

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

И. ДЕХТЯР

К ВОПРОСУ О ЖАРОПРОЧНОСТИ СПЛАВОВ

(Представлено академиком Н. Т. Гудцовым 15 II 1950)

В последнее время в литературе встречаются попытки найти физические принципы легирования жаропрочных сплавов. Так например, К. Осипов (1), исходя из анализа так называемых $N(E)$ -кривых для α - и γ -Fe, дает объяснение большей жаропрочности γ -твёрдых растворов, согласующееся с опытом. Его рассуждения сводятся к следующему.

Сравнивая $N(E)$ -кривые для α - и γ -Fe, можно заметить, что в определенном интервале энергий кривая для α -Fe идет выше кривой γ -Fe. При образовании твёрдых растворов из переходных элементов происходит обобщение $N(E)$ -кривых, причем результирующая кривая в основном сохраняет характер исходных $N(E)$ -кривых, свойственных либо α , либо γ -Fe, так как он определяется, главным образом, кристаллической симметрией и природой растворителя.

Если, например, сплавляемые элементы (добавка Ni к Fe) обладают γ -решёткой, то обобщенная $N(E)$ -кривая будет мало отличаться от $N(E)$ -кривых компонент, и при пластической деформации внешние условия не произведут существенных изменений в распределении и энергии электронов; связь сохранит преимущественно металлический характер.

Если же добавить к γ -Fe хром, у которого $N(E)$ -кривая близка к кривой для γ -Fe, то при сплавлении электроны будут локализоваться преимущественно вблизи атомов растворителя, что приведет к значительному усилению связи, которая в этом случае значительно отличается от металлической.

В тесной связи с этими выводами находятся данные, полученные нами по исследованию диффузии в некоторых сплавах и данные по самодиффузии (2-4).

Анализ этих данных (табл. 1) показывает, что с достаточной степенью точности можно считать, что энергия активации для самодиффузии E_a пропорциональна энергии связи E_{cb} , причем для металлов с координационным числом $z = 12$ этот коэффициент $k \approx 0,65$ (а для металлов с $z = 8$, $k \approx 0,85$). Расчет данных по исследованию диффузии в α -твёрдых растворах Cu-Zn, Ag-Cd и Ag-Zn показывает, что и в этом случае иммеет место такое же соотношение между E_a и E_{cb} .

Сопоставляя данные для энергии активации при самодиффузии и энергии активации для ползучести (5) при высоких температурах, замечаем, что в пределах ошибок опыта они совпадают (см. табл. 2).

На основании того что $E_a = kE_{cb}$, можно утверждать, что близкие значения энергий активации различных на первый взгляд процессов указывают не только на то, что механизмы этих процессов имеют, повидимому, одинаковый характер, но и на то, что энергию активации,

Таблица 1

Металл	E_a в ккал/г-ат	E_{cb} в ккал/г-ат	$k = \frac{E_a}{E_{cb}}$	Металл	E_a	E_{cb}	$k = \frac{E_a}{E_{cb}}$
Pb	27,65 ⁽²⁾	47,5	0,58	Cu	51,0 ⁽³⁾	81,2	0,62
Bi	29,95 ⁽²⁾	47,8	0,63	Ag	45,6 ⁽³⁾	68,0	0,68
Zn	17,28 ⁽³⁾	27,4	0,63	Al	37,5 ⁽³⁾	55,0	0,68
Au	51,0 ⁽²⁾	92,0	0,56	γ -Fe	48,0 ⁽⁴⁾	94,0	0,51
Au	62,9 ⁽³⁾	92,0	0,68	α -Fe	78,0 ⁽⁴⁾	94,0	0,83
Cu	57,2 ⁽²⁾	81,0	0,70				

Таблица 2

Металл (сплав)	Zn	Cd	Bi	Al	Cu	Fe	α -латунь
E_a (самодиффузия) в ккал/г-ат	17,6	17,8	30,0	37,5	57,2	78,2	41,7 ⁽²⁾
E_k (для ползучести) в ккал/г-ат	16,8	15,2	20,0	37,0	56,0	90,0	42,0

получаемую для диффузии, можно считать физическим критерием жаропрочности данного сплава.

Здесь же следует отметить, что жаропрочность обусловливается рядом других факторов, пока трудно учитываемых. С другой стороны, энергию активации, получаемую из данных по исследованию диффузии, можно качественно увязать с характером хода $N(E)$ кривых (распределения плотности состояний) для металлов (сплавов);

при этом всегда следует иметь в виду, что при одинаковом числе эл/ат. и одинаковом координационном числе для сравниваемых металлов (сплавов) большому значению $N_{\max}(E)$ соответствует меньшая энергия связи, и наоборот. Это можно иллюстрировать следующими примерами.

На рис. 1. представлены $N(E)$ -кривые для Ag и Cu, причем оказалось, что $N_m(E)_{Cu} < N_m(E)_{Ag}$ (в пределах первой зоны Бриллюэна), а $E(Cu) > E(Ag)$. В то же время и энергия активации для самодиффузии меди больше таковой для серебра (см. табл. 1).

Опыты показали⁽⁶⁾, что при диффузии Mo в α - и γ -Fe энергии активации в обоих случаях одинаковы и равны ~ 58500 ккал/г-ат, хотя коэффициенты диффузии сильно отличаются.

Механизм диффузии одинаков и для α - и для γ -твердого раствора. Но принимая во внимание, что $k_{\alpha} > k_{\gamma}$, получаем, что при равных значениях E_a энергия связи в γ -твердом растворе больше таковой для α -твердого раствора. Это согласуется с концепцией о резонансе $N(E)$ -кривых⁽¹⁾.

Опыты по диффузии Ni в γ -Fe⁽⁷⁾ и Cr в γ -Fe⁽⁸⁾ показали, что в первом случае $E_a = 67$ ккал/г-ат, а во втором случае $E_a = 112$ ккал/г-ат. Вблизи от высших занятых уровней плотность состояний на $N(E)$ -кри-

вой для γ -Fe меньше, чем для Ni; поэтому при добавке 8—9% Ni к γ -Fe плотность состояний несколько уменьшится и энергия связи γ -твердого раствора возрастет.

Учитывая, что в этом случае связи носят преимущественно металлический характер и принимая $k \approx 0,65$, получаем для энергии связи сплава величину ~ 100 ккал/г-ат — большую, чем для энергии связи железа ($E_{cb} = 94$ ккал/г-ат (см. табл. 1)).

Совершенно другая картина получается при диффузии хрома ($z=8$) в γ -Fe. Хром имеет $N(E)$ -кривую, близкую к таковой для α -Fe. Добавка Cr ($\sim 8\%$) к γ -Fe дает незначительный резонанс, электроны при этом мало обобщаются, что создает большую неравномерность в распределении электронов, а это выразится в том, что энергия связи γ -твердого раствора значительно возрастает, а следовательно, возрастает и энергия активации при диффузии. Это подтверждается опытом ⁽⁸⁾.

Вполне очевидно значение данных, получаемых из исследования диффузии в сплавах для выяснения механизма ползучести.

Исследование процесса самодиффузии и диффузии в сплавах ⁽⁹⁾ показывает, что наиболее вероятным механизмом здесь является замещение диффундирующими атомами вакантных мест в решетке. Если это так, то (принимая во внимание факт приблизительного равенства энергии активации при диффузии и ползучести) при объяснении механизма ползучести следует учесть роль таких вакантных мест. Их количество зависит от температуры.

Скорость процесса ползучести будет, очевидно, зависеть как от скорости образования вакансий, характера их распределения, так и скорости заполнения их соседними атомами. Учет этих факторов позволит выяснить механизм процесса.

Лаборатория металлофизики
Академии наук УССР
Киев

Поступило
8 XII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. Осипов, ДАН, **60**, 1535 (1948). ² Р. Бэррер, Диффузия в твердых телах, 1948. ³ W. A. Johnson, Metals Technology, Т. Р., 1272 (1941). ⁴ С. Витченал and R. Mehl, Mining and Metallurgy, ноябрь, 555 (1947). ⁵ Ф. Зейтц, Физика металлов, 1947; J. Kantor, ASM Handbook (1939). ⁶ J. Ham, Trans. Am. Soc. Met., **35** 331 (1945). ⁷ C. Wells and R. Mehl, Met. Technology, Т. Р., 1281, 1282 (1940). ⁸ С. Герцикен, И. Дехтар и Л. Кумок, Доповіді АН УРСР, № 2 (1949). ⁹ Я. И. Френкель, Введение в теорию металлов, 1948; С. Герцикен и И. Дехтар, Доповіді АН УРСР, № 5 (1949).