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: 10.17223/9785946218412/206

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТАРЕНИЯ В МАРТЕНСИТЕ ПОД НАГРУЗКОЙ НА ДВУСТОРОННИЙ ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (ат. %)

Тохметова А.Б., Ларченкова Н.Г., Панченко Е.Ю., Чумляков Ю.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Ферромагнитные сплавы Гейслера на основе $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ испытывают мартенситные превращения (МП) за счет изменения температуры, под действием нагрузки и/или магнитного поля. Сплавы обладают такими функциональными свойствами как эффект памяти формы (ЭПФ) и эффект сверхэластичности, где наблюдаются большие обратимые деформации до 6,25 % при сжатии и до 13,0 % при растяжении [1]. Для упрощения конструкций механизмов, действие которых основано на ЭПФ, в материале создают внутренние дальнедействующие поля напряжений, которые приводят к наблюдению двустороннего эффекта памяти формы (ДЭПФ). В этом случае изменение размеров образца происходит только за счет изменения температуры без внешних приложенных напряжений. Одним из способов наведения ДЭПФ в сплавах является такая термомеханическая обработка как старение в мартенситном состоянии под сжимающей нагрузкой (СМН), основанное на эффекте стабилизации мартенсита. Эффективность данного эффекта показана в работах [2] на кристаллах ферромагнитного сплава CoNiGa . На сплавах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ систематических исследований влияния СМН ранее изучено не было, поэтому целью работы является влияние режимов СМН на проявление ДЭПФ.

Для исследования выбраны монокристаллы сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ после высокотемпературного отжига от $T = 1448 \text{ K}$, 1 час с закалкой в воду. Высокотемпературный отжиг приводит к однородной структуре материала, высокотемпературная фаза в закаленных монокристаллах имеет B2-структуру и при изменении температуры и/или внешних напряжений переходит в низкотемпературный $L1_0$ -мартенсит. Ориентация внешней нагрузки при проведении старения в мартенсите выбрана вдоль $[110]$ -направления, а ДЭПФ исследовали вдоль перпендикулярного – $[001]$ -направления. Предполагалось, что за счет старения в мартенсите вдоль $[110]$ -направления возможно стабилизировать раздвойникованный вариант мартенсита, приводящий к растягивающей деформации вдоль $[001]$ -направления, теоретический ресурс которой составляет $\epsilon_0 = 13,0 \%$ с учетом образования сдвойникового варианта мартенсита и последующего раздвойникового кристаллов мартенсита ($\epsilon_{\text{tr}} = \epsilon_{\text{CVP}} + \epsilon_{\text{detw}}$). Таким образом, после старения в мартенсите следует ожидать большие обратимые деформации до 13,0 % при реализации ДЭПФ.

Стабилизация ориентированного варианта мартенсита при СМН наблюдается за счет перераспределения точечных дефектов и атомов разного сорта в соответствии с симметрией кристалла мартенсита, и способствуют формированию необходимых условий для роста ориентированного варианта мартенсита при охлаждении без внешних приложенных напряжений [3]. Для проведения СМН выбран следующий режим: при $T_{\text{СМН}} = 373 \text{ K}$ нагружали образец до тех пор, пока он не перейдет из B2-фазы в $L1_0$ -фазу и затем после 1 часа выдержки разгружали. В ходе эксперимента выяснено, что необходимым условием для наблюдения ДЭПФ после СМН является то, что напряжение старения должно быть выше уровня критических напряжений образования мартенсита, т. е. $\sigma_{\text{ст}} > \sigma_{\text{кр}}$.

Экспериментально показано, что после СМН при $T_{\text{СМН}} = 373 \text{ K}$ значение растягивающего ДЭПФ достигает 7,0 %, что составляет 0,52 ϵ_0 вдоль $[001]$ -направления. Такое различие деформаций может быть связано со стабилизацией нескольких вариантов мартенсита и/или сдвойникового мартенсита. Деформация образца при проявлении ДЭПФ в термоциклах происходит в температурных интервалах прямого $\Delta_1 = 16 \text{ K}$ и обратного $\Delta_2 = 13 \text{ K}$ МП, где $\Delta_1 = M_s - M_f$, $\Delta_2 = A_f - A_s$.

Повышение эффективности диффузионных процессов, что является основным механизмом стабилизации мартенсита при старении, возможно посредством увеличения

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

температуры испытания, приложенного напряжения и времени выдержки. При повышении температуры старения в мартенсите до $T_{\text{СМН2}} = 423 \text{ К}$ величина обратимой деформации ДЭПФ вдоль [001]-направления увеличивается до 9,0 % и составляет $0,67\varepsilon_0$. Прямое и обратное МП развивается в узких интервалах температур $\Delta_1 = \Delta_2 \rightarrow 0$. Термический гистерезис не зависит от режима СМН и составляет среднее значение порядка $\approx 50 \text{ К}$.

После СМН при $T_{\text{СМН1}} = 373 \text{ К}$ под действием внешних сжимающих напряжений величиной $|\sigma| \approx 8,5 \text{ МПа}$, которые противодействуют растяжению образца при проявлении ДЭПФ в циклах охлаждение/нагрев, обратимая деформация становится равной 0. Это говорит о том, что приложенные сжимающие напряжения становятся сравнимы с внутренними растягивающими. После СМН при $T_{\text{СМН2}} = 423 \text{ К}$ значение противодействующих напряжений достигает до 37,5 МПа. Используя значения противодействующих напряжений σ и величину обратимой деформации ε при данных напряжениях можно оценить работу выхода на единицу массы образца, которую способен совершить материал при проявлении ДЭПФ. После СМН при $T_{\text{СМН1}} = 373 \text{ К}$ кристаллы обеспечивают работу выхода величиной $W = 0,004 \text{ Дж/г}$. Тогда как после СМН при $T_{\text{СМН2}} = 423 \text{ К}$ кристаллы демонстрируют более высокое значение $W = 0,12 \text{ Дж/г}$. Это значение сравнимо с работой выхода для высокотемпературных кристаллов $\text{Ni}_{24,5}\text{Ti}_{50,5}\text{Pd}_{25}$ [4], однако ниже, чем в состаренных под нагрузкой в мартенсите монокристаллах $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$, где $W = 0,19 \text{ Дж/г}$ [5].

Таким образом, повышение температуры старения в мартенсите приводит к увеличению обратимой деформации при ДЭПФ от 7,0 % до 9,0 %, к уменьшению температурных интервалов развития МП от 13 – 16 К до $\approx 0 \text{ К}$, к сдвигу температур начала и конца прямого и обратного МП в область высоких температур на 54 К и к увеличению работы выхода от 0,004 Дж/г до 0,12 Дж/г.

1. Термоупругие мартенситные превращения в монокристаллах, содержащих дисперсные частицы / Ю.И. Чумляков [и др.] // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 8. С. 96–108.
2. Martensite aging – avenue to new high temperature shape memory alloys / T. Niendorf [et al.] // Acta Mater. 2015. V. 89. P. 298–304.
3. Otsuka K. Mechanism of martensite aging effects and new aspects / K. Otsuka, X. Ren // Mater. Sci. Eng., A. 2001. V. 312. P. 207–218.
4. Work production using the two-way shape memory effect in NiTi and a Ni-rich NiTiHf high-temperature shape memory alloy / K.C. Atli [et al.] // Smart Mater. Struct. 2015. V. 24. P. 125023–1–125023–12.
5. Two-way shape memory effect in ferromagnetic $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ single crystals aged under stress / E. Panchenko [et al.] // Scr. Mater. 2014. V. 10. P. 90–91.