

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В МАРТЕНСИТНОМ СОСТОЯНИИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ДВУСТОРОННЕГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$

М.В. Пичкалёва, Е.Е. Тимофеева, Е.Ю. Панченко
Научный руководитель: к.ф.-м.н. Е.Е. Тимофеева
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050
E-mail: mariska_713@mail.ru

Ферромагнитные монокристаллы на основе NiMnGa в настоящее время являются перспективными материалами, которые могут найти практическое применение в качестве актюаторов и датчиков, работающих за счет магнитоиндуцированных деформаций. Такие деформации реализуются за счет одновременного приложения внешних напряжений и магнитного поля [1]. В этом отношении важным свойством для практического применения является высокотемпературный двусторонний эффект памяти формы (ДЭПФ), который наводится в материале за счет создания внутренних дальнедействующих полей напряжений. Замена внешних напряжений внутренними позволила бы облегчить получение магнитоиндуцированных деформаций. Получить ДЭПФ возможно с помощью термомеханической обработки (ТМО). На монокристаллах CoNiGa и CoNiAl показано [2, 3], что низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) в мартенситном состоянии за счет эффекта стабилизации мартенсита позволяет увеличить температуры мартенситных превращений (МП), изменить термический гистерезис и получить ДЭПФ.

Поэтому целью данной работы является исследование на монокристаллах $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$ (ат. %) влияния НТМО на температуры МП и на величину обратимой деформации при проявлении ДЭПФ.

Монокристаллы $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$ (ат. %) были выращены методом Бриджмена в атмосфере инертного газа. Образцы на сжатие имели размеры $4 \times 4 \times 8$ мм³. Для исследования была выбрана ориентация кристаллов $\langle 123 \rangle$ и исходное состояние монокристаллов было получено с помощью высокотемпературного отжига при $T = 1273$ К в течение часа с последующим медленным охлаждением (состояние 1). Затем проводилась НТМО в мартенсите при $T = 423$ К под нагрузкой (состояние 2). НТМО проводилась на электромеханической настольной разрывной машине Instron 5569. Последующие циклы охлаждения/нагрев для исследования ДЭПФ проводились на специально разработанной установке для измерения деформации образца при охлаждении/нагреве под постоянной минимальной нагрузкой $\sigma = 4$ МПа с выводом кривых $\epsilon(T)$ на компьютер.

МП при охлаждении/нагреве в свободном состоянии изучены по калориметрическим кривым. Температуры начала и конца прямого и обратного МП для состояния 1 $M_s = 403$ К и $M_f = 367$ К, $A_s = 381$ К и $A_f = 414$ К.

В данной работе была проведена НТМО способом, который заключался в том, чтобы реализовать МП в изотермических условиях только приложением нагрузки. При заданной температуре испытания $T = 423$ К $> A_f$ в условиях развития сверхэластичности (СЭ) нагрузку на образец увеличивали до полного завершения прямого МП под нагрузкой (до $\sigma_{\max} = 170 \div 185$ МПа). Выдержка при σ_{\max} составляла $1 \div 3$ часа. После выдержки нагрузка снималась для реализации обратного МП. После НТМО образец охлаждали до $T \sim 300$ К.

Экспериментально показано, что проявление ДЭПФ в монокристаллах состояния 2 зависит от режима НТМО. НТМО при $T = 423$ К, $\sigma = 180$ МПа и $t = 1$ час не приводит к развитию ДЭПФ, а только к небольшому увеличению на 0,5 % величины ЭПФ (ϵ_{SME}) до 1 %, по сравнению с кристаллами в состоянии 1, где обратимая деформация ϵ_{SME} составляла 0,5 % (рис. 1 а).

При увеличении времени НТМО до 2-3 часов при $\sigma = 170 \div 185$ МПа последующее после НТМО охлаждение образца до $T_K < M_f$ (прямое МП) вызывало изменение размеров образца (уменьшение). При последующем нагреве до $T > A_f$ вся деформация являлась обратимой, то есть наблюдалось развитие ДЭПФ за счет появления внутренних полей напряжений. Предполагается, что данные поля появляются за счет перераспределения точечных дефектов и/или за счет искажений кристаллической решетки высокотемпературной фазы.

Максимальная величина обратимой деформации, полученная при ДЭПФ после НТМО, составила 3,2 % (рис. 1 б). Такую величину обратимой деформации также можно получить при одностороннем ЭПФ при охлаждении/нагреве под нагрузкой $\sigma = 60$ МПа. Следовательно, можно предположить, что величина внутренних напряжений, способствующих ДЭПФ величиной 3,2 %, близка к 60 МПа.

Нагрев до температуры, превышающей температуру НТМО $T > 453$ К и выше, при первом термоцикле ДЭПФ после НТМО вызывает «снятие» эффекта стабилизации мартенсита. Следовательно, изменения микроструктуры, благодаря которым возникают внутренние поля напряжений, обратимы при нагреве. После нагрева до 453 К сильно изменяется вид петли $\epsilon(T)$ – в 2,5 раза уменьшается обратимая деформация до 1,2 %, прямое МП характеризуется большим интервалом $\Delta_1 = 29$ К, также, как и в отожженных монокристаллах. После нагрева до 473 К кривые $\epsilon(T)$ для состаренных монокристаллов и для отожженных становятся идентичными, а деформация близка в пределах погрешности.

Наблюдать ДЭПФ при многократном проведении циклов охлаждение/нагрев возможно при температуре, не превышающей температуру НТМО, $T = 423 \pm 5$ К. Следует отметить, что циклирование до 5 термоциклов не приводит к уменьшению обратимой деформации, но способствует смещению температур МП. Получено, что в пятом цикле температура конца обратного МП A_f смещается на 8 К по сравнению с первым циклом. Такое изменение температур МП может быть связано с тем, что при нагреве до температуры 423 К $> A_f$ эффект стабилизации мартенсита уменьшается.

Таким образом, на $\langle 123 \rangle$ -монокристаллах $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$ в состоянии 1 показано, что НТМО в мартенситном состоянии при $T = 423$ К, $\sigma = 170 \div 185$ МПа и $t = 2-3$ часа приводит к формированию ДЭПФ с максимальной величиной обратимой деформации до 3,2 %. Термоциклирование при $T < 423$ К (5 циклов) не изменяет величину деформации и слабо снижает температуру МП A_f .

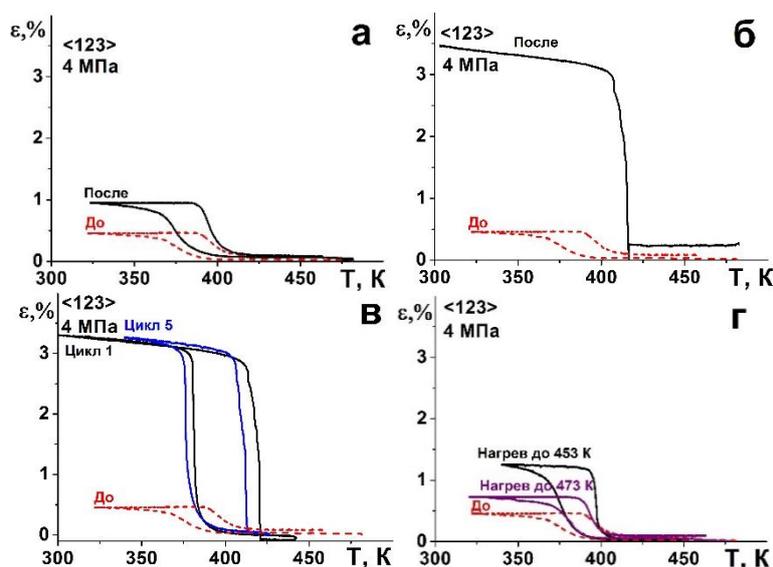


Рис. 1. Кривые $\epsilon(T)$ при проявлении ЭПФ и ДЭПФ:

а – НТМО при $t = 1$ час; б, в, г – НТМО при $t = 2-3$ часа; г – термоциклирование ДЭПФ после предварительного нагрева до 453 К и 473 К

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-19-10250.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Magnetic-field-induced bending and straining of Ni-Mn-Ga single crystal beams with high aspect ratios / J. Nikole [et al.] // Acta Materialia. – 2015. – V.95. – P. 284–289.
2. Martensite aging – Avenue to new high temperature shape memory alloys / T. Niendorf [et al.] // Acta Materialia. – 2015. – V.89. – P.298–304.
3. Two-way shape memory effect in [001] B2-oriented Co-Ni-Al single crystals / A. Eftifeeva [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2017. – in press.