

## Сведения о выполненных работах в 2023 году

по проекту «**Strain glass сплавы NiFeGaCo как основа для создания материалов с широким интервалом развития сверхэластичности, узким гистерезисом и высокой циклической стабильностью свойств**»,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 21-19-00287

Руководитель: Тимофеева Екатерина Евгеньевна, канд. физ.-мат. наук

Впервые на монокристаллах  $Ni_{54-x}Fe_{19}Ga_{27}Co_x$  ( $x = 10, 12, 15, 20$  ат. %) проведены систематические исследования влияния термических обработок на развитие эффекта памяти формы и сверхэластичности. Разработаны микроструктуры, обеспечивающие развитие сверхэластичности в широком интервале температур с узким механическим гистерезисом и высокой циклической стабильностью.

На монокристаллах  $Ni_{42}Fe_{19}Ga_{27}Co_{12}$  и  $Ni_{39}Fe_{19}Ga_{27}Co_{15}$  за счет термических обработок получена микроструктура, обеспечивающая возобновление термоиндуцированного мартенситного перехода. Это достигнуто за счет выделения крупных частиц богатой кобальтом  $\gamma$ -фазы, что снижает содержание кобальта в матрице и приводит к уменьшению ее сопротивления к образованию мартенсита. Происходит смещение интервала развития сверхэластичности в область низких значений нагрузки и высоких температур. Впервые на монокристаллах  $Ni_{42}Fe_{19}Ga_{27}Co_{12}$  и  $Ni_{39}Fe_{19}Ga_{27}Co_{15}$  за счет термических обработок появляется высокотемпературная сверхэластичность при температурах от 373 К до 423-448 К.

Впервые определено влияние температуры старения от 673 до 1173 К (в течение 1 ч) на развитие эффекта памяти формы и сверхэластичности в монокристаллах  $Ni_{44}Fe_{19}Ga_{27}Co_{10}$ . Установлено, что температура старения слабо влияет на величину обратимой деформации при развитии эффекта памяти формы. Однако, температура старения оказывает влияние на параметры сверхэластичности – температурный интервал сверхэластичности, величину механического гистерезиса и его зависимость от температуры испытания. Установлено, что во всех состаренных монокристаллах  $Ni_{44}Fe_{19}Ga_{27}Co_{10}$  наблюдается широкий интервал сверхэластичности (величиной 220-250 К), это одни из самых больших значений среди сплавов с памятью формы.

Установлено, что старение при 773 К, 1 ч монокристаллов  $Ni_{44}Fe_{19}Ga_{27}Co_{10}$ , при котором выделяются мелкие частицы  $\omega$ -фазы (70-100 нм), наиболее эффективно для уменьшения рассеяния энергии при развитии мартенситных превращений, по сравнению со старением при более высоких температурах, которые приводят к выделению крупных некогерентных частиц  $\gamma'$ -фазы, которые при развитии мартенситных превращений способствуют релаксации внутренних напряжений посредством пластической деформации.

Впервые на сплавах на основе NiFeGa(Co) проведены многоцикловые испытания сверхэластичности в количестве, не менее чем 100000 циклов

нагрузка/разгрузка. Однофазные и гетерофазные монокристаллы  $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$  выдерживают  $1.7 \cdot 10^6$  циклов нагрузка/разгрузка без разрушения и существенной деградации. Установлено влияние частиц  $\omega$ -фазы на механизмы деградации в монокристаллах  $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ .

Впервые на монокристаллах  $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$  определено влияние способа охлаждения после старения при 773 К, 1 ч на микроструктуру, на развитие эффекта памяти формы, сверхэластичности и прочностные свойства мартенсита. Показано, что в процессе медленного охлаждения происходит выделение дополнительных наноразмерных частиц. Показано, что на монокристаллах  $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$  за счет изменения способа охлаждения при старении возможно эффективно управлять интервалом развития сверхэластичности и прочностными свойствами фаз. При конструировании микроструктуры, обеспечивающей заданные свойства, следует учитывать, что медленное охлаждение после старения может привести к выделению дополнительных частиц и существенному уменьшению температур мартенситных превращений.

На основе проведенного анализа экспериментальных данных, полученных за 2021-2023 гг., определено влияние содержания кобальта на развитие термоупругих превращений при охлаждении/нагреве и под нагрузкой в монокристаллах  $\text{Ni}_{54-x}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_x$  ( $x = 10, 12, 15, 20$  ат. %) при различных режимах термических обработок. Для каждого выбранного химического состава монокристаллов  $\text{Ni}_{54-x}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_x$  ( $x = 10, 12, 15$  ат. %) определены термические обработки и разработаны микроструктуры, приводящие к развитию сверхэластичности в широком интервале температур. Определены наиболее эффективные параметры для развития сверхэластичности в широком интервале температур с узким механическим гистерезисом и высокой циклической стабильностью в монокристаллах  $\text{Ni}_{54-x}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_x$  ( $x = 10, 12, 15, 20$  ат. %), которые заключаются в выборе [001]-ориентации при деформации сжатием, содержания кобальта 10 ат. % и проведение старения при 773 К, 1 ч. Проведен комплексный анализ влияния старения на развитие мартенситных превращений при охлаждении/нагреве и под нагрузкой на монокристаллах  $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ . Определены интервалы выделения вторичных фаз, их кристаллическая структура и изменения нанодоменной микроструктуры, влияние на температуры мартенситных превращений, развитие эффекта памяти формы и сверхэластичности.