

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»

Томск
Издательский Дом ТГУ
2019

DOI: 10.17223/9785946218412/205

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТЬ В ГЕТЕРОФАЗНЫХ
МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (АТ. %)**

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

Томский государственный университет, Томск

В настоящей работе представлены исследования высокотемпературной сверхэластичности (СЭ) на гетерофазных монокристаллах сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (ат.%). Благодаря проявлению термоупругих МП под нагрузкой в широком интервале температур, включая высокотемпературную СЭ, возможно создавать детали элементов, способных изменять и восстанавливать свою форму при приложении напряжений и снятии нагрузки, как при низких, так и при высоких температурах [1, 2]. Для эксплуатации таких элементов необходимо, чтобы материал обладал высокой прочностью и циклической стабильностью функциональных свойств. Как показано в работах [3, 4] однофазные и гетерофазные [001]-монокристаллы $\text{NiFeGa}(\text{Co})$ обладают высокой циклической стабильностью функциональных свойств при исследовании эффекта СЭ и высокими прочностными свойствами аустенитной и мартенситной фазы. Однако, ранее систематических исследований влияния кристаллической структуры высокотемпературной фазы и размеров дисперсных частиц вторичных фаз на высокотемпературную СЭ в гетерофазных монокристаллах $\text{NiFeGa}(\text{Co})$ проведено не было. Поэтому, целью данной работы является исследование высокотемпературной СЭ с различной микроструктурой в [001]-монокристаллах сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при сжатии.

Монокристаллы $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ выращены методом Бриджмена. Образцы из монокристаллов вырезаны с помощью электроискровой резки размером $3 \times 3 \times 6$ мм³. Для исследования выбраны два режима термической обработки: отжиг при $T = 1373$ К, 25 мин. с последующей закалкой в воду – TO_1 ; отжиг при $T = 1373$ К, 25 мин. (закалка) + старение при $T = 673$ К, 4 ч – TO_2 . После TO_1 выделяются частицы γ -фазы размером до $d = 60$ мкм с объемной долей 7 % и при охлаждении/нагреве монокристаллы испытывают переход из В2 аустенита в тетрагональный $L1_0$ -мартенсит. Последующее старение (TO_2) приводит, к упорядочению высокотемпературной фазы, формированию $L2_1$ -структуры, выделению наноразмерных частиц γ' -фазы до $d = 15$ нм с объемной долей 4 % и смене последовательности МП. $L2_1$ -аустенит в кристаллах после TO_2 переходит в $L1_0$ -мартенсит через модулированные 10М/14М структуры.

На рисунке 1 а, б представлен температурный интервал СЭ, полученный в [001]-кристаллах после TO_1 и TO_2 . Показано, что монокристаллы как после TO_1 , так и TO_2 демонстрируют высокотемпературную СЭ в широком температурном интервале $\Delta T = T_{\text{СЭ}2} - T_{\text{СЭ}1}$ равном 250 К и 262 К, соответственно. Температура начала интервала СЭ $T_{\text{СЭ}1} > A_f$, при данной температуре мартенсит напряжений является термодинамически нестабильным и критические напряжения образования мартенсита больше величины механического гистерезиса $\sigma_{\text{кр}} > \Delta\sigma$. $T_{\text{СЭ}2}$ – температура конца интервала СЭ, при которой наблюдается первая петля обладающая необратимой деформацией $\varepsilon_{\text{необр}} > 0,5$ %. В исследованных кристаллах $\varepsilon_{\text{необр}}$ при проявлении СЭ появляется только при $T_{\text{исп}} > 553$ К и достижении деформирующих напряжений 900-1000 МПа.

Показано, что с ростом температуры испытания вид кривых $\sigma(\varepsilon)$ после TO_1 и TO_2 изменяется: увеличиваются $\sigma_{\text{кр}}$, $\Delta\sigma$ и $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ и уменьшается обратимая деформация $\varepsilon_{\text{обр}}$. Зависимость величины обратимой деформации $\varepsilon_{\text{обр}}$ в [001]-кристаллах от уровня критических напряжений образования мартенсита обусловлена вкладом упругой деформации, возникающей из-за различия упругих модулей аустенита E_A и мартенсита E_M [5]. Смена последовательности МП после TO_2 приводит к тому, что наблюдается более узкий $\Delta\sigma$ на всем интервале температур по сравнению с TO_1 . Поскольку в кристаллах после TO_2 МП может идти через промежуточный 14М-мартенсит, который обладает лучшей совместностью с аустенитом, меньшими $\sigma_{\text{кр}}$ и меньшей величиной рассеяния энергии при движении межфазной границы.

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

Для выяснения стабильности микроструктуры монокристаллов после высокотемпературных испытаний в исследуемых кристаллах снова прописали кривые $\sigma(\varepsilon)$ при $T \approx T_{C\bar{S}1}$ (см. рис. 2 а, б). Экспериментально показано, что после TO_1 $\sigma_{кр}$ увеличились, а после TO_2 уменьшились в 2 раза. Возможной причиной увеличения $\sigma_{кр}$ в кристаллах с TO_1 является стабилизация высокотемпературной фазы за счёт выделения наноразмерных частиц в процессе механических испытаний, что приводит к понижению температур МП на 32 К, как и показано на калориметрических кривых (см. рис. 2 б, в – красные кривые). В кристаллах с TO_2 снижение температур МП незначительное на 11 К (см. рис. 2 б, в – черные кривые). Уменьшение $\sigma_{кр}$ обусловлено появлением остаточного мартенсита, способствующего более легкому зарождению мартенсита напряжений при последующих циклах нагрузка/разгрузка (см. рис. 2 б).

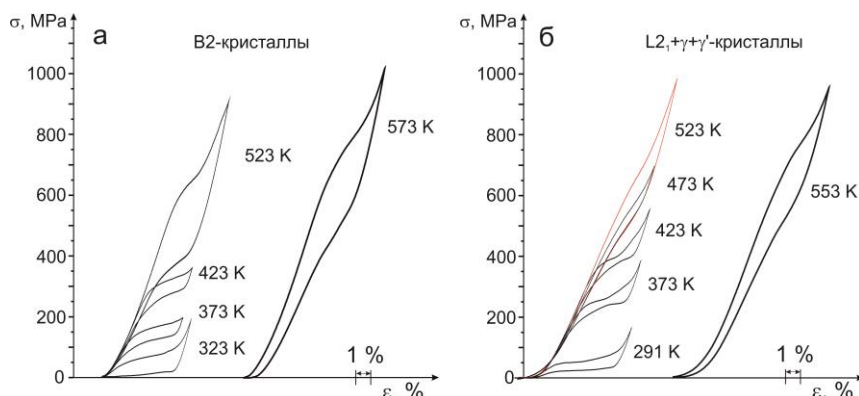


Рис. 1. Кривые $\sigma(\varepsilon)$ в монокристаллах сплава $Ni_{49}Fe_{19}Ga_{27}Co_6$ после а) TO_1 и б) TO_2

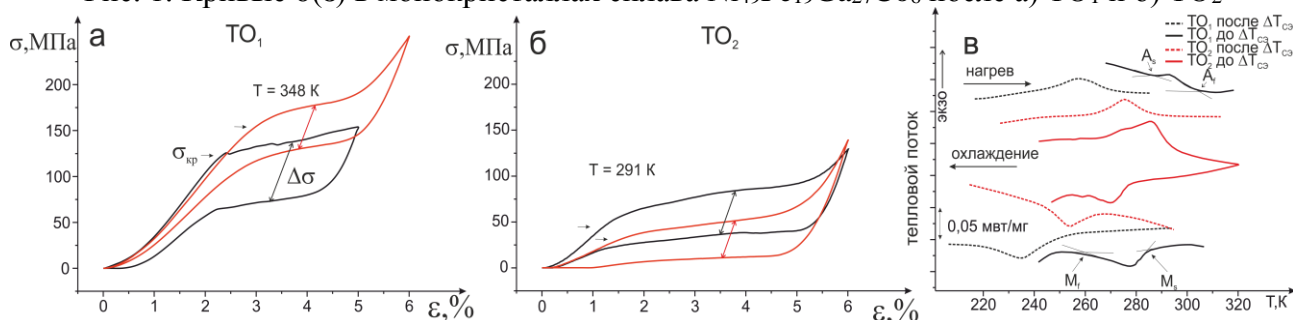


Рис. 2. Кривые $\varepsilon(T)$ прописанные при $T = T_{C\bar{S}1}$ в начале температурного интервала (красная кривая) и в конце температурного интервала (черная кривая) после а) TO_1 ; б) TO_2 ; в) калориметрические кривые, полученные при охлаждении и нагреве

Таким образом, экспериментально показано, что закалённые и состаренные [001]-кристаллы $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ проявляют высокотемпературную СЭ в широком интервале температур и напряжений. В состаренном состоянии кристаллы характеризуется более узким механическим гистерезисом $\Delta\sigma$, и более высокой стабильностью при высокотемпературных испытаниях по сравнению с закаленным состоянием.

Работа выполнена в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета».

1. Ветошкина Н.Г., и др. Влияние старения на микроструктуру, эффект памяти формы и сверхэластичность в монокристаллах $NiFeGaCo$ ориентированных вдоль [001]-направления // Известие высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. № 7/2. С. 28–33.
2. Jaronie M. J., et. al. Review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Materials and Design. 2014.V. 56 P. 1078–1113.
3. Efstathiou C., et. al. Fatigue response of $NiFeGa$ single crystals // Scr. Mat. 57 (2007) 409–412.
4. Larchenkova, et. al. N. G. Cyclic stability of superelasticity in [001]-oriented stress-free and stress-assisted aged $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ single crystals // AIP Conf. Proceedings 2051, 020166 (2018).
5. Тимофеева Е. Е. Закономерности термоупругих мартенситных превращений, эффекта памяти формы и СЭ в монокристаллах ферромагнитных сплавов Ni-Fe-Ga-(Co): автореферат диссертации на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. /Тимофеева. – Томск, 20.12.2012г. – 195.