295K$ и $j=1400 A/m^2$

несимметричным. Таким образом, изменение температур МП при насыщении водородом чувствительно к тому, в какой фазе находится кристалл во время наводороживания.

На рис.3 и рис.4 представлены исследования ЭПФ под нагрузкой, которые позволяют определить влияние внешних напряжений $\sigma_{вн}$, и концентрации водорода не только на температуры МП, термический гистерезис ΔT , но и на величину деформации превращения $\epsilon_{прев}$.

Видно, что в кристаллах в обоих состояниях наблюдается ЭПФ. При минимальных напряжениях $\sigma=10MPa$ ($\epsilon_{прев}<1\%$) МП связан с превращением R-фазы, на которое водород не оказывает влияния. При $\sigma_{вн}>30MPa$ реализуется B2-R-B19' МП, которое в исходном состоянии при $\sigma_{вн}=550MPa$ достигает максимума в 6,4%, а в кристаллах с водородом – 4,9% наблюдается при $\sigma_{вн}=250MPa$. При этом температурный гистерезис в наводороженных образцах остается симметричным, но становится меньше по отношению к исходным, что согласуется с данными, полученными при исследовании зависимости $\rho(T)$ (рис.1,2). В случае насыщения водородом аустенитной фазы, гистерезис становится несимметричным [2]. Такое различие может быть связано с разной концентрацией водорода, вводимого в мартенситную или аустенитную фазу, а также с влиянием водорода на структуру мартенсита.

Работа выполнена в рамках проектной части госзадания Минобрнауки РФ, грант 16.1346.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спивак Л.В. Синергетические эффекты деформационного отклика в термодинамических открытых системах металл-водород // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178. – № 9. – С. 897–922.
2. Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Панченко Е.Ю., Кириллов В.А., Тимофеева Е.Е., Крестина И.В., Данильсон Ю.Н., Karaman I., Maier H., Cesari E. Термоупругие мартенситные превращения в монокристаллах, содержащих дисперсные частицы // Известия ВУЗов. Физика. – 2011. – Т. 54. – №8. – С. 96–108.