

Сведения о выполненных работах в 2021 году
по проекту «Разработка функциональных моно- и поликристаллов NiFe- и
NiMn-сплавов с большими обратимыми деформациями и
высокой циклической стабильностью эластокалорического эффекта»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 20-19-00153

Руководитель Панченко Елена Юрьевна д-р физ.-мат. наук

При выполнении этапа (2021 г.) проекта проведено исследование микроструктуры и изучены закономерности развития L21-10M/14M-L10 мартенситных превращений, проявления эластокалорического эффекта в циклах нагрузка/разгрузка в гетерофазных монокристаллах сплавов NiFeGa(Co) и NiMnGa, содержащих дисперсные частицы различных размеров.

Экспериментально показано, что выделение полукогерентных частицы γ' -фазы за счет старения при 773 К, 1 ч в [001]А- и [011]А-монокристаллах NiFeGa, позволяет расширить в 1,3-1,4 раза температурные интервалы проявления СЭ и ЭКЭ по сравнению с исходным состоянием после роста. Это обусловлено, во-первых, более низкой температурой $A_F = 270$ К, определяющей начало температурного интервала СЭ, в состаренных кристаллах по сравнению с исходным состоянием ($A_F = 289$ К). Во-вторых, в состаренных кристаллах наблюдается более высокое сопротивление дислокационному скольжению при развитии МП под нагрузкой за счет упрочнения матрицы частицами γ' -фазы, что способствует расширению рабочего интервала в сторону высоких температур по сравнению с исходным состоянием.

Сильная ориентационная зависимость ЭКЭ и СЭ, которая наблюдается в исходных однофазных монокристаллах сплавов NiMnGa и NiFeGa(Co), имеет место и в состаренных монокристаллах. Высокие прочностные свойства аустенита и мартенсита, отсутствие процессов раздвойнивания кристаллов L10-мартенсита в монокристаллах сплавов NiFeGa(Co) и NiMnGa, ориентированных вдоль [001]А-направления, приводят к широкому температурному интервалу сверхэластичности, узкому механическому гистерезису и способствуют проявлению стабильного эластокалорического эффекта в широком интервале температур по сравнению с [011]А-кристаллами. В состаренных при 773 К, 1 ч [001]А-монокристаллах сплава Ni₅₄Fe₁₉Ga₂₇ установлен максимальный рабочий температурный интервал наблюдения ЭКЭ 270 К от 278 до 548 К с максимальной величиной адиабатического охлаждения $\Delta T_{ad} = (10,0 \pm 0,8)$ К.

Низкопрочные [011]А-монокристаллы исследуемых сплавов в однофазном и гетерофазном состояниях, в которых наблюдается раздвойнивание кристаллов L10-мартенсита, проявляют сверхэластичность и эластокалорический эффект в 2 раза более узком температурном интервале, а сверхэластичность характеризуется в 1,6-2,5 раза большей величиной механического гистерезиса в отличие от [001]А-кристаллов.

Установлено, что в гетерофазных кристаллах NiFeGa(Co) с некогерентными дисперсными частицами теоретическая оценка величины адиабатического охлаждения на основе данных дифференциальной сканирующей калориметрии при развитии мартенситных превращений в циклах охлаждение/нагрев без нагрузки дает заниженные значения и не может быть использована для определения максимального ресурса эластокалорического эффекта. Предполагается, что такое поведение материала связано с различной величиной изменения энтропии ΔS и энтальпии ΔH превращения при образовании самоаккомодирующей структуры мартенсита охлаждения и ориентированной структуры мартенсита напряжений при проявлении эластокалорического эффекта. Это может определяться различной конечной структурой мартенсита (10M/14M) или L10 в циклах охлаждение/нагрев без нагрузки и в циклах нагрузка/разгрузка при развитии в материале L21(B2)-10M/14M-L10 межмартенситных превращений.

Впервые показано, что высокотемпературные [001]A-монокристаллы Ni₅₀Mn₃₀Ga₂₀ и Ni₅₃Mn₂₅Ga₂₂ при деформации сжатием характеризуются наибольшим коэффициентом производительности COP = 28,4-37,9 среди сплавов с памятью формы и обладают высоким потенциалом использования в твердотельных охлаждающих установках. Коэффициент производительности COP численно равен отношению полезной тепловой энергии, которую может абсорбировать образец из окружающей среды при эластокалорическом эффекте, к величине затраченной работе за рабочий цикл и характеризует эластокалорические свойства материала с точки зрения эффективности для практического использования в твердотельных охлаждающих установках.

Впервые показано, что за счет старения в мартенсите под нагрузкой вдоль [001]A-направления, стабилизации сдвойникового ориентированного L10-мартенсита возможно эффективно управлять эластокалорическими свойствами и параметрами сверхэластичности в гетерофазных монокристаллах сплавов NiFeGa(Co). Однако необходимо увеличивать продолжительность старения в мартенсите под нагрузкой от 1 ч до 3 ч по сравнению с закаленными монокристаллами для получения наилучших результатов. Экспериментально показано, что СМН при 423 К под сжимающей нагрузкой вдоль [001]A-направления гетерофазных кристаллов Ni₄₉Fe₁₈Ga₂₇Co₆ является эффективным способом повышения коэффициента производительности COP при проявлении эластокалорического эффекта за счет минимизации деформирующих напряжений и уменьшению потерь энергии в рабочем цикле. Это способствует облегчению конструкции привода, производящего деформацию эластокалорического охладителя и повышению эффективности ЭКЭ.

Показано, что высокопрочные [001]A-монокристаллы сплавов NiFeGa(Co) и NiMnGa в однофазном и гетерофазном состояниях демонстрируют высокую циклическую стабильность эластокалорического эффекта и сверхэластичности: величина адиабатического охлаждения, величина механического гистерезиса, деформирующие напряжения остаются неизменными при увеличении числа циклов при циклических испытаниях от 3 до 150 циклов нагрузка/разгрузка.