

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРЕНИРОВОК ДЛЯ НАВЕДЕНИЯ
ДВУСТОРОННЕГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В ГЕТЕРОФАЗНЫХ
МОНОКРИСТАЛЛАХ $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %)**

Н.Г. Ларченкова, Е.Е. Тимофеева, А.Б. Тохметова

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Ю. Панченко; проф., д.ф.-м.н. Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

E-mail: vetnat23@gmail.com

**EFFECTIVENESS OF MECHANICAL TRAININGS FOR TWO-WAY SHAPE MEMORY
EFFECT IN HETEROPHASE $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (at. %) SINGLE CRYSTALS**

N.G. Larchenkova, E.E. Timofeeva, A.B. Tokhmetova

Scientific Supervisor: Dr. Sci., docent, E.Y. Panchenko, Dr. Sci., professor, Y.I. Chumlyakov

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

E-mail: vetnat23@gmail.com

Abstract. *The effect of mechanical trainings (loading/unloading under constant temperature and cooling/heating under applied stress) on two-way shape memory in [001]-oriented $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (at. %) single crystals was investigated. It was experimentally shown, that in single crystals after the stress-induced aging at 1373 K, 25min. + 673 K, 4 h followed by the training (cooling/heating at constant applied stress 80 MPa), the two-way shape memory effect with the maximum strain of 4.5 % is realized. Its value is greater on 3,0 % in comparison with the single crystals after the stress-free aging at 1373 K, 25min. + 673 K, 4 h. The 100 cycles of loading/unloading training at room temperature in comparison with the isobaric training leads to the increase of both reversible strain on 0.5-1.0 % and thermal hysteresis in aged single crystals.*

Введение. В настоящей работе представлено исследование влияния механических тренировок на двусторонний эффект памяти формы (ДЭПФ) – величину обратимой деформации, термический гистерезис, в монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %). Исходя из того, что ДЭПФ проявляется благодаря внутренним дальнедействующим полям напряжений, которые способствуют проявлению ориентированного варианта мартенсита [1-3], в работе представленной нами ранее [3], впервые были выяснены условия для проявления ДЭПФ на монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$. По результатам проделанной работы на монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ был получен ДЭПФ величиной обратимой деформации 0,5 % после следующей термической обработки: 1373 К, 25 мин. (закалка), и 673К, 30 мин. под нагрузкой $\sigma = 100$ МПа (охлаждение в печи). Сочетание данной обработки и механической тренировки, заключающейся в термоциклировании через интервал мартенситных превращений (МП), привело к получению ДЭПФ с максимальной величиной обратимой деформации $\epsilon_{TWSME} = 4,5$ % [3]. Однако после данной термомеханической тренировки не был достигнут максимальный ресурс деформации превращения 6,3 %. Чтобы увеличить обратимую деформацию при ДЭПФ можно использовать другой вид механической тренировки – нагрузка/разгрузка при постоянной температуре, влияние которой на ДЭПФ в монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ изучено не было. Поэтому целью данной

работы является исследование влияния термомеханических тренировок на ДЭПФ в гетерофазных [001]-монокристаллах сплава $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$.

Методика эксперимента. Монокристаллы $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %) выращивали по методу Бриджмена в атмосфере инертного газа. Образцы, ориентированные вдоль [001]-направления, для испытаний при сжатии имели форму параллелепипедов ($3 \times 3 \times 6$) мм³. Для исследования были выбраны структурные состояния с ориентированным и неориентированным расположением дисперсных частиц γ' -фазы: 1) отжиг 1373К, 25 мин., закалка + старение 673 К, 4 ч. в свободном состоянии – состояние I; 2) отжиг 1373К, 25 мин., закалка + старение 673 К, 4 ч. под нагрузкой 100 МПа вдоль [123]-направления – состояние II. Изобарические испытания для измерения ЭПФ и ДЭПФ проводили на специально разработанной установке при охлаждении/нагреве под постоянной нагрузкой, с погрешность измерений 0,3%. Изотермические испытания выполнены на установке Instron 5969 при нагрузке/разгрузке (100 циклов при комнатной температуре T_k).

Результаты эксперимента. Оптические и электронномикроскопические исследования показали,

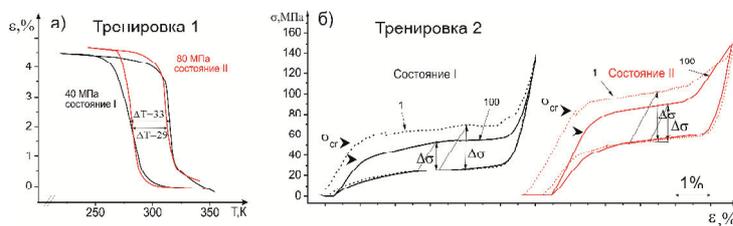


Рис. 1. Механические тренировки, необходимые для получения максимальных экспериментальных значений обратной деформации при проявлении ДЭПФ в состояниях I и II: а) изобарическая тренировка б) изотермическая тренировка при $T = 296 K$

что в состоянии I и II выделяются крупные некогерентные частицы γ' -фазы размерами 5-10 мкм, и мелкие дисперсные частицы γ' -фазы 10-30 нм. [1,3]. Различие двух структурных состояний состоит в том, что в состоянии II частицы γ' -фазы вытянуты вдоль одного из направлений типа $\langle 111 \rangle$, а в состоянии I при старении в свободном состоянии выделяются четыре

кристаллографических варианта частиц, вытянутых вдоль четырех направлений типа $\langle 111 \rangle$ [4]. От ориентированных частиц в состоянии II образуются однородные дальнедействующие поля напряжений, которые и способствуют проявлению ДЭПФ с величиной обратной деформации 0,5 % сразу после

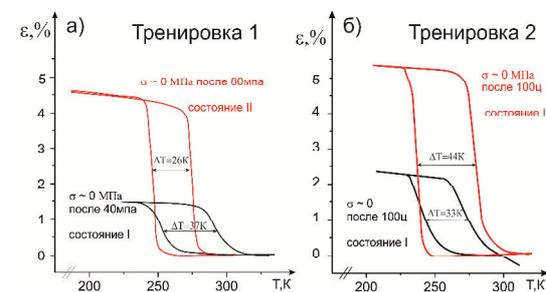


Рис. 2. ДЭПФ для монокристаллов $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ в состояниях I и II а) после изобарической тренировки б) после изотермической тренировки

термической обработки в отличие от состояния I [3]. Для увеличения величины обратной деформации в состоянии II и наведения ДЭПФ в состоянии I требуются дополнительные механические тренировки [3-5]. В данной работе представлены два вида механических тренировок: 1) термоциклирование через интервал мартенситных превращений под нагрузкой – изобарическая тренировка (рис. 1а); 2) 100 циклов нагрузка/разгрузка при T_k – изотермическая тренировка (рис. 1б). После изобарической тренировки при 40 МПа в состоянии I наблюдается ДЭПФ с максимальной величиной деформации 1,5 % и увеличение напряжений от 40 МПа до 80 МПа не приводит к дальнейшему росту обратной деформации. В состоянии II после тренировки

при 80 МПа величина ДЭПФ достигает 4,5 % (рис. 1а). Различие величин обратимой деформации в состоянии I и II, как было показано в работах [3,5], связано с ориентированным ростом частиц γ' - фазы в состоянии II, которые приводят к дальнедействующим полям напряжений наряду с полями напряжений от дефектов и дислокаций, возникших в процессе изобарической тренировки. В состоянии II МП обладает взрывным характером, т.е. протекает с узким интервалами прямого и обратного МП $T_{MS-MF} = 15$ К и узким температурным гистерезисом $\Delta T_{II}^1 = 26$ К, по сравнению с состоянием I, где $T_{MS-MF} = 23$ К $\Delta T_I^1 = 37$ К (рис. 2а). На рисунке 2б представлен ДЭПФ после изотермической тренировки. После изотермической тренировки в состоянии II величина ДЭПФ достигает 5,0 % и обнаружено увеличение термического гистерезиса на 18 К, а в состоянии I величина ДЭПФ 2,5 % остается в 2 раза меньше, чем в состоянии I и гистерезис практически не изменяется, по сравнению с изобарической тренировкой (рис. 2а). Увеличение обратимой деформации может быть связано с тем, что, во-первых, количество циклов при изотермической тренировке значительно больше, чем при изобарической тренировке. Во-вторых, напряжения в цикле при изотермической тренировке достигают 140 МПа, тогда как напряжения при изобарической тренировке не превышают 80 МПа. В-третьих, при изобарической тренировке, возможно образование некоторой объёмной доли самоаккомодирующей структуры мартенсита, о чем свидетельствует обратимая величина деформации 4,5 %, которая является меньше ресурса деформации превращения 6,3 %. При этом, при изотермической тренировке в каждом цикле достигается стадия упругой деформации мартенсита, это означает, что МП прошло полностью и во всем объеме образца возник ориентированный вариант мартенсита.

Выводы. На монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ показано, что старение под сжимающей нагрузкой в сочетании с изотермической и изобарической тренировкой приводит к эффективному способу получения двустороннего эффекта памяти формы. Показано, что изотермическая тренировка, за счёт высоких приложенных напряжений 140 МПа и большого количества циклов приводит к увеличению ДЭПФ на 0,5-1,0 % в состаренных без нагрузки и под нагрузкой монокристаллах I и II, и увеличению механического гистерезиса на 18 К в состаренных под нагрузкой монокристаллах по сравнению с изобарической тренировкой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 16-19-10250.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fukuda T., Deguchi A., Kakechita T. Two-way shape memory properties of a Ni-rich Ti-Ni alloy aged under tensile-stress // *Saburi Materials transaction*. – 1997. – V. 38. – N. 6 – P. 514-520
2. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / Под редакцией В.Э. Гюнтера. – М: Изд-во МИЦ. – 1998. – Т. 1. – 224-280 с.
3. Timofeeva E.E., Panchenko E.Yu., Chumlyakov Yu.I., Vetoshkina N.G., Maier H.J. One-way and two-way shape memory effect in ferromagnetic NiFeGaCo single crystals // *Materials Science & Engineering A*. – 2015. – V. 640. – 465–470
4. Atli K C, Karaman I, Noebe R D, Bigelow G and 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. – 125023