

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ОБРАБОТОК НА МИКРОСТРУКТУРУ И
ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕРМОУПРУГИХ МАРТЕНСИТНЫХ
ПРЕВРАЩЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ NiFeGaCo**

Тимофеева Е.Е., Тохметова А.Б., Ефтифеева А.С., Суриков Н.Ю, Тагильцев А.И.,
Янушоните Э.И, Жердева М.В., Панченко Е.Ю., Чумляков Ю.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

В работе представлено исследование влияния термических обработок на микроструктуру и закономерности развития термоупругих мартенситных превращений (МП) в монокристаллах $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ (ат.%). Известно, что сплавах NiFeGaCo увеличение содержания кобальта приводит к уменьшению температуры начала МП при охлаждении, M_s , вплоть до полного подавления мартенситных превращений (МП) при содержании кобальта более 10 ат.% [1, 2]. Т.е. в сплавах $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ эффект памяти формы (ЭПФ) проявляется при очень низких температурах. Аналогичная ситуация наблюдается в сплавах TiNi, где с большим содержанием никеля. Для снятия пресыщения по никелю в сплавах TiNi применяют старение, в ходе которого выделяются частицы вторичных фаз, что повышает температуры МП, понижает минимальные напряжения образования ориентированного мартенсита, приводит к высоким прочностным свойства В2-фазы и широкому интервалу СЭ. В сплавах $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ таких исследований не проводилось.

Монокристаллы выращены методом Бриджмена. Исследования проводились на монокристаллах после роста и кристаллах, отожженных при 1448 К в течение 1 ч с последующей закалкой в воде. После закалки монокристаллы подвергали старению при температурах 673-1173 К с последующей закалкой. Температуры МП исследовались по температурной зависимости электрического сопротивления. Электронно-микроскопические исследования проводились на Hitachi HT-7700.

Установлено, что в монокристаллах после роста содержат частицы γ -фазы с ГЦК-структурой размером 200-500 нм и объемной долей $\sim 1-2\%$. Аустенит имеет $L2_1$ -структуру. В этих рефлексах на темнопольных изображениях видны термические антифазные границы. Закалка приводит к растворению частиц γ -фазы и образованию антифазных доменов 20-50 нм, которые представляют собой смесь В2- и $L2_1$ -фаз, что наблюдалось на сплавах NiFeGa в [3-4]. Наличие В2-фазы связано с проведением отжига выше температуры порядок-беспорядок (для NiFeGa 973К [3]). Следовательно, в закаленном состоянии степень порядка понижается по сравнению с исходным состоянием после роста, что вызывает сильное увеличение температур. Это согласуется с работами [4-6], где доказано, что изменение порядка посредством термических обработок в сплавах NiFeGa и др. сплавах с памятью формы оказывает сильное на температуры МП. Уменьшение степени порядка высокотемпературной фазы снижает стабильность аустенита и приводит к росту температуры равновесия фаз T_0 и, следовательно, к росту температуры начала МП при охлаждении M_s .

После старения при температурах 673-1173 К температуры МП изменяются немонотонно по сравнению с закаленными кристаллами. После старения при 673 и 773 К температуры МП увеличиваются относительно закаленных максимум на 50 К. Электронномикроскопически показано, что старение при 773 К вызывает выделение частиц γ -фазы размером 50-70 нм и объемной долей 4-6 %. Выделившаяся фаза вызывает в матрице уменьшение кобальта, что в соответствии с [3] может привести к увеличению температур. Данный фактор является более значимым по сравнению двумя другими. Первый – дисперсное упрочнение, которое должно приводить к упрочнению высокотемпературной фазы и появлению упругих полей напряжений, что должно приводить к понижению температур МП. Второй фактор – изменение степени порядка, которое происходит после старения при 773 К закаленных кристаллов. Электронномикроскопически установлено, что после старения при 773 К домены, соответствующие порядку $L2_1$ -структуры увеличиваются

в размерах.

Старение при температурах выше 773 К вызывает понижение температур МП, что согласуется с данными, полученными в [4-7] на монокристаллах NiFeGa. При этом частицы γ -фазы увеличиваются в размерах. Проведено электронномикроскопическое исследование микроструктуры монокристаллов после старения при 1173 К, 1 ч. Показано, что такое старение, в отличие от сплавов NiFeGa, приводит к растворению частиц вторичной фазы.

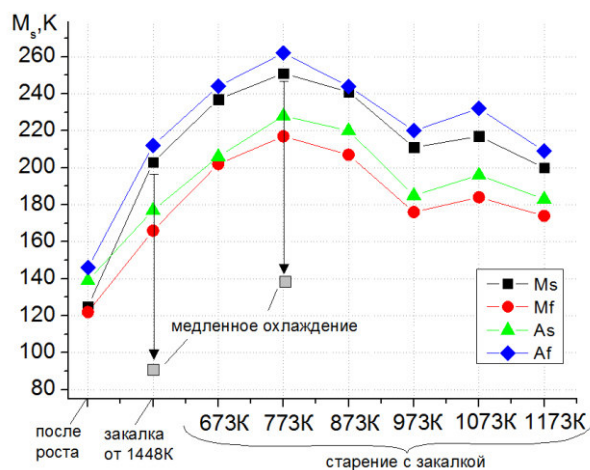


Рис. 1. Зависимости температур МП от режима термической обработки

Экспериментально установлено, что температуры МП в монокристаллах $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ (ат.%) сильно зависят от способа охлаждения после термической обработки. Если после высокотемпературного отжига при 1448 К, 1 ч и после старения при 773 К, 1 ч проводить медленное охлаждение, то это должно вызывать увеличение степени порядка, как в закаленных, так и в состаренных монокристаллах, а значит, понижение температур МП. Действительно, в закаленных монокристаллах дополнительное низкотемпературное старение привело к уменьшению температуры M_s до 90 К, а в состаренных при 773 К – до 140 К.

Таким образом, экспериментально установлены закономерности влияния режима термических обработок (при различных температурах и способах охлаждения) на температуры МП и микроструктуру монокристаллов $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}\text{Co}_{10}$ (ат.%).

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ Russian Science Foundation (grant No. 21-19-00287).

1. Chen H., Wang Y.-D., Nie Z., et al. // Nat. Mater. 2020. Vol. 19. P. 712–718.
2. Wang D.P., Chen X., Nie Z.H. // Europhys. Lett. 2012. Vol. 98. P. 46004.
3. Oikawa K., Ota T., Ohmori T., et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. 81 Vol. 81. P. 5201–2503.
4. Santamarta R., Cesari E., Font J., et al. // Scr. Mater. 2006. Vol. 54. P. 1985–1989.
5. Santamarta R., Font J., Muntasell J., Masdeu F., Pons J., Cesari E., Dutkiewicz J. // Scripta Materialia. 2006. Vol. 54. P. 1105–1109.
6. Omori T., Kamiya N., Sutou Y., Oikawa K., Kainuma R., Ishida K. // Materials Science and Engineering A. 2004. Vol. 378. P. 403–408.
7. Timofeeva E.E., Panchenko E.Yu., Chumlyakov Yu.I. // Russian Physics Journal. 2007. Vol. 50(10). P. 980–984.