

Сведения о выполненных работах в 2020 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 первого этапа (2020 г.) проекта изучены закономерности проявления эластокалорического эффекта в циклах нагрузка/разгрузка в зависимости от кристаллографической ориентации и температуры испытания в однофазных монокристаллах сплавов NiFeGa(Co) и NiMnGa, испытывающих межмартенситные L21-10M/14M-L10 превращения под нагрузкой.

Экспериментально показано, что высокие прочностные свойства аустенита и мартенсита (800-1500 МПа), отсутствие процессов раздвойнивания кристаллов L10-мартенсита в монокристаллах сплавов NiFeGa и NiMnGa, ориентированных вдоль [001]A-направления, приводят к широкому температурному интервалу проявления сверхэластичности при развитии L21-10M/14M-L10 превращений, узкому механическому гистерезису и способствуют проявлению стабильного эластокалорического эффекта в широком интервале температур по сравнению с [011]A-кристаллами. Максимальный рабочий температурный интервал наблюдения эластокалорического эффекта 195 К от 298 К до 493 К с постоянной величиной адиабатического охлаждения  $\Delta T_{ad} = (10,1 \pm 0,8)$  К наблюдается в однофазных [001]A-кристаллах сплава Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub>.

Впервые установлено на [001]A-монокристаллах сплава Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub>, что при сокращении величины деформации превращения в 2,3 раза с ростом температуры испытания и уровня внешних приложенных напряжений за счет разницы модулей упругости аустенита и мартенсита, величина эластокалорического эффекта  $\Delta T_{ad}$  может оставаться постоянной и не зависеть от температуры испытания. Поскольку в данном случае формируется объемная доля мартенсита, близкая к 100 % во всем рабочем интервале температур.

В низкопрочных [011]A-монокристаллах сплавов NiFeGa и NiMnGa, которые характеризуются более низкими прочностными свойствами мартенсита (меньше в 2 раза) и широким механическим гистерезисом (больше в 1,6-2,3 раза) по сравнению с [001]A-кристаллами, эластокалорический эффект со стабильной величиной адиабатического охлаждения  $\Delta T_{ad}$  наблюдается в узком температурном интервале 20-30 К. С ростом температуры испытания величина  $\Delta T_{ad}$  убывает независимо от химического состава [011]A-монокристаллов. Это обусловлено релаксацией высоких упругих напряжений при развитии мартенситных превращений под нагрузкой в низкопрочных [011]A-монокристаллах за счет процессов раздвойнивания L10-мартенсита и локальной пластической деформацией при повышенной температуре испытания и высоком уровне деформирующих напряжений.

Впервые показано, что старение в мартенсите при 423 К под сжимающей нагрузкой 700 МПа вдоль [001]-направления приводит к изменению характеристик сверхэластичности – снижению в 1,3-1,5 раза деформирующих напряжений и механического гистерезиса, но не оказывает значительного влияния на величину и температурную зависимость эластокалорического эффекта в [001]-монокристаллах сплава Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub>. Минимизация деформирующих напряжений и величины рассеяния энергии в состаренных в мартенсите [001]-кристаллах сплава Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub> при использовании эластокалорического эффекта способствует уменьшению потерь энергии в рабочем цикле и облегчению конструкции привода, производящего деформацию эластокалорического охладителя.

Экспериментально установлено, что независимо от структурного состояния исходные и состаренные в мартенсите высокопрочные [001]-кристаллы Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub> демонстрируют высокую циклическую стабильность эластокалорического эффекта и сверхэластичности: величина адиабатического охлаждения, величина механического гистерезиса, деформирующие напряжения остаются неизменными при увеличении числа циклов от 1 до 100 (150).

Показано, что используя экспериментальные данные температурной зависимости критических напряжений и обратимой деформации при развитии мартенситных превращений в циклах нагрузка/разгрузка можно предсказать температурную зависимость величины эластокалорического эффекта в высокопрочных [001]-монокристаллах Ni<sub>50</sub>Mn<sub>30</sub>Ga<sub>20</sub> и Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub> с узким механическим гистерезисом. Рассчитанные в данных кристаллах значения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Дальнейшие исследования по проекту позволят провести верификацию данного предположения.

Старение монокристаллов Ni<sub>49</sub>Fe<sub>18</sub>Ga<sub>27</sub>Co<sub>6</sub> в мартенсите при 423 К, 1 ч под сжимающей нагрузкой, приложенной вдоль [110]B<sub>2</sub>||[100]L<sub>10</sub>-направления, приводит к стабилизации преимущественного раздвойникового варианта L<sub>10</sub>-мартенсита. Поэтому в циклах охлаждение/нагрев в свободном состоянии наблюдается растягивающая вдоль [001]A-направления обратимая деформация до +9 %. Последующее приложение сжимающих напряжений вдоль [001]A-направления приводит к переориентации мартенситных вариантов (ферроэластичности) с величиной обратимой деформации до -16,0 %.

Исследования зависимости критических напряжений переориентации мартенсита, механического гистерезиса и обратимой деформации ферроэластичности от температуры испытания в данных кристаллах показали следующее:

1) большие обратимые деформации до -16 % вдоль [001]B<sub>2</sub>-направления при сжатии с низкими критическими напряжениями  $\sigma_{cr} < 30$  МПа наблюдаются ниже температур мартенситных превращений в широком температурном интервале ~100 К от 248 К до 343 К;

2) при температурах испытания ниже 248 К заданная деформация образца до -16 % вдоль [001]A-направления при разгрузке является обратимой только после

разгрузки и нагрева до комнатной температуры  $T_k = 300$  К из-за повышения сил трения для движения двойниковых границ с уменьшением температуры;

3) впервые показано, что при более высоких температурах в температурном интервале развития мартенситных превращений от 343 К до 383 К наблюдаются двухстадийные кривые «напряжения-деформация» с суммарной обратимой деформацией до -13,5 % при деформации сжатием вдоль [001]А-направления. В этом температурном интервале на первой стадии переориентация стабилизированного за счет старения варианта мартенсита происходит через последовательное развитие сначала обратного мартенситного превращения в аустенит под действием низких деформирующих напряжений 1–15 МПа, что сопровождается обратным эластокалорическим эффектом (поглощением тепла при нагрузке). Затем, под действием сжимающих напряжений более 100 МПа, на второй стадии имеет место прямое мартенситное превращение в другой преимущественный вариант мартенсита. На второй стадии наблюдается сверхэластичность с обычным эластокалорическим эффектом (выделение тепла при нагрузке и поглощение – при разгрузке). На основе термодинамического анализа показано, что переориентация мартенситных вариантов под нагрузкой посредством обратного, а затем прямого мартенситного превращения является термодинамически выгодной.