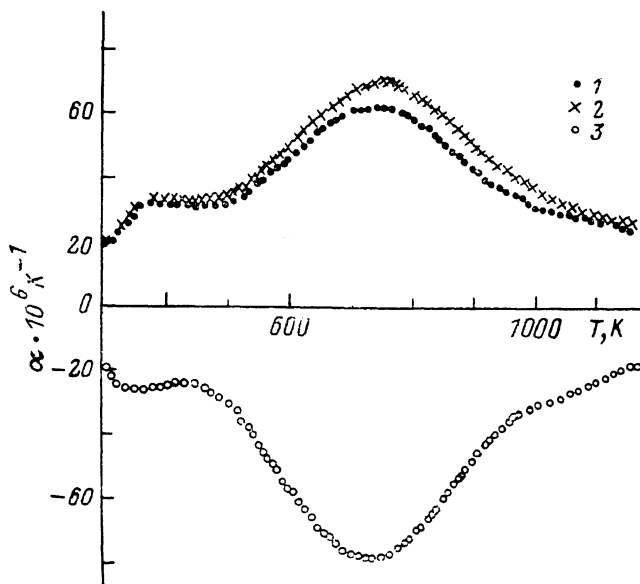


ГИГАНТСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ  
МОНОКРИСТАЛЛОВ NiSi

С. М. Бармин, А. А. Фролов

Данная работа является продолжением исследований теплового расширения моносилцидов 3d-переходных металлов [1, 2].

Силицид никеля NiSi отличается от других моносилцидов своей кристаллической структурой. Так, CoSi, FeSi и MnSi имеют кубическую структуру B20 [3], структура NiSi псевдогексагональна и близка к структуре NiAs [4]. Физические свойства NiSi практически не изучены. Это объяс-



Температурные зависимости коэффициента теплового расширения монокристаллов силицида никеля NiSi.

1 — [10.0], 2 — [01.0], 3 — [00.1].

няется трудностью получения хорошего компактного поликристаллического образца NiSi (слиток после выплавки при охлаждении сильно растрескивается и, как правило, рассыпается в порошок).

Целью работы было получение монокристалла NiSi и измерение коэффициентов теплового расширения (КТР,  $\alpha$ ) образцов, вырезанных вдоль главных осей кристалла.

Монокристалл NiSi выращивался из расплава по методу Чохральского; при этом был впервые получен кристалл диаметром основания 20 мм и высотой 70 мм. Из него на электроэрозионном станке вырезались образцы в форме параллелепипедов ( $2 \times 2 \times 20$  мм) с осями вдоль направлений [00.1], [01.0] и [10.0].

Тепловое расширение в интервале температур от 293 до 1200 К исследовалось с помощью кварцевого dilatометра с индуктивным датчиком. Погрешность в определении среднего КТР в 10-градусном интервале температур не превышала  $0.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Результаты исследования теплового расширения монокристаллических образцов NiSi представлены на рисунке. Как видно из него, тепловое расширение NiSi сильно анизотропно во всем изученном интервале температур. Обращают на себя внимание большие значения КТР по абсолютной величине для образцов всех направлений и инверсия знака  $\alpha$  с «+»

на «—» при переходе от базисной плоскости кристалла к его главной оси [00.1]. С повышением температуры до 750 К разница между главными коэффициентами расширения увеличивается, при этом решетка деформируется, резко сжимаясь вдоль оси С и расширяясь в базисной плоскости. Такое поведение КТР свидетельствует об анизотропии сил взаимодействия в NiSi. Степень анизотропии расширения силицида никеля можно характеризовать отношением модуля разности главных коэффициентов к среднему КТР:  $\delta = [ \alpha_{\perp} - \alpha_{\parallel} ] / \alpha_{\text{ср}}$ . В силу симметричности поведения КТР относительно температуры величина степени анизотропии в NiSi остается постоянной и равной шести.

Коэффициент теплового расширения представляет собой симметричный тензор 2-го ранга, имеющий шесть независимых компонентов. Число последних сокращается в зависимости от симметрии кристалла и соответствует главным коэффициентам теплового расширения. Законы преобразования компонентов тензора 2-го ранга совпадают с законами преобразования поверхностей второго порядка. Уравнение характеристической поверхности, приведенное к главным осям, имеет вид [5]

$$X_1^2 \alpha_1 + X_2^2 \alpha_2 + X_3^2 \alpha_3 = 1, \quad (1)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  — текущие координаты осей;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — главные коэффициенты теплового расширения. Для гексагональной сингонии тензор КТР имеет два независимых компонента, которые измеряются в двух направлениях — параллельном и перпендикулярном главной кристаллографической оси:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{\perp}, \alpha_3 = \alpha_{\parallel}$ . Поэтому выражение (1) можно записать в виде

$$(X_1^2 + X_2^2) \alpha_{\perp} + X_3^2 \alpha_{\parallel} = 1. \quad (1')$$

Для NiSi  $\alpha_1 \approx \alpha_2 > 0, \alpha_{\parallel} < 0$  и (1') принимает вид однополостного гиперболоида:  $(X_1^2 + X_2^2) \alpha_{\perp} - X_3^2 \alpha_{\parallel} = 1$ . Так как в NiSi наблюдается случай, когда один из главных коэффициентов отрицателен ( $\alpha_{\parallel} < 0$ ), а другой положителен ( $\alpha_{\perp} > 0$ ), то можно рассчитать угол, при котором коэффициент расширения становится равным нулю. Конус нулевых значений  $\alpha$  в кристалле NiSi определяется соотношением [5]

$$\gamma = \arctg \sqrt{-\alpha_{\parallel} / \alpha_{\perp}} \quad (\alpha_{\parallel} \neq \alpha_{\perp} \neq 0). \quad (2)$$

Значение угла конуса (см. таблицу) свидетельствует о слабом его изменении с температурой.

Таким образом, на основании проведенного исследования теплового расширения силицида никеля NiSi можно сделать следующие выводы.

1. Тепловое расширение NiSi сильно анизотропно.

2. Характеристическая поверхность тензора расширения NiSi во всем изученном диапазоне температур имеет форму однополостного гиперболоида.

Температурная зависимость угла  $\gamma$ ,  
при котором КТР в кристалле NiSi принимает  
нулевые значения

Т, К	$\gamma$ , град	Т, К	$\gamma$ , град
350	41.8	750	46.4
400	41.4	800	46.0
450	42.4	850	45.0
500	44.3	900	44.4
550	46.4	950	43.2
600	46.9	1000	42.9
650	47.2	1050	43.0
700	47.0	1100	42.7

3. Угловой конус нулевых значений КТР слабо изменяется с температурой и находится в пределах от  $41$  до  $47^\circ$  к главной оси кристалла С.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Кортов С. В., Бармин С. М., Севастьянов А. А. и др. // ФНТ. 1985. Т. 11. № 9. С. 966—970.
- [2] Кортов С. В., Бармин С. М., Севастьянов А. А. и др. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 3. С. 918—921.
- [3] Гельд П. В., Сидоренко Ф. А. Силициды переходных металлов 4-го периода. М., 1971. 582 с.
- [4] Toman K. // Acta Cryst. 1951. N 4. P. 462—464.
- [5] Новикова С. И. // Измерит. техн. 1984. № 10. С. 40—42.

Уральский политехнический институт  
им. С. М. Кирова  
Свердловск

Поступило в Редакцию  
4 ноября 1989 г.

УДК 548.4

© Физика твердого тела, том 32, № 5, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 5, 1990

## ДИСЛОКАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭКСТРАКЦИЯ ГЕЛИЯ ИЗ КРИСТАЛЛОВ LiF

Ю. А. Акулов, И. Н. Зимкин, О. В. Клявин, Б. А. Мамырин,  
Д. Л. Руттер, Л. В. Хабарин, Ю. М. Чернов, В. С. Юденич

Изучение явления дислокационно-динамической диффузии (ДДД), проведенное на металлах, а также на монокристаллах LiF, деформированных в жидком и газообразном  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  и в тяжелой воде [ $^{1-3}$ ], показало, что проникновение внешней среды в кристаллические материалы происходит в процессе их пластической деформации по зарождающимся и движущимся дислокациям. Этот атермический процесс формирует дислокационную структуру поверхностных слоев кристаллов и в значительной степени определяет их поверхностную прочность [ $^4$ ].

В [ $^1$ ] показано, что температура основного пика выделения гелия при динамическом отжиге кристаллов LiF, введенного методом ДДД, совпадает с температурой максимума скорости уменьшения плотности краевых дислокаций в этих кристаллах. Этот факт указывает на ускорение выделения гелия при выходе и аннигиляции краевых дислокаций из кристаллов в процессе их отжига.

В [ $^5$ ] исследовалось выделение водорода из образцов меди и алюминия при их деформировании растяжением. Водород в эти металлы специально не вводился, а попадал в них в процессе изготовления. При этом пики газовыделения возникали во время достижения предела текучести. Однако причина их появления осталась невыясненной.

Цель настоящей работы заключалась в обнаружении и изучении процесса выделения гелия из кристаллов LiF, введенного методом ДДД, при повторном их нагружении в вакууме.

Исследовались отожженные кристаллы LiF ( $\text{Mg}^{2+} \sim 5 \cdot 10^{-4}$  вес. %), из которых выкалывались образцы ( $4 \times 4 \times 12$  мм). Они деформировались сжатием по одной системе плоскостей [ $^6$ ] для исключения возможности образования микротрещин, возникающих при множественном скольжении. Кристалл деформировался до конца площадки текучести ( $\varepsilon \approx 3$  %) со скоростью  $10^{-4}$  с $^{-1}$  в атмосфере газообразного  $^3\text{He}$  при 300 К и давлении  $7 \cdot 10^4$  Па. Затем этот же образец помещался в вакуум и деформировался повторно ( $10^{-5}$  Па) с одновременным измерением количеств гелия, выделяющегося в процессе его нагружения. После повторного нагружения кри-