

05.4

Анизотропия деформации памяти формы в монокристалле сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$

© В.И. Николаев, А.В. Солдатов, Р.Б. Тимашов, В.М. Крымов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nikolaev.v@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 21 октября 2019 г.

В окончательной редакции 21 октября 2019 г.

Принято к публикации 25 октября 2019 г.

Исследованы диаграммы одноосного сжатия монокристалла $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ с эффектом памяти формы, вырезанного в форме куба, при поочередном нагружении по трем направлениям перпендикулярно его граням. Обнаружено принципиально различное поведение кристалла при деформации в направлениях $\langle 110 \rangle_A$ и $[001]_A$. При комнатной температуре независимо от величины деформации кристалл, сжимаемый вдоль $[001]_A$, ведет себя как сверхупругий, а в направлениях $\langle 110 \rangle_A$ при деформациях более 4% сверхупругое поведение замещалось появляющейся деформацией памяти формы. Измеренные деформации в поперечных сжатии направлениях указывают на аномальное поведение коэффициента Пуассона.

Ключевые слова: деформация памяти формы, монокристаллы, анизотропия.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.03.48982.18081

Впервые на кристаллы Ni–Fe(Co)–Ga обратили внимание как на один из сплавов Гейслера, обладающий магнитным эффектом памяти формы [1], т.е. способностью к большим неупругим деформациям под действием магнитного поля. Особый интерес к этому классу материалов появился в последнее время после того, как были обнаружены магнитокалорический эффект в них [2] и возможность создания магнитных холодильников. Исследование термоупругих превращений показало, что в некоторых кристаллах этого семейства имеется еще один важный с практической точки зрения эффект. Так, в кристаллах сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ обнаружена возможность высокоскоростного восстановления деформации памяти формы [3].

Целью настоящей работы является изучение анизотропии деформационного поведения образца монокристаллического $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$, вырезанного в форме куба и поочередно деформированного одноосным сжатием вдоль ребер куба.

Кристаллы $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ диаметром 7.5 mm были выращены из расплава методом Чохральского на затравку, ориентированную в направлении $[110]_A$. Сплав был приготовлен из чистых компонентов четырех металлов. Перед ростом кристалла сплав многократно кристаллизовался и плавился в атмосфере аргона в алундовом тигле в зоне с индукционным нагревом. Кристалл остывал в ростовой камере и далее термически не обрабатывался.

Образцы кубической формы с размерами ~ 3.5 mm вдоль ребра вырезались электроискровым способом. Кристаллы ориентировались так, что одна из граней куба была перпендикулярна оси роста кристалла $[110]_A$, другие направления в кубе соответствовали $[001]_A$ и $[\bar{1}10]_A$ (условные обозначения Z, Y и X соответственно). Методика ориентации кристаллов изложена в [4].

Опыты по одноосному сжатию образцов проводились в трех направлениях на испытательной машине Instron 1342 с постоянной скоростью перемещения захватов 10^{-4} s^{-1} . Эксперименты выполнялись последовательно, т.е. образец деформировался в выбранном направлении с записью диаграммы в координатах напряжение–деформация и далее при наличии оставшейся деформации памяти формы нагревался с постоянной скоростью 2 K/min до температуры обратного мартенситного превращения, где происходило ее полное исчезновение. Следующий эксперимент осуществлялся на образце, приведенном в исходное состояние. Полная обратимость деформации памяти формы в данном монокристалле является существенным его преимуществом в плане перспектив его циклической работы в устройствах. Факт хорошей повторяемости восстановления размеров куба в циклах деформация–восстановление подтвердил наши наблюдения в предыдущих исследованиях [3,5].

Характерные диаграммы сжатия вплоть до начала второго линейного участка деформации показаны на рис. 1. Из них следует, что в двух направлениях семейства $\langle 110 \rangle$ кристалл при этих условиях приобретает память формы, а в направлении $[001]$ сохраняется сверхупругость, деформация при разгрузке полностью восстанавливается.

В таблице приведены данные опытов по деформации памяти формы, которая каждый раз измерялась у куба в трех направлениях. Отрицательная величина означает уменьшение линейного размера образца, положительная — увеличение.

Сжатие вдоль $[110]_A$ и $[\bar{1}10]_A$ показало практически идентичные диаграммы и значения остаточной деформации. Здесь особо следует отметить большие растягива-

Измерения размеров образца в трех направлениях после сжатия вдоль ребер куба на рис. 1

| Номер опыта | Направление сжатия | Деформация памяти формы, % | | |
|-------------|----------------------|----------------------------|------|------|
| | | Z | Y | X |
| 1 | Z($[110]_A$) | -5.1 | 10.4 | -4.5 |
| 2 | Y($[001]_A$) | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | X($[\bar{1}10]_A$) | -4.8 | 10.4 | -5.4 |

ющие деформации (более 10%) в направлении $[001]_A$ при сжатии вдоль $[110]_A$ и $[\bar{1}10]_A$. Подобное поведение хорошо согласуется с отмеченной ранее асимметричностью поведения деформации памяти формы в направлении $[001]_A$ при одноосной деформации сжатия и растяжения [6].

При сжатии вдоль $[001]_A$ имеет место иная картина: остаточной деформации в образце не наблюдается, т.е. образец вдоль этого направления сверхупругий независимо от величины деформации (возвращаемая деформация до $\sim 5.5\%$).

В предыдущих опытах задавалась максимальная деформация памяти формы образца. Однако задание неполной деформации дает возможность рассмотреть в подробностях этапы превращения в кристалле. На рис. 2 представлены циклические диаграммы сжатия вдоль $[110]_A$ (Z). Каждый цикл представляет собой нагружение образца до определенного значения деформации и последующую разгрузку. При появлении в опыте не только сверхупругого поведения, но и остаточной деформации (деформации памяти формы) она в каждом цикле восстанавливалась путем нагрева деформированного образца до температуры конца обратного мартенситного превращения.

Как видно из представленных диаграмм, до деформации примерно 4% образец ведет себя как сверхупругий. При больших задаваемых деформациях начинает появляться остаточная деформация, что характерно для нагружения вдоль направления $[110]$ (и аналогично $[\bar{1}10]$). Характерной особенностью данных диаграмм является то, что деформацию памяти формы (до 4%) образец приобретает при разгрузке в области малых нагрузок, на спаде деформационных кривых (кривая 2). Считается [7], что такое поведение в свежеработанных образцах без последующей обработки со структурой $L2_1$ связано с образованием модулированной структуры мартенсита 14M, при дальнейшем увеличении деформации этот нестабильный мартенсит может переходить в тетрагональный мартенсит $L1_0$, который и определяет величину деформации памяти формы.

Во всех случаях, рассматриваемых в настоящей работе, восстановление образца было немонотонным, с множественными ускорениями, а ряде случаев наблюдались скачки кристаллов, подобные описанным нами ранее [5] и наблюдавшимся позже на других кристаллах [8,9].

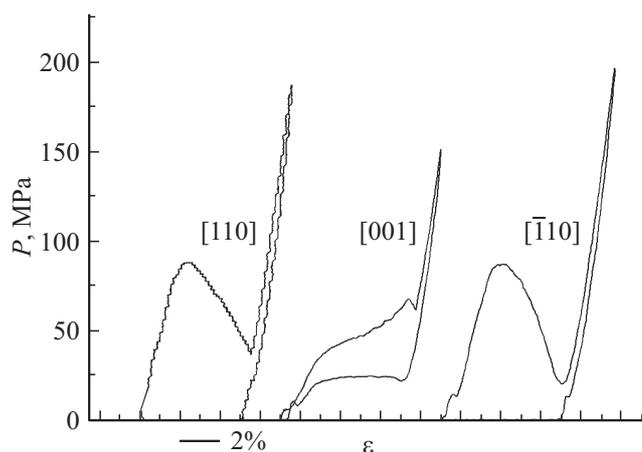


Рис. 1. Диаграммы одноосного сжатия вплоть до начала второго упругого участка и последующей разгрузки кристалла $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ вдоль направлений Z($[110]_A$), Y($[001]_A$), X($[\bar{1}10]_A$) при комнатной температуре (293 K).

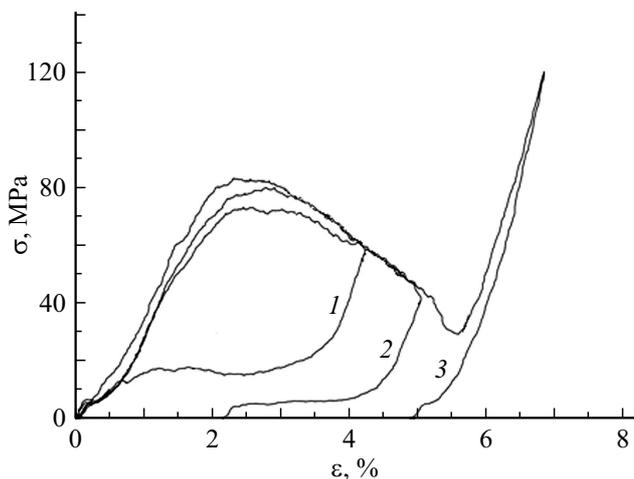


Рис. 2. Последовательно записанные диаграммы одноосного сжатия и разгрузки при увеличении в каждом последующем цикле общей деформации памяти формы. Сжатие осуществлялось вдоль направления Z при комнатной температуре (~ 293 K). 1 — полный возврат деформации при разгрузке (сверхупругая деформация), 2 — частичный возврат деформации и появление частичной деформации памяти формы, 3 — полная деформация памяти формы.

В результате исследования выявлено существенное анизотропное поведение деформации памяти формы и последующего ее восстановления. Как показано, образец одновременно проявляет свойства как сверхупругого материала, так и материала с эффектом памяти формы с двукратным отличием напряжения начала фазовой деформации в зависимости от направления деформирования (вдоль или поперек исходной двойниковой структуры). Сами диаграммы нагружения в этих случаях также имеют принципиальное различие. В направлениях $[110]$ и $[\bar{1}10]$ максимальное напряжение дефор-

мирования достигается на начальном упругом участке, далее отмечается многократный его спад к концу участка фазовой деформации, в направлении сжатия [001] диаграмма деформирования имеет обычный вид, т.е. напряжение постепенно нарастает, достигая максимума перед вторым линейным участком.

Благодарности

Авторы благодарят Ю.Г. Носова за определение кристаллографической ориентации в кристаллах и А.И. Аверкина за помощь в проведении экспериментов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-19-00129).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Imano Y., Omori T., Oikawa K., Sutou Y., Kainuma R., Ishida K.* // Mater. Sci. Eng. A. 2006. V. 438-440. P. 970–973. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.080>
- [2] *Recarte V., Pérez-Landazábal J.I., Gómez-Polo C., Cesari E., Dutkiewicz J.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. N 13. P. 132503. <https://doi.org/10.1063/1.2189665>
- [3] *Николаев В.И., Якушев П.Н., Малыгин Г.А., Пульнев С.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 19. С. 83–90.
- [4] *Носов Ю.Г., Крымов А.И., Аверкин А.И., Николаев В.И.* Особенности мартенситного превращения в кристаллах сплава Ni–Fe–Ga–Co при термоциклировании // VII Сборник материалов Междунар. конф. „Деформация и разрушение материалов“. М: ИМЕТ РАН, 2017. С. 596–597.
- [5] *Николаев В.И., Якушев П.Н., Малыгин Г.А., Аверкин А.И., Пульнев С.А., Зограф Г.П., Кустов С.Б., Чумляков Ю.И.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 8. С. 18–27.
- [6] *Panchenko E., Chumlyakov Yu., Maier H.J., Timofeeva E., Karaman I.* // Intermetallics. 2010. V. 18. N 12. P. 2458–2463. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.09.009>
- [7] *Тимофеева Е.Е., Панченко Е.Ю., Ветошкина Н.Г., Чумляков Ю.И., Тагильцев А.И., Ефтимеева А.С., Maier H.* // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. В. 8. С. 114–122.
- [8] *Yang Sh., Omori T., Wang C., Liu Y., Nagasako M., Ruan J., Kainuma R., Ishida K., Liu X.* // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 21754. <https://doi.org/10.1038/srep21754>
- [9] *Zhao D., Xiao F., Nie Z., Cong D., Sun W., Liua J.* // Scripta Mater. 2018. V. 149. P. 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.029>