

Сведения о выполненных работах и полученных научных результатах  
в период с 14.08.2023 г. по 30.06.2024 г.

по проекту **«Разработка физических основ повышения термомеханической и циклической стабильности сверхэластичности в среднеэнтропийных сплавах CoNiAl(Fe) для применения при экстремально высоких и низких температурах»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 23-79-10093

Руководитель: канд. физ.-мат. наук Ефтифеева Анна Сергеевна

При выполнении первого этапа (2023-2024 г.) проекта установлены закономерности развития B2-L10 мартенситных превращений, эффекта памяти формы и сверхэластичности в монокристаллах среднеэнтропийных трех- и четырехкомпонентных легированных Fe сплавов CoNiAl(Fe) после различных высокотемпературных термообработок.

Во-первых, за счет гомогенизации при 1623 К в течение 6,0 ч в атмосфере гелия с последующей закалкой в воду с воздуха от 1643 К в монокристаллах Co<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Al<sub>30</sub> и Co<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Al<sub>28</sub>Fe<sub>2</sub> получена гомогенная структура близкая к однофазной B2-структуре с минимальным содержанием вторичной  $\gamma/\gamma'$ -фазы  $f = 2-9\%$  и ее равномерным распределением по объему кристалла. Такая структура приводит к узкому температурному гистерезису 17-22 К и высокому соотношению вкладов упругой и рассеянной энергий  $|\Delta G_{rev}|/2|\Delta G_{fr}| = 2,9-3,6$  при развитии термоупругого B2-L10 мартенситного превращения.

Во-вторых, легирование Fe  $X = 2$  ат. % гомогенизированных монокристаллов (Co<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Al<sub>28</sub>Fe<sub>2</sub> и Co<sub>39</sub>Ni<sub>32</sub>Al<sub>27</sub>Fe<sub>2</sub>), ориентированных вдоль [001]B2-направления, приводит к расширению температурного интервала сверхэластичности на 100-125 К за счет снижения температур B2-L10 мартенситных превращений на  $\Delta M_s = 45-73$  К при увеличении объемной доли  $\gamma/\gamma'$ -фазы, по сравнению с монокристаллами трехкомпонентных сплавов Co<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Al<sub>30</sub> и Co<sub>40</sub>Ni<sub>33</sub>Al<sub>27</sub>.

В-третьих, за счет легирования Fe  $X = 2$  ат. % и высокотемпературной термообработки получена двухфазная (B2+ $\gamma/\gamma'$ )-структура с содержанием вторичной  $\gamma/\gamma'$ -фазы  $f = 9\%$  в монокристаллах Co<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Al<sub>28</sub>Fe<sub>2</sub>, способствующая развитию оптимальных функциональных свойств, а также высокой термомеханической и циклической стабильности сверхэластичности. Гомогенизированные монокристаллы Co<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Al<sub>28</sub>Fe<sub>2</sub> характеризуются широким температурным интервалом сверхэластичности при сжатии вдоль [001]B2-направления 250 К – от 298 К до 548 К, демонстрируют обратимую деформацию  $-3,3\%$  и малый механический гистерезис  $\Delta\sigma = 60$  МПа. Высокотемпературная сверхэластичность без деградации микроструктуры при повышенных температурах наблюдается в широком температурном интервале 200 К (от 298 К до 498 К). Эффект памяти формы в этих

кристаллах развивается с большой обратимой деформацией  $-3,2\%$  и узким температурным гистерезисом  $35\text{ К}$ .

Исследованы закономерности развития обратимой деформации при переориентации мартенситных вариантов при сжатии вдоль  $[001]B2$ -направления в гомогенизированных монокристаллах  $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$  после старения в мартенсите под нагрузкой. В интервале температур  $52\text{ К}$  (от  $203\text{ К}$  до  $Mf^* = 255\text{ К}$ ), реализуется ферроэластичность за счет движения двойниковых границ в мартенсите под действием сжимающей нагрузки вдоль  $[001]B2$ -направления. Наведение ферроэластичности позволяет получить гигантскую обратимую деформацию за счет переориентации мартенсита  $-12,0\%$  в  $2,5$  раза выше, чем максимальная теоретическая деформация за счет развития  $B2-L10$  мартенситного превращения, с узким механическим гистерезисом  $13\text{ МПа}$  в низкотемпературной области.

Впервые выявлена стадийность обратимой деформации в температурном интервале  $105\text{ К}$  (от  $Mf^* = 255\text{ К}$  до  $As = Af = 360\text{ К}$ ) и установлен ее механизм. Суммарная обратимая деформация в этом температурном интервале составляет  $-10,2\%$  и связана с переориентацией мартенсита через развитие обратной последовательности  $L10(V1)-B2$  мартенситных превращений под нагрузкой на первой стадии и  $B2-L10(V2)$  мартенситных превращений под нагрузкой на второй стадии. Показано, что первая стадия сопровождается полностью обратимой деформацией до  $-6,0\%$  с узким механическим гистерезисом  $3\text{ МПа}$ , низким критическим напряжением  $8\text{ МПа}$  и эластокалорическим эффектом  $2,0\text{ К}$ . За счет низких значений сил трения для движения двойниковых границ, данная стадия характеризуется высокой циклической стабильностью в циклах нагрузка/разгрузка и высоким коэффициентом производительности для применения эластокалорического эффекта в системах твердотельного охлаждения  $COP = 67,8$ , который превышает максимальный  $COP = 20-25$  при развитии мартенситных превращений под нагрузкой в таких сплавах, как  $NiFeGa$ ,  $CuZnAl$ ,  $TiNiCu$ .