

УДК 539.371: 548.55

DOI: 10.17223/00213411/63/9/132

И.В. КУКСГАУЗЕН<sup>1</sup>, Ю.И. ЧУМЛЯКОВ<sup>1</sup>, И.В. КИРЕЕВА<sup>1</sup>, В.В. ПОКЛОНОВ<sup>1</sup>, Д.А. КУКСГАУЗЕН<sup>1</sup>,  
В.А. КИРИЛЛОВ<sup>1</sup>, С. LAUHOFF<sup>2</sup>, Т. NIENDORF<sup>2</sup>, Р. KROOB<sup>2</sup>

### ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И СПОСОБА ДЕФОРМАЦИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА [001]-МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА FeNiCoAlTi \*

Исследовано влияние частиц  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фазы на развитие термоупругого  $\gamma$ - $\alpha'$ -мартенситного превращения (МП) при охлаждении/нагреве и под нагрузкой в [001]-монокристаллах сплава Fe – 28 % Ni – 17 % Co – 11.5 % Al – 2.5 % Ti (ат. %) при деформации растяжением и сжатием. Показано влияние режима старения на температуру  $M_s$ . При одновременном выделении частиц  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фазы после двухступенчатого старения 4+4 ч при 873 К обнаружено максимальное увеличение температуры  $M_s$  на 100 К по сравнению с одноступенчатым старением в течение 8 ч. Различие (асимметрия) напряжений для начала  $\gamma$ - $\alpha'$  МП  $\sigma_{кр}$  и величины  $\alpha = d\sigma_{кр}/dT$  при растяжении и сжатии в кристаллах с частицами  $\gamma'$ - и  $\gamma'+\beta$ -фаз не наблюдается. Отсутствие асимметрии  $\sigma_{кр}$  и величины  $\alpha = d\sigma_{кр}/dT$  обусловлено близкими величинами эффекта памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности (СЭ) при растяжении и сжатии. При выделении частиц  $\beta$ -фазы величина ЭПФ и СЭ уменьшается.

**Ключевые слова:** монокристаллы сплава на основе железа, термоупругое мартенситное превращение, сверхэластичность, эффект памяти формы, наноразмерные частицы  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фаз.

#### Введение

Неэквивалентные высокоэнтропийные сплавы FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti) являются перспективными материалами для практического применения в различных отраслях промышленности в качестве крупноразмерных элементов благодаря ряду преимуществ по сравнению с другими сплавами, например с широко известным сплавом TiNi. Данные материалы оказываются дешевыми, являются высокопрочными (высокий уровень напряжений для начала  $\gamma$ - $\alpha'$  МП ~ 1.1 ГПа), характеризуются высокими демпфирующими способностями (механический гистерезис равен 600–800 МПа) и отличными функциональными свойствами (величина обратимой деформации до 14.5 %) [1–18].

В поли- и монокристаллах сплавов FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti) эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ) реализуются за счет развития термоупругого  $\gamma$ - $\alpha'$  МП ( $\gamma$  – гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК),  $\alpha'$  – объемно-центрированная тетрагональная решетка (ОЦТ)). Термоупругий характер превращения в данных сплавах достигается путем выделения атомно-упорядоченных по типу  $L1_2$  наноразмерных частиц  $\gamma'$ -фазы при старении при температуре 823–973 К в течение 0.5–90 ч [1–18]. Поликристаллы сплавов FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti) оказываются хрупкими, так как при старении одновременно с частицами  $\gamma'$ -фазы по границам зерен выделяются частицы  $\beta$ -фазы с атомно-упорядоченной по типу  $B2$ -структурой [1, 4–6]. Для наблюдения СЭ и ЭПФ в поликристаллических образцах, во-первых, создают острую  $\langle 100 \rangle \{135\}$  или  $\langle 100 \rangle \{110\}$  текстуру за счет холодной прокатки до больших степеней деформаций ~ 95 % с последующей рекристаллизацией и, во-вторых, подавляют выделение  $\beta$ -фазы по границам зерен за счет легирования сплавов FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti) бором концентрацией до 0.05 ат. % [1, 4–6].

К настоящему времени нет систематических данных по исследованию влияния частиц  $\beta$ -фазы на ЭПФ и СЭ в сплавах FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti) при растяжении и сжатии. Такие исследования можно выполнить с использованием монокристаллов. В монокристаллах нет границ зерен и они позволяют выделить частицы  $\beta$ -фазы, как и  $\gamma'$ -фазы, в объеме кристалла и изучить их влияние на ЭПФ и СЭ при растяжении и сжатии. Ранее в нашей работе [17] был представлен способ термической обработки, который позволил получить нанокомпозит с частицами  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фазы. Этот способ заключается в старении кристаллов двумя ступенями: одна ступень – в печи в среде инертного га-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: РФФИ № 19-49-04101 (рост монокристаллов, исследование механических и функциональных свойств), DFG № 405372848 (KR 5134/1-1) (выплавка сплавов и химический анализ).

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>