ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/218

СТАБИЛЬНОСТЬ ДВУСТОРОННЕГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ К ПЕРЕГРЕВАМ И ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩИМ НАГРУЗКАМ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА CoNiAl

Ефтифеева А.С., Панченко Е.Ю., Чумляков Ю.И.
Томский государственный университет, Томск

Система CoNiAl являются перспективной среди ферромагнитных сплавов за счет недорогих компонентов, способности испытывать термоупругое B2-L1₀ мартенситное превращение (МП) в ферромагнитном состоянии и хорошей пластичности в двухфазном (B2+γ)-состоянии [1]. Для того, чтобы упростить конструкцию и улучшить производительность термо- и магнитоиндуцируемых актюаторов для их рабочего тела используют материал с двусторонним эффектом памяти формы (ДЭПФ). Перспективной термообработкой для наведения ДЭПФ в ферромагнитных сплавах является выдержка в мартенситном состоянии под нагрузкой, как это было показано на сплаве CoNiGa, CuZnAl и AuCd [2, 3]. Однако, циклическое изменение противодействующей нагрузки и/или температуры в рабочем цикле может приводить к изменению микроструктуры и, соответственно, к деградации ДЭПФ. Поэтому целью работы является проверка стабильности растягивающего ДЭПФ к воздействию сжимающих напряжений и повышенных температур в монокристаллах ферромагнитного сплава CoNiAl.

Монокристаллы Co₃₅Ni₃₅Al₃₀ (ат. %) выращивали методом Бриджмена. Образцы гомогенизировали 8,5 ч при 1613 К и затем закаливали в воду комнатной температуры. Далее проводили выдержку при температуре 398 К в течение 1 ч в мартенситном состоянии под сжимающей нагрузкой 500 МПа, приложенной вдоль [110]_{B2}-направления. Теоретический расчет деформации решетки при B2-L1₀ МП показывает, что приложение сжимающей нагрузки вдоль [110]_{B2}-направления приводит к образованию раздвойникового мартенсита. Диффузионные процессы при выдержке способствуют установлению симметрии ближнего порядка атомов и точечных дефектов в соответствии с мартенситной конфигурацией и стабилизации раздвойникового варианта мартенсита. Соответствующая симметрия будет наследовать при охлаждении аустенитом, который в отличие от исходного, будет образовываться при более высоких температурах.

Стабилизация ориентированного L1₀-мартенсита приводит к наведению ДЭПФ. ДЭПФ измеряли вдоль [001]_{B2}-направления, перпендикулярно направлению выдержки, так как это направление характеризуется максимальной деформацией решетки до 8,6 % по сравнению с другими ориентациями [4]. В цикле охлаждения/нагрев в свободном состоянии вдоль [001]_{B2}-направления реализуется растягивающая обратимая деформация, то есть наблюдается растягивающий ДЭПФ с величиной $\epsilon_{\text{ДЭПФ}} = +6,5$ %. МП развивается выше комнатной температуры, температура начала прямого превращения M_s составляет 326 К. На рисунке 1 а показана кривая деформации от температуры, демонстрирующая ДЭПФ после выдержки в мартенситном состоянии.

Рис. 1. Кривые деформации от температуры при минимальной сжимающей нагрузке $\sigma_{\text{сж}} = -3,7$ МПа в монокристаллах Co₃₅Ni₃₅Al₃₀: а – после выдержки в мартенситном состоянии, б – после СЭ при 523 К.

При обратимом МП тепловая энергия превращается в механическую работу, которую может совершать образец, преодолевая противодействующие напряжения $\sigma_{\text{сж}}$ [5]:

$$W_{\text{ДЭПФ}} = \sigma_{\text{сж}} \epsilon_{\text{об}} / \rho \quad (1),$$

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

где $\varepsilon_{об}$ – деформация, наблюдаемая при приложенном напряжении $\sigma_{сж}$ и ρ – плотность материала. Согласно [5], максимальное значение работы выхода 0,12 Дж/г имеет сплав $Ni_{24.5}Ti_{50.5}Pd_{25}$, однако, монокристаллы $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ после выдержки в мартенситном состоянии могут совершать большую работу 0,19 Дж/г.

Для выяснения стабильности растягивающего ДЭПФ к воздействию высоких температур и сжимающих напряжений, были проведены циклы сверхэластичности (СЭ) в условиях сжатия вдоль $[001]_{B2}$ -направления при температурах от 373 К до 523 К с шагом 25-50 К. После каждого цикла нагрузка/разгрузка при определенной температуре измерен ДЭПФ в свободном состоянии при охлаждении/нагреве. В таблице 1 показаны соответствующие обратимая деформация и температура M_s при проявлении ДЭПФ после циклов СЭ.

Видно, что обратимая деформация и температура начала прямого МП являются стабильными до температуры 423 К, при которой максимальные достигаемые напряжения составляют 1025 МПа. Таким образом, ДЭПФ является стабильным к перегревам до температуры выдержки и сжимающей нагрузки до 1025 МПа.

Таблица 1. Функциональные характеристики ДЭПФ после соответствующих циклов СЭ.

Температура в цикле СЭ, К	Максимальные сжимающие напряжения в цикле СЭ, МПа	M_s , К	$\varepsilon_{дэпф}$, %
373	860	323	+7,1
423	1025	323	+6,8
473	1066	246	+7,4
523	1235	214	-2,7

Дальнейшее увеличение температур испытания и соответственно напряжений в цикле СЭ приводит к деградации ДЭПФ. Температура M_s снижается до 214 К, что близко к температуре исходных закаленных кристаллов. Испытания при 523 К могут приводит к процессам дисперсионного твердения, которые снижают температуры МП, вплоть до их подавления [1]. Обратимая деформация ведет себя стабильно до температуры 523 К и при данной температуре наблюдается дестабилизация мартенсита. Высокие сжимающие напряжения до 1235 МПа, действующие противоположно росту стабилизированного ранее варианта мартенсита, приводят к стабилизации другого варианта мартенсита, который ориентирован в соответствии с приложенными сжимающими напряжениями в цикле нагрузка/разгрузка. Этот вариант мартенсита приводит к сжимающему ДЭПФ с величиной $\varepsilon_{дэпф} = -2,7\%$ вдоль $[001]_{B2}$ -направления (рисунок 1 б).

Таким образом, выдержка в мартенситном состоянии под нагрузкой, приложенной вдоль $[110]_{B2}$ -направления, приводит к растягивающему ДЭПФ с величиной обратимой деформации +6,5 % вдоль перпендикулярного $[001]_{B2}$ -направления, за счет стабилизации раздвойникового варианта $L1_0$ -мартенсита. Полученный ДЭПФ стабилен к перегревам до температуры 423 К и противодействующим внешним напряжениям до 1025 МПа.

Данное научное исследование (№ НУ 8.1.06.2018 Л) выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

1. Dadda J., Maier H.J., Karaman I., Chumlyakov Y.I. Cyclic deformation and austenite stabilization $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ singlecrystalline high-temperature shape memory alloys // Acta Mater. 2009. V. 57. P. 6123–6134.
2. Niendorf T., Krooß P., Somsen C., Eggeler G., Chumlyakov Y.I., Maier H.J. Martensite aging – avenue to new high temperature shape memory alloys // Acta Mater. 2015. V. 89. P. 298–304.
3. Otsuka K., Ren X. Mechanism of martensite aging effects and new aspects // Mater. Sci. Eng., A. 2001. V. 312. P. 207–218.
4. Hamilton R.F., Sehitoglu H., Efstathiou C., Maier H.J., Chumlyakov Y., Zhang X.Y. Transformation of Co–Ni–Al single crystals in tension // Scr. Mater. 2005. V. 53. P. 131–136.
5. Atli K.C., Karaman I., Noebe R.D., Bigelow G., Gaydos D. Work production using the two-way shape memory effect in NiTi and a Ni-rich NiTiHf high-temperature shape memory alloy // Smart Mater. Struct. 2015. V. 24. P. 125023 (12pp).