



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Сборник научных трудов
XVII Международной конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых

РОССИЯ, ТОМСК, 21 – 24 апреля 2020 г.

Том 1. Физика

PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

Abstracts
XVII International Conference of Students
and Young Scientists

RUSSIA, TOMSK, April 21 – 24, 2020

Volume 1. Physics

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТЬ В ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ
МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА CoNiAl**

Э.И. Янушоните, А.С. Ефтифеева

Научные руководители: доцент, д.ф.-м.н. Е.Ю. Панченко, профессор, д.ф.-м.н. Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: vanushonite98@mail.ru

**HIGH TEMPERATURE SUPERELASTICITY IN DISPERSION-STRENGTHENED IN SINGLE
CRYSTALS OF CoNiAl ALLOY**

E.I. Yanushonite, A.S. Eftifeeva

Scientific Supervisors: Assoc. prof., Dr. E.Yu. Panchenko, Prof., Dr. Y.I. Chumlyakov

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

E-mail: vanushonite98@mail.ru

Abstract. *In this work, the effect of the aging at 573 K on the functional properties in CoNiAl single crystals oriented along the $[001]_{B2}$ direction were studied. It was experimentally shown that aging reduces the martensitic transformation temperatures by 52 K and increases the interval of superelasticity up to 325 K due to the dispersed ε -Co particles precipitation.*

Введение. В настоящее время для создания датчиков и актюаторов, применяемых в автомобильной и авиакосмической промышленности, используют материалы с памятью формы. Например, широкое практическое применение имеют сплавы на основе TiNi, однако их рабочий интервал температур находится вблизи комнатной температуры и при напряжениях более 600 МПа наблюдается пластическая деформация аустенита и необратимая деформация [1]. Высокотемпературную сверхэластичность (СЭ) в широком интервале температур 270 К и большой уровень критических напряжений пластического течения высокотемпературной фазы до 740 МПа в закаленном состоянии демонстрируют монокристаллы ферромагнитного сплава CoNiAl, испытывающие одностадийное B2-L1₀ мартенситное превращение (МП) [2]. Актуальной задачей является улучшение функциональных свойств данного материала с помощью старения в аустенитном состоянии, позволяющее упрочнить материал, расширить рабочий интервал температур и гарантировать высокую циклическую стабильность функциональных свойств [3]. Поэтому цель данной работы заключается в исследовании влияния старения в аустенитном состоянии на развитие термоупругих МП, эффекта памяти формы (ЭПФ) и циклической стабильности СЭ в монокристаллах CoNiAl, ориентированных вдоль $[001]_{B2}$ -направления.

Экспериментальная часть. Монокристаллы ферромагнитного сплава Co₃₅Ni₃₅Al₃₀ (ат. %) выращены методом Бриджмена. Температуры B2-L1₀ МП определяли по температурной зависимости электросопротивления с использованием образцов на растяжение с площадью поперечного сечения $S = 2,86 \text{ мм}^2$ и длиной рабочей части $L = 12 \text{ мм}$. Для механических испытаний были использованы образцы на сжатие с $S = 9 \text{ мм}^2$ и $L = 6 \text{ мм}$. Ось сжатия/растяжения соответствует длинной стороне образца и имеет кристаллографическую ориентацию $[001]_{B2}$. На образцах проводили гомогенизационный

отжиг при 1623 К, 0,5 ч с последующей закалкой в воду комнатной температуры (закаленное состояние). Далее проводили старение при температуре 573 К, 0,5-2,0 ч.

Результаты. Структура кристаллов после закалки представляет двухфазное состояние: В2-матрица аустенита и частицы γ -фазы. Частицы γ -фазы имеют ГЦК решетку, не испытывают МП и повышают пластичность В2-сплавов [4]. Размер частиц ≥ 100 мкм, объемная доля $\sim 1 \div 2$ %. Как показано в работах [2, 3], после старения помимо γ -фазы в В2-матрице присутствуют наноразмерные частицы ϵ -Со с ГПУ решеткой. Их наличие приводит к уменьшению температур МП, увеличению температурного гистерезиса и интервалов МП в состаренных кристаллах по сравнению с закаленными.

Проведено исследование влияния продолжительности старения при температуре 573 К на температуры МП. На рис. 1 показана зависимость температур начала прямого МП M_s от продолжительности старения t . В закаленных монокристаллах температура $M_s = 271$ К. Видно, что M_s уменьшается с увеличением продолжительности старения t . Изменение температуры M_s после старения при 573 К 0,5 ч составляет $\Delta M_s = 52$ К по сравнению с исходным состоянием. Дальнейшее увеличение продолжительности старения до $t = 2$ ч приводит к уменьшению температуры до $M_s = 184$ К.

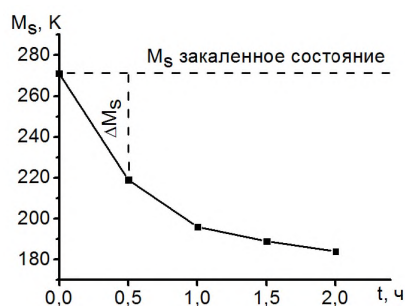


Рис. 1. Зависимость $M_s(t)$ в монокристаллах CoNiAl, состаренных при 573 К

Закаленные и состаренные при 573 К 0,5 ч монокристаллы демонстрируют ЭПФ – на рис. 2 (а), (б) показаны соответствующие зависимости $|\epsilon_{ЭПФ}|(T)$ под сжимающей нагрузкой. Выявлено, что для реализации МП при охлаждении/нагреве под нагрузкой в закаленных кристаллах минимальные напряжения составляют 2 МПа, для состаренных кристаллов превышают это значение. Ниже этих минимальных напряжений во всех кристаллах во время охлаждения/нагрева макроскопическая деформация не наблюдается, т.к. образуется самоаккомодирующая структура $L1_0$ -мартенсита. С увеличением $\sigma_{вн}$ растет величина обратимой деформации до максимального значения $|\epsilon_{ЭПФ}| = 3,4$ % при $\sigma_{вн} = 25$ МПа в закаленных кристаллах, а в состаренных максимальное значение достигается уже при $\sigma_{вн} = 10$ МПа и составляет $|\epsilon_{ЭПФ}| = 3,6$ %. Экспериментально полученные значения $|\epsilon_{ЭПФ}|$ для всех исследуемых состояний меньше по сравнению с теоретически рассчитанной деформацией решетки $\sim 4,6$ % при сжатии вдоль [001]-направления во время развития В2- $L1_0$ МП [5]. Такое различие связано с наличием γ -частиц в закаленных кристаллах и в дополнение к ним дисперсных частиц ϵ -Со в состаренных монокристаллах CoNiAl. После достижения максимальных значений обратимая деформация уменьшается с ростом $\sigma_{вн}$, т.к. появляется необратимая деформация в циклах охлаждения/нагрев под нагрузкой до $|\epsilon_{необр}| = 0,3$ % в результате релаксации упругих напряжений за счет пластической деформации аустенита и образования дислокаций в В2-фазе. Величина температурного

гистерезиса слабо зависит от $\sigma_{\text{вн}}$ для закаленных монокристаллов и составляет $\Delta T = 48$ К, а для состаренных монокристаллов – $\Delta T = 32$ К. Температура M_s растет с увеличением нагрузки $\sigma_{\text{вн}}$.

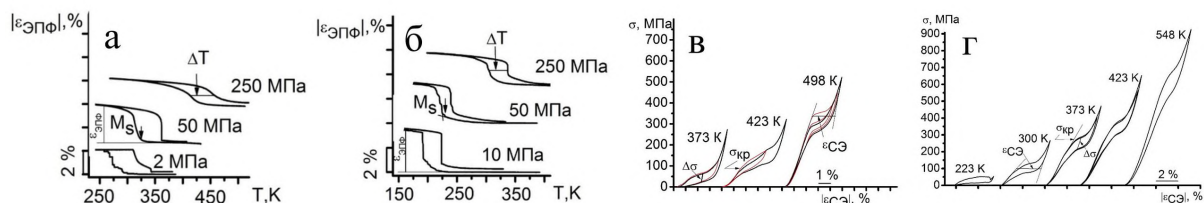


Рис. 2. ЭПФ и СЭ в монокристаллах CoNiAl состояние а, в – исходное; б, г – состаренное состояние

Закаленные и состаренные при 573 К 0,5 ч монокристаллы демонстрируют СЭ в циклах нагрузка/разгрузка при различных температурах (рис. 2 (v), (r)). Для закаленных кристаллов наблюдается высокотемпературная СЭ в интервале температур от 373 К до 473 К ($\Delta T_{\text{СЭ}} = 100$ К). Старение приводит к расширению температурного интервала СЭ практически в 2 раза за счет снижения температуры M_s и упрочнения В2-матрицы дисперсными частицами. Температурный интервал СЭ в состаренных кристаллах наблюдается низко- и высокотемпературная СЭ от 223 К до 548 К ($\Delta T_{\text{СЭ}} = 325$ К). Критические напряжения для развития МП под нагрузкой $\sigma_{\text{кр}}$ в состаренных кристаллах в 2,5 раза выше, чем в закаленных. С увеличением температуры испытания критических напряжений растут в соответствии с уравнением Клапейрона-Клаузиуса [2] для всех кристаллов с близкими коэффициентами наклона $\alpha = d\sigma_{\text{кр}}/dT = 1,5 - 1,7$ МПа/К. Кристаллы, как в закаленные, так и состаренные демонстрируют обратимую деформацию 2,0-2,3 % и узкий механический гистерезис 40 МПа.

Закключение. Старение при 573 К 0,5 ч приводит к уменьшению температур МП на $\Delta M_s = 52$ К, расширению температурного интервала СЭ в 2 раза, увеличению критических напряжений образования МП под нагрузкой в 2,5 раза по сравнению с закаленным состоянием за счет упрочнения В2-матрицы дисперсными частицами. Материалы, обладающие такими функциональными свойствами можно использовать как на Крайнем Севере, так и при повышенных температурах испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.D. Noebe [et al.] Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization and Applications // Taylor & Francis CRC Press, Boca Raton – 2007. – P. 145–186.
2. A. Eftifeeva [et al.] Compressive response of high-strength [001]-oriented single crystals of a $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ shape memory alloy // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – P. 963–971.
3. Е.Ю. Панченко [и др.] Канафьева Особенности развития термоупругих мартенситных превращений в состаренных монокристаллах ферромагнитного сплава CoNiAl // Известия ВУЗов. Физика. – 2011. – Т. 54., № 6. – С. 96-102.
4. Y. Tanaka [et al.] Martensitic transition and superelasticity of Co-Ni-Al ferromagnetic shape memory alloys with $\beta+\gamma$ two-phase structure // Scripta Materialia. – 2006. – V. 438–440. – P. 1054–1060.
5. H.E. Karaca [et al.] Compressive response of a single crystalline CoNiAl shape memory alloy // Scr. Mater. – 2004. – V. 51. – P. 261-266.