

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томский государственный архитектурно-строительный университет
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Сборник научных трудов
XII Международной конференция студентов и молодых ученых

21–24 апреля 2015 г.

PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

XII International Conference of students and young scientists

21–24 April, 2015

Томск 2015

УДК 50(063)
ББК 20л0
П27

Перспективы развития фундаментальных наук [Электронный П27 ресурс] : сборник трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых (Томск, 21–24 апреля 2015 г.) / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 1556 с.

ISBN 978-5-4387-0560-4

Сборник содержит труды участников XII Международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук». Включает доклады студентов и молодых ученых, представленные на секциях «Физика», «Химия», «Математика», «Биология и медицина», «Нanomатериалы и нанотехнологии», «Технология», «Конкурс архитектурных работ», «IT-технологии и электроника».

Предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей в области естественных наук и высшей математики.

УДК 50(063)
ББК 20л0

Редакционная коллегия

И.А. Курзина, доктор физико-математических наук, доцент ТПУ.
Г.А. Воронова, кандидат химических наук, доцент ТПУ.
С.А. Поробова, инженер ТГАСУ.

ISBN 978-5-4387-0560-4

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ,
электронный текст, 2015

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМОУПРУГИХ
МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ TiNiHfPd ПРИ ДЕФОРМАЦИИ
СЖАТИЕМ**

А.И. Тагильцев, Е.Е. Тимофеева, Е.Ю. Панченко, Ю.И. Чумляков

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук Е.Е. Тимофеева

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: antontgl@gmail.com

**EFFECT OF THERMAL TREATMENT ON REGULARITY OF THERMOELASTIC MARTENSITIC
TRANSFORMATIONS IN TiNiHfPd SINGLE CRYSTALS IN COMPRESSION**

A.I. Tagiltsev, E.E. Timofeeva, E.Yu. Panchenko, Yu.I. Chumlyakov

Scientific Supervisor: PhD E.E. Timofeeva

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: antontgl@gmail.com

Annotation. *The effect of thermal treatment on regularity of development of thermoelastic martensitic transformations in $\text{Ti}_{29.7}\text{Ni}_{45.3}\text{Hf}_{20}\text{Pd}_5$ [011]-oriented single crystals in compression was investigated. It is shown, that thermal treatments (homogenization 1423 K, 4 hours and annealing 1173 K, 3 hours followed by quenching in water) lead to increasing transformation temperatures on 53 K and 160 K, decreasing reversible strain to 1,8% and 1,4% and growth of coefficient of dependence of stresses from temperature to 5 MPa/K and 5,9 MPa/K in comparison with original state, that is connected to precipitation of disperse particles.*

Сплавы, способные испытывать термоупругие мартенситные превращения, являются актуальными и могут находить широкое применение в различных сферах деятельности. На термоупругом характере превращения основаны такие функциональные свойства как СЭ и ЭПФ [1]. Одним из ярких представителей является TiNi , который используется во многих отраслях промышленности: ракетостроение, машиностроение, авиастроение и др. [1]. Однако, известно, что малые критические напряжения (<700 МПа) и температуры мартенситного превращения (<150 °С) мешают более широкому использованию данного материала. Чтобы исключить данные недостатки используют легирование. Легирование TiNi такими элементами, как Hf и Pd, приводит к повышению прочностных свойств материала, увеличению демпфирующей способностью [2].

Целью нашей работы является исследование закономерностей термоупругих мартенситных превращений в [011]-монокристаллах сплава номинального состава $\text{Ti}_{29.7}\text{Ni}_{45.3}\text{Hf}_{20}\text{Pd}_5$ (ат. %) в зависимости от структурного состояния после различных термических обработок. Выбор такого состава обоснован не только высокими прочностными свойствами (критические напряжения и предел текучести >2000 МПа), но и высокой демпфирующей способностью материала из-за широкого механического гистерезиса (>1200 МПа) [2]. Для исследования были выбраны монокристаллы в следующих структурных состояниях: после роста в исходном состоянии без дополнительных термических обработок (I), после гомогенизации при 1323 K, 4 часа (II) и после отжига при 1173 K, 3 часа с последующей

закалкой (III). После гомогенизации кристаллы медленно охлаждали со скоростью 20-30 К/мин. Ориентация [011] выбрана, исходя из теоретических расчетов деформации превращения, поскольку обладает максимальными значениями деформации [3]. Электронно-микроскопически было доказано, что после роста сплав находится в однофазном состоянии и имеет при $T=T_k$ B2 кристаллическую структуру.

Монокристаллы выращивались методом Бриджмена в среде инертного газа, образцы имели размеры $(3 \times 3 \times 6)$ мм³, механически шлифовались и электролитически полировались в электролите 5% HClO₄ + 95% CH₃COOH при $T=293$ К, $U=20$ В.

Монокристаллы TiNiHfPd во всех структурных состояниях содержат дендриты. Результаты полуколичественного элементного анализа (проведен на растровом электронном микроскопе Supra VP55) матрицы и дендритов показывают, что гомогенизационный отжиг монокристаллов NiTiHfPd не приводит к полному растворению дендритов, но химические элементы в дендритах распределены более равномерно, чем в состоянии после роста. Дендриты практически не содержат Ni и Pd (0 и 0,1 ат. %), обеднены по Ti (15,3 ат.%) и сильно обогащены по Hf (84,6 ат.%), поэтому химический состав матрицы в пределах погрешности 5% отклоняется от номинального значения и составляет Ni = 46,4 ат.%, Ti = 30,7 ат.%, Hf = 18,3 ат.%, Pd = 4,6 ат.%.

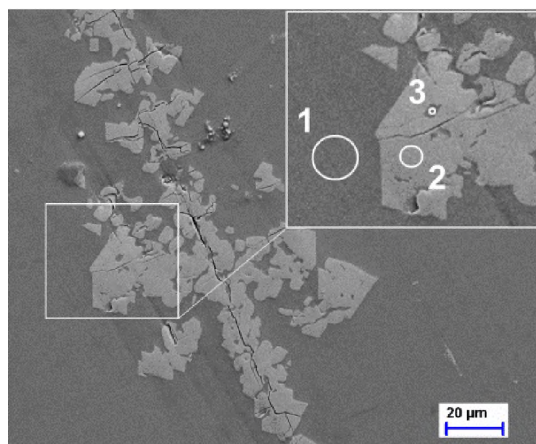


Рис. 1. Поверхность монокристаллов NiTiHfPd. Цифрами отмечены области, на которых проводился полуколичественный элементный анализ.

Термообработки (II) и (III) приводят к увеличению температуры M_s – начала прямого мартенситного превращения на 53 К и 160 К соответственно, по сравнению с состоянием (I) (рис. 2, 3 а, б, в).

На рисунке 2 представлены зависимости осевых критических напряжений образования мартенсита от температуры $\sigma(T)$ для монокристаллов в трех состояниях. Температурный интервал, расположенный выше точки M_s примечателен тем, что критические напряжения, необходимые для образования мартенсита, растут с увеличением температуры в соответствии с уравнением Клапейрона – Клаузиуса [1]:

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\Delta S}{\varepsilon_{tr}} = -\frac{\Delta H}{T_0 \varepsilon_{tr}}, \quad (1)$$

где ΔS – изменение энтропии, ΔH – изменение энтальпии при превращении на единицу объема, ε_0 – деформация, обусловленная превращением, T_0 – температура химического равновесия мартенситной и аустенитной фаз.

Коэффициент $\alpha = d\sigma/dT$ характеризует рост напряжений с увеличением температуры и зависит от термообработки: $\alpha_I=3,4$ МПа/К, $\alpha_{II}=5$ МПа/К, $\alpha_{III}=5,9$ МПа/К. Зависимость α от термообработки объясняется, исходя из уравнения Клапейрона-Клаузиуса: большему значению α соответствует меньшее значение деформации превращения (рис. 2, 3). На рисунке 3 представлены кривые $\sigma(\varepsilon)$ для состояний (I)-(III). Из представленных рисунков видно, что во всех состояниях наблюдается увеличение деформации превращения при увеличении приложенных напряжений. В состояниях (II) и (III) максимальная

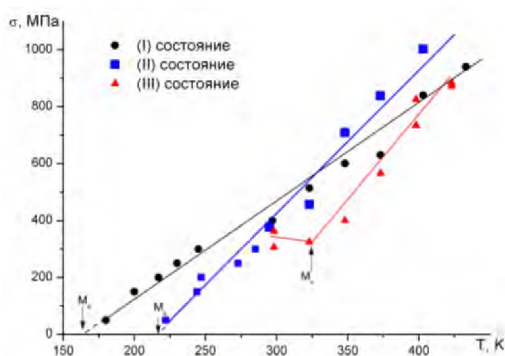


Рис. 2. Зависимость критических напряжений образования мартенсита от температуры для $TiNiHfPd$ в различных состояниях: (I) – после роста, (II) – гомогенизационный отжиг 1323K, 4 часа, (III) – отжиг при 1173K, 3 часа с последующей закалкой.

величина деформации не превышает 1,8 % при 200–250 МПа, тогда как в состоянии (I) максимальная величина деформации больше в 2,4 раза и равна 4,3 % при 250 МПа.

Увеличение температуры M_s , увеличение значений коэффициента α и уменьшение деформации превращения в состояниях (II) и (III), по сравнению с состоянием (I) может быть связано с выделением частиц второй фазы, которые появляются при $T > 500\div 600$ K [2]. Следует отметить, что после гомогенизации проводилось медленное охлаждение, в течение которого так же возможно выделение частиц. Во-первых, в гетерофазных кристаллах наличие локальных внутренних напряжений $\Delta\sigma_{вн}$ от

частиц, возникающих из-за разницы параметров решеток частицы и матрицы, способствует зарождению кристаллов мартенсита на границах «частица-матрица» и приводит к росту температуры M_s , в соответствии с уравнением Клапейрона-Клаузиуса [4]. Во-вторых, частицы не испытывают МП. Следовательно, после выделения частиц объемная доля матрицы, испытывающей МП, уменьшается. В-третьих, в процессе прямого МП частицы деформируются упруго и накапливают упругую энергию, которая является движущей силой обратного МП.

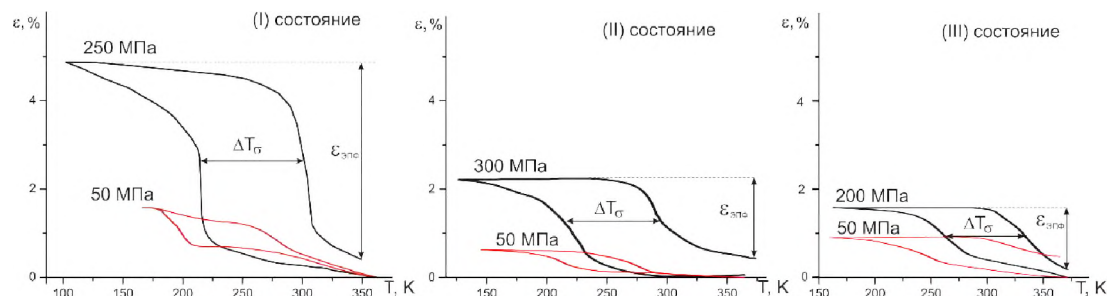


Рисунок 3 – Кривые $\varepsilon(T)$ для монокристалла $TiNiHfPd$ для трех состояний: (I) – после роста (а), (II) – гомогенизационный отжиг 1323K (б), 4 часа, (III) – отжиг при 1173K, 3 часа с последующей закалкой (в)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 14-29-00012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otsuka K., Wayman C.M.. Shape memory materials. Cambridge University PRESS. – 1998. – 284 p.
2. E. Acar, H.E. Karaca Orientation dependence of the shape memory properties in aged $Ni_{45.3}Ti_{29.7}Hf_{20}Pd_5$ single crystals// Intermetallics. – 2014. – Vol. 54. – p. 60-68.
3. Aaron P. Stebner, Glen S. Bigelow, Jin Yang. Transformation strains and temperatures of a nickel–titanium–hafnium high temperature shape memory alloy// Acta Mater. – 2014. – Vol. 76. – p.40-53.
4. Hornbogen E., Mertinger V., Wurzel D. Microstructure and tensile properties of two binary NiTi-alloys // Scripta Mater. – 2001. – V. 44. – P.171-178.