

Сведения о выполненных работах в 2022 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 сплавов Ni₄₄Fe₁₉Ga₂₇Co₁₀, Ni₄₂Fe₁₉Ga₂₇Co₁₂, Ni₃₉Fe₁₉Ga₂₇Co₁₅ (ат. %) в зависимости от содержания кобальта проведено систематическое исследование величины механического гистерезиса, уровня критических напряжений и циклической стабильности сверхэластичности при деформации сжатием в циклах нагрузка/разгрузка. Установлено, что деградация сверхэластичности в монокристаллах Ni_{54-x}Fe₁₉Ga₂₇Co_x (x = 10–15 ат. %) происходит в два этапа (в зависимости от числа циклов). В монокристаллах Ni₄₄Fe₁₉Ga₂₇Co₁₀ с меньшим содержанием кобальта на первом этапе внутренние упругие напряжения сильно релаксируют за счет образования дислокаций, что вызывает значительную деградацию параметров сверхэластичности (понижение уровня критических напряжений начала превращения, уменьшение механического гистерезиса, рост коэффициента деформационного упрочнения). Это обеспечивает дислокационное упрочнение и более стабильное развитие превращения под нагрузкой на втором этапе деградации, когда параметры сверхэластичности практически не изменяются. В итоге монокристаллы Ni₄₄Fe₁₉Ga₂₇Co₁₀ не разрушаются до 600 циклов нагрузка/разгрузка. При увеличении содержания кобальта в монокристаллах Ni₃₉Fe₁₉Ga₂₇Co₁₅ увеличиваются прочностные характеристики аустенита и мартенсита, и деградация на первом этапе проходит менее активно, что в итоге приводит к возрастанию внутренних упругих напряжений, которые релаксируют с образованием микротрещин, что приводит к разрушению образцов, выдерживающих в общем не более 30–50 циклов нагрузка/разгрузка.

Впервые экспериментально установлен режим термообработки, приводящий к появлению термоминдуцированных мартенситных превращений в монокристаллах Ni₄₂Fe₁₉Ga₂₇Co₁₂ (ат. %) (отжиг при 1448 К, 8 ч с закалкой в воду) и в монокристаллах Ni₃₉Fe₁₉Ga₂₇Co₁₅ (ат. %) (отжиг при 1448 К, 12 ч с закалкой в воду), где до термообработки наблюдался strain glass переход. В монокристаллах Ni₄₂Fe₁₉Ga₂₇Co₁₂ при отжиге выделяются крупные области γ -фазы размером от 50 до 500 мкм с объемной долей ~ 20–25 %. В монокристаллах Ni₃₉Fe₁₉Ga₂₇Co₁₅ выделяются частицы γ -фазы объемной долей порядка 10-12 %. Выделение фазы приводит к

- уменьшению содержания железа и кобальта и увеличению содержания галлия в матрице, что вызывает появление термоминдуцированных мартенситных превращений при охлаждении/нагреве без нагрузки;
- зарождению мартенсита на границах фаза-матрица;

– уширению термического гистерезиса в термоциклах под нагрузкой и механического гистерезиса в циклах нагрузка/разгрузка.

Впервые на закаленных (после отжига при 1448 К, 1 ч) монокристаллах $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ проведено исследование температур мартенситных превращений в зависимости от температуры старения в интервале 673–1173 К. Старение при 673–773 К вызывает изменение доменной структуры – домены L21-фазы увеличиваются до 150–300 нм, а объемная доля L21-фазы возрастает до 60–65 %, тогда как доля B2-фазы сокращается. При старении выделяются частицы ω -фазы размером 70–100 нм с объемной долей 4–6 %, что вызывает изменение химического состава и повышает температуры мартенситных превращений на 50 К, по сравнению с закаленным состоянием (отжиг 1448 К, 1 ч). Частицы приводят к значительному измельчению ламелей мартенсита охлаждения до 20–50 мкм. Мартенситные превращения развивается за счет множественного зарождения и роста пакетов из отдельных мелких ламелей мартенсита. Увеличение температуры старения приводит к уменьшению температур мартенситных превращений и после старения при 1173 К температуры превращения близки к закаленным кристаллам. После старения при 1173 К электронномикроскопически частицы не обнаружены, но зафиксировано изменение нанодоменной структуры, которая становится близка к структуре закаленных монокристаллов, что объясняет близкие температуры мартенситных превращений: объемная доля L21-фазы составляет порядка 30 %, домены L21-фазы не превышают 15 нм.

Показано, что в зависимости от способа охлаждения (медленное охлаждение или быстрая закалка в воду) после старения при 773 К, 1 ч возможно контролировать температуры мартенситных превращений. Медленное охлаждение после старения приводит к сильному уменьшению температур по сравнению с быстрой закалкой после старения. Величина сдвига температур мартенситных превращений при этом достигает 100 К, что впервые обнаружено на сплавах Гейслера на основе NiFeGa. Данная особенность проявляется независимо от содержания кобальта (10, 12 или 15 ат. %) в исходных монокристаллах и содержания γ -фазы. Причина изменения температур заключается в изменении соотношения объемных долей аустенитных B2 и L21 фаз, а также нельзя исключать появление зародышей частиц, образующихся в процессе медленного охлаждения.

На закаленных и состаренных монокристаллах $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ и $\text{Ni}_{39}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{15}$ проведены электронномикроскопические исследования микроструктуры. В зависимости от содержания кобальта и режима термической обработки установлена структура высокотемпературной фазы, которая представляет собой смесь аустенитных L21 и B2-фаз, распределенных в виде нанодоменов. Размер нанодоменов и соотношение объемных долей аустенитных фаз определяется содержанием кобальта и термической обработкой.