

Сведения о выполненных работах в 2021 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 и Ni₃₄Fe₁₉Ga₂₇Co₂₀ (ат. %) в зависимости от содержания кобальта проведено систематическое исследование микроструктуры, термоупругих мартенситных превращений, эффекта памяти формы, сверхэластичности, внутреннего трения и модуля упругости. Исследования проведены при деформации сжатием вдоль [001]-ориентации в монокристаллах после роста и после высокотемпературного отжига при 1448 К, 1 ч с последующей закалкой.

Экспериментально установлено, что в монокристаллах Ni₄₄Fe₁₉Ga₂₇Co₁₀ и Ni₃₉Fe₁₉Ga₂₇Co₁₅ после роста независимо от содержания кобальта высокотемпературная фаза имеет L21-структуру и содержит антифазные границы. В монокристаллах после роста присутствует малая объемная доля (1-2 %) частиц γ -фазы. Высокотемпературный отжиг с закалкой приводит к растворению частиц γ -фазы и снижению степени порядка аустенита, который состоит из смеси L21- и B2-фаз. Области L21 и B2 фаз представляют собой нанодомены с размерами 20-50 нм (Ni₄₄Fe₁₉Ga₂₇Co₁₀) и 10-20 нм (Ni₃₉Fe₁₉Ga₂₇Co₁₅). За счет данных изменений микроструктуры происходят следующие изменения функциональных свойств. Закалка приводит к росту температур мартенситных превращений (на 80 К) в кристаллах Ni₄₄Fe₁₉Ga₂₇Co₁₀ и сдвигу в сторону высоких температур (на 70-130 К) интервалов проявления мартенситных превращений под нагрузкой в монокристаллах Ni₄₂Fe₁₉Ga₂₇Co₁₂ и Ni₃₉Fe₁₉Ga₂₇Co₁₅. Происходит увеличение прочностных свойств высокотемпературной и мартенситной фаз, что приводит к увеличению сопротивления матрицы образованию ориентированного мартенсита, уменьшению механического гистерезиса и увеличению температуры проявления сверхэластичности. Закаленное состояние выбрано в качестве базиса для проведения исследований кинетики старения на следующем этапе выполнения проекта.

Впервые проведены систематические исследования влияния содержания кобальта на развитие мартенситных превращений, эффекта памяти формы и сверхэластичности в [001]-монокристаллах Ni₄₄Fe₁₉Ga₂₇Co₁₀, Ni₄₂Fe₁₉Ga₂₇Co₁₂, Ni₃₉Fe₁₉Ga₂₇Co₁₅ и Ni₃₄Fe₁₉Ga₂₇Co₂₀ (ат. %). Экспериментально обнаружено, что в монокристаллах Ni₄₄Fe₁₉Ga₂₇Co₁₀ независимо от состояния (после роста или закалка) наблюдаются термоиндуцированные мартенситные превращения при охлаждении/нагреве в свободном состоянии. Увеличение содержания кобальта до 12-15 ат. % приводит к подавлению термоиндуцированного мартенситного превращения, однако мартенситные превращения возможно индуцировать за счет

приложения сжимающей нагрузки. В монокристаллах $\text{Ni}_{34}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{20}$ высокое содержание кобальта вызывает полную стабилизацию аустенита и подавление мартенситных превращений, как при охлаждении, так и под нагрузкой.

Увеличение содержания кобальта (с 10 до 15 ат. %) вызывает уменьшение величины обратимой деформации при развитии эффекта памяти формы (с 4,7 до 2,7 %), повышает сопротивление высокотемпературной фазы к появлению ориентированного мартенсита, что проявляется в виде чрезвычайно сильного повышения напряжений, необходимых для получения ориентированного мартенсита (на один-два порядка с 5-25 МПа до 200-550 МПа). Уменьшить сопротивление матрицы к образованию мартенсита возможно за счет механических тренировок, после которых ориентированный мартенсит может возникать за счет наличия дислокаций и остаточного мартенсита; а так же за счет дополнительного отжига, приводящего к выделению большой объемной доли γ -фазы, снижающей содержание кобальта в матрице.

Увеличение содержания кобальта (с 10 до 15 ат. %) повышает сопротивление высокотемпературной фазы к пластической деформации и вызывает рост прочностных свойств высокотемпературной фазы (с 780 до 910 МПа), что способствует развитию сверхэластичности и уменьшению механического гистерезиса. С другой стороны, увеличение содержания кобальта (с 10 до 15 ат. %) вызывает сдвиг температурного интервала сверхэластичности в сторону низких температур (на 180-270 К), поэтому высокотемпературная сверхэластичность (выше 373 К) в монокристаллах $\text{Ni}_{42}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{12}$ и $\text{Ni}_{39}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{15}$ не наблюдается, тогда как в монокристаллах $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ сверхэластичность развивается от 146 К до 423 К. Этот температурный интервал сверхэластичности, $\Delta T_{\text{СЭ}} = 277$ К, является наиболее широким среди сплавов на основе NiFeGa при деформации сжатием.