

Сведения о выполненных работах и  
полученных научных результатах  
в 2024 году

по проекту «**Разработка функциональных материалов с высокотемпературными эффектами памяти формы и сверхэластичности на основе многокомпонентных сплавов Гейслера**»,

поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 24-19-00242

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

В проекте развивается двусторонний подход к разработке материалов с высокотемпературной сверхэластичностью на основе сплавов Гейслера. Первый подход – изначальное получение высоких температур мартенситных превращений, высоких прочностных свойств, обеспечивающих развитие высокотемпературной сверхэластичности за счет поиска нового оптимального химического состава. Второй подход – контроль внутренней микроструктуры материалов и изменение ее параметров. На настоящем этапе проекта в качестве метода контроля параметров микроструктуры применяли высокотемпературный отжиг и последующую закалку с различными скоростями. Данные подходы применялись к двум видам сплавов Гейслера на основе  $\text{Ni}_2\text{FeGa-Co}$  и  $\text{Ni}_2\text{MnGa-Fe}$ . Впервые на [001]-монокристаллах сплава  $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$  (ат.%) установлено влияние времени отжига и скорости охлаждения на микроструктуру, температуры мартенситных превращений и интервал развития сверхэластичности. Показано, что за счет изменения времени отжига при 1448 К и скорости охлаждения возможно изменять температуры мартенситных превращений от 200 К до 336 К в изначально низкотемпературных сплавах (исходная  $M_s = 120$  К). Физической причиной изменения температур является изменение фазового состава – выделение пластичной  $\gamma$ -фазы (влечет изменение химического состава и рост температур на 50 К) и уменьшение содержания  $\omega$ -фаз (приводит к повышению температур на 75-85 К). Впервые на монокристаллах сплава  $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$  (ат.%) обнаружена высокотемпературная сверхэластичность в интервале от 373 до 548 К независимо от способа деформации – как при сжатии, так и при растяжении. Причиной получения такого интервала сверхэластичности является высокие температуры мартенситных превращений и высокие прочностные свойства. Обнаруженное высокотемпературное состояние монокристаллов  $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$  (ат.%) после отжига при 1448 К, 6 ч с быстрой закалкой является нестабильным. Перегрев до 520-530 К вызывает сильное, на 80-100 К уменьшение температур мартенситных превращений, что связано с выделением наноразмерных частиц  $\omega$ -фазы.

На сплавах  $\text{Ni}_2\text{MnGa-Fe}$  (при вариации Ni 50-56 ат.%, Mn 9-25 ат.%, Ga 19-24 ат.% и Fe 4-16 ат.%) проведен поиск составов и состояний с высокотемпературной сверхэластичностью и определены оптимальные химические составы. Впервые на монокристаллах сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19}\text{Fe}_6$  и  $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{12}\text{Ga}_{25}\text{Fe}_9$

(ат.%) обнаружены высокотемпературные эффект памяти формы и сверхэластичности при деформации сжатием. На монокристаллах сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19}\text{Fe}_6$  и  $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{12}\text{Ga}_{25}\text{Fe}_9$  исследованы параметры эффекта памяти формы и сверхэластичности в зависимости от микроструктуры, приложенных напряжений и температуры испытания. В монокристаллах  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19}\text{Fe}_6$  высокотемпературная сверхэластичность обнаружена в интервале от 373 до 498 К, в монокристаллах  $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{12}\text{Ga}_{25}\text{Fe}_9$  – от 323 до 398 К. Определены оптимальные условия для развития высокотемпературной сверхэластичности, которые заключаются в повышении прочностных свойств не только высокотемпературной фазы, но и мартенсита, полученные за счет изменения химического состава или применения высокотемпературного отжига при 1273 К, 4 ч с закалкой. Впервые на сплавах  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19}\text{Fe}_6$  обнаружен высокотемпературный двусторонний эффект памяти формы.