

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Академик Г. В. КУРДЮМОВ и Н. Т. ТРАВИНА

**РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖАТОМНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ НА ОСНОВЕ
НИКЕЛЯ**

Состояния, при которых металлы и сплавы обладают высокой прочностью, метастабильны и могут существовать длительное время лишь в условиях, когда подвижность атомов мала. Подвижность атомов в кристаллической решетке определяется прочностью межатомных связей. С увеличением прочности связи подвижность атомов уменьшается.

Положение температурной области разупрочнения сплава зависит, следовательно, от прочности межатомных связей в кристаллах фаз, составляющих сплав⁽¹⁾. Поэтому экспериментальное изучение характеристик прочности межатомных связей в кристаллах металлических фаз важно для понимания явлений, происходящих в сплавах при повышенных температурах. Введение легирующих элементов, как это хорошо известно для сталей, может приводить к значительному повышению температур существования метастабильных состояний⁽²⁾.

Количественная оценка величин, характеризующих межатомные связи, может быть получена путем изучения таких свойств металлов и сплавов, как теплота сублимации, энергия активации самодиффузии, характеристическая температура, модули упругости, коэффициенты расширения и др.

В настоящем исследовании мы оценивали прочность межатомной связи в кристаллах твердых растворов на основе никеля при помощи измерения теплового фактора рассеяния рентгеновских лучей^(3,4). Из формул для теплового фактора вычислялись характеристическая температура и среднее квадратичное отклонение атомов от положения равновесия при тепловых колебаниях.

Определение теплового фактора проводилось методом измерения относительных интенсивностей линий на рентгенограммах, полученных при двух температурах⁽³⁾. Рентгенограммы снимались в молибденовом излучении с циркониевым фильтром, перед пленкой ставился алюминиевый фильтр толщиной 0,3 мм. Фотографическая обработка пленок проводилась в строго определенных условиях. Рентгенограммы фотометрировались либо на регистрирующем микрофотометре с 7-кратным увеличением, либо на визуальном микрофотометре марки МФ-2. Интегральная интенсивность определялась по площади, ограниченной микрофотометрической кривой и линией фона. Сравнивались интенсивности отражений от плоскостей (111) и (333) + (511), т. е. от плоскостей с суммой квадратов индексов 3 и 27. По изменению отношения интенсивностей I_3/I_{27} при переходе от никеля к твердому раствору определялись статические искажения решетки твердого раствора, что можно делать при учете изменения теплового фактора^(3,5) и отсутствии экстинкции.

Материалом для исследования служили двойные твердые растворы

никеля с хромом, титаном и алюминием, а также четвертой никель-хром-титан-алюминиевый сплав и упрочняющая α' -фаза, выделяющаяся из него при распаде твердого раствора. Химический состав исследованных сплавов приведен в табл. 1. Двойные сплавы выплавлялись в высокочастотной 5-килограммовой печи. Все сплавы были деформированы ковкой.

Таблица 1

Результаты химического анализа в вес. %

Маркировка сплавов	C	Ni	Cr	Ti	Al	Fe	P	S	Si
1	0,020	99,97	—	—	—	—	—	0,003	—
2	0,040	ост.	19,99	0,06	0,41	0,12	0,001	0,004	0,60
3	0,045	"	32,16	0,05	0,21	следы	0,001	0,003	0,07
4	0,040	"	—	3,88	0,44	1,70	—	—	—
5	0,040	"	—	8,22	0,30	1,87	—	—	—
6	0,020	"	—	—	3,5	—	—	—	—
7	0,020	"	20,15	2,48	0,6	1,90	0,030	0,015	—
8*	—	"	2	14,0	2,0	—	—	—	—

* Порошок, электролитически выделенный из сплава 7 после старения 16 час. при 700°.

Так как сплавы оказались крупнозернистыми, то исследование на сплошных образцах не представлялось возможным из-за появления отдельных точек на рентгенограммах; поэтому образцы изготовлялись из порошков, полученных напильником, растертых в агатовый ступке и просеянных через очень мелкое сито.

Для того чтобы снять напряжения, возникающие в результате напильничания и растирания, порошки отжигались в запаянных кварцевых ампулах либо в специальном металлическом патроне. Контроль за снятием напряжений проводился по разделению дублета K_{α_1} , K_{α_2} линии (311) на рентгенограммах, снятых в марганцевом излучении по методу обратной съемки. Из отожженных порошков изготовлялись цилиндрические образцы диаметром 0,9 мм путем наклеивания бакелитовым лаком на медную проволочку толщиной 0,3 мм.

Рис. 1. Зависимость отношения интенсивностей рентгеновских интерференций (111) и (333) + (511) от содержания легирующих элементов. 1 и 4 — Cr; 2 и 5 — Ti; 3 и 6 — Al; 1, 2 и 3 — $T = 23^\circ$; 4, 5 и 6 — $T = -185^\circ$

Результаты измерения отношения интенсивностей $\alpha_1 = (I_3/I_{27})_{T_1}$ и $\alpha_2 = (I_3/I_{27})_{T_2}$, а также изменение отношения интенсивностей при переходе от комнатной температуры к температуре -185° , т. е. $\gamma = \alpha_1/\alpha_2$, приведены в табл. 2. Каждое из приведенных значений α является средней величиной из 16—24 измерений. На рис. 1 результаты представлены графически.

Произведенная оценка точности измерений показывает, что абсолютная ошибка при определении α_1 и α_2 не превышает $\pm 0,03$, а при определении γ она составляет $\pm 0,01—0,02$.

Влияние легирующих элементов на величины α можно понять, если учесть, что изменение интенсивности отражений за счет смещения атомов из узлов решетки определяется двумя факторами: 1) наличием статических искажений решетки, обусловленных различием в разме-

	Маркировка сплавов							
	1 Ni	2 Cr20	3 Cr30	4 Ti4	5 Ti8	6 Al3,5	7 —	8 α'
$\alpha_1 = (I_3/I_{27})_{T_1=23^\circ}$	4,26	4,32	4,45	4,27	4,24	4,14	4,68	4,28
$\alpha_2 = (I_3/I_{27})_{T_2=-185^\circ}$	3,21	3,61	3,82	3,43	3,74	3,46	4,14	4,08
$\gamma = \alpha_1/\alpha_2$	1,33	1,20	1,17	1,24	1,13	1,20	1,13	1,06
$(\overline{u_1^2} - \overline{u_2^2})_0^*$	0,0112	0,0073	0,0063	0,0085	0,0049	0,0072	0,0050	0,0020
Характеристич. т-ра θ в $^\circ\text{K}$	350	420	450	400	510	420	500	690
$(\sqrt{\overline{u^2_d}})_{T_1=23^\circ}$	0,135	0,115	0,107	0,119	0,096	0,115	0,097	0,074
$(\sqrt{\overline{u^2_d}})_{T_2=-185^\circ}$	0,085	0,076	0,071	0,077	0,067	0,076	0,067	0,056
$\sqrt{\overline{u^2_{ст}}}$	—	0,071	0,088	0,058	0,091	0,053	0,108	0,107

* Разность $(\overline{u_1^2} - \overline{u_2^2})_d$ в таблице определена непосредственно из измерения интенсивностей по формуле $\ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{4\pi^2}{a^2} (\Sigma' h^2 - \Sigma'' h^2) (\overline{u_1^2} - \overline{u_2^2})_d$. Точность в определении $(\overline{u_1^2} - \overline{u_2^2})$ составляет $\pm 0,0003-0,0004$.

рах и химической природе атомов, входящих в твердый раствор; 2) изменением динамических искажений (смещений атомов при тепловых колебаниях), вызванным изменением сил связи в решетке.

Съемка при двух температурах позволяет разделить действие обоих факторов, найти среднеквадратичные величины динамических $\sqrt{\overline{u^2_d}}$ и статических $\sqrt{\overline{u^2_{ст}}}$ смещений атомов (1,3,5). Полученные результаты

приведены в табл. 2. Измерения интенсивности линий для граней с Σh^2 , равной 3,8 и 27 (а для никеля и сплава 2 также еще 16 и 40), показали, что экстинкция для исследуемых образцов отсутствовала.

При определении статических искажений решетки нами учитывалось изменение интенсивности отражений твердых растворов вследствие изменения факторов атомного рассеяния и поглощения по сравнению с никелем.

На рис. 2 и 3 дано графическое изображение влияния легирующих элементов на динамические и статические искажения решетки. Из таблицы и рисунков видно, что введение в никель добавок хрома, титана и алюминия приводит к уменьшению средних квадратичных отклонений атомов от положений равновесия при тепловых колебаниях и к повышению характеристической температуры θ . Точность определения характеристической температуры в нашем случае со-

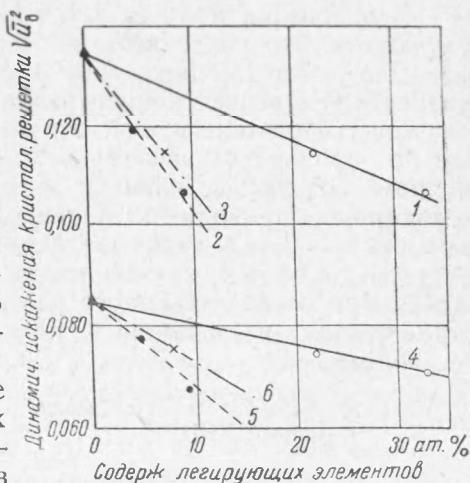


Рис. 2. Влияние легирующих элементов на величину среднего квадратичного отклонения атомов от положения равновесия при тепловых колебаниях. Обозначения те же, что на рис. 1

ставляет $\pm 20^\circ - \pm 30^\circ$. Статические искажения решетки растут с увеличением концентрации легирующих элементов. Титан вызывает наибольшие статические искажения решетки по сравнению с другими исследуемыми элементами. Совместное влияние хрома, титана и алюминия приводит к значительному повышению статических искажений решетки и понижению динамических искажений.

Приведенные в табл. 2 данные позволяют понять ход зависимости α_1 и α_2 от содержания легирующих элементов, представленный на рис. 1. В случае исследованных нами твердых растворов статический



Рис. 3. Зависимость статических искажений кристаллической решетки от содержания легирующих элементов. 1 — Сг, 2 — Ti, 3 — Al

и динамический факторы оказывают противоположное воздействие на величины α : статический фактор понижает отношение интенсивностей, а изменение динамического приводит к повышению отношения. При температуре -185° , когда динамические искажения невелики, основное изменение интенсивности обусловлено статическими искажениями. При комнатной температуре для твердых растворов никеля с титаном уменьшение динамических искажений компенсирует действие статических искажений, и поэтому отношение α при введении добавок титана не меняется по сравнению с никелем. В твер-

дом же растворе никеля с алюминием уменьшение динамических искажений оказывает большее воздействие на интенсивность отражений, чем статические искажения. Поэтому при комнатной температуре отношение интенсивностей для твердого раствора оказывается меньше, чем для никеля (прямая идет с наклоном вниз). На основании полученных в настоящей работе результатов можно заключить, что введение в никель добавок хрома, титана и алюминия приводит к повышению сил межатомных связей и тем в большей степени, чем выше концентрация этих элементов в исследованных пределах. При одинаковой атомной концентрации наибольшее повышение прочности связей вызывает титан, затем идут алюминий и хром. Совместное влияние трех указанных элементов (хрома, титана и алюминия) приводит к большему повышению прочности межатомных связей, чем в двойных твердых растворах. Наибольшая прочность межатомных связей наблюдается в решетке фазы, выделяющейся при распаде твердого раствора, содержащей большее количество титана и алюминия по сравнению с исходным твердым раствором.

Институт металловедения и физики
металлов ЦНИИЧМ

Поступило
23 VI 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. В. Курдюмов, В. А. Ильина, В. К. Крицкая, Л. И. Лысак, Изв. АН СССР, сер. физ., 17, № 3, 310 (1953).
- ² Г. В. Курдюмов, М. Д. Перкас, Проблемы металловедения и физики металлов, в. 2, 1953, стр. 153.
- ³ В. А. Ильина, В. К. Крицкая, Г. В. Курдюмов, Сборн. тр. Инст. металловед. и физ. металлов, в. 2, 222 (1951).
- ⁴ В. К. Крицкая, Г. В. Курдюмов, Т. И. Стеллецкая, ДАН, 98, № 1 (1954).
- ⁵ В. И. Иверонова, З. И. Кузьмина, Е. И. Фуртергендлер, Е. И. Детлаф, Изв. АН СССР, сер. физ., 15, 44 (1951).