

К. А. ОСИПОВ

## ОСНОВНЫЕ НАЧАЛА ЛЕГИРОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

(Представлено академиком Г. Г. Уразовым 17 IV 1948)

Теории легирования жаропрочных сплавов до настоящего времени еще не создано, хотя значительный вклад в ее развитие и сделан за последние годы акад. А. А. Бочваром и его школой. Мы делаем здесь попытку дать качественное объяснение основным из наблюдаемых фактов и, хотя бы частично, указать на основные начала легирования жаропрочных сплавов.

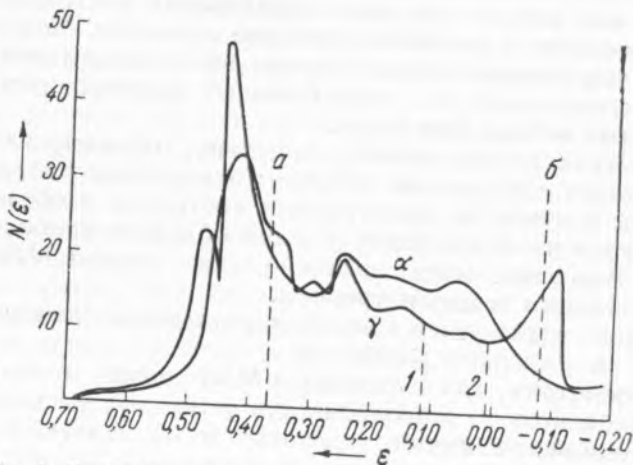


Рис. 1. Плотности электронных состояний в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железе.  $\epsilon$  — энергия электронов в единицах Ридберга,  $N(\epsilon)$  — плотность состояний

Будем рассматривать однородные твердые растворы с объемно-центрированной кубической решеткой  $\alpha$  и гранецентрированной кубической решеткой  $\gamma$ . Относительно жаропрочности этих растворов выработался общий взгляд. В основу наших рассуждений положим кривые плотности электронных состояний  $N(\epsilon)$ , характерные для каждого из компонентов. Этим кривым отводится значительная роль в теории металлов.

На рис. 1 приведены  $N(\epsilon)$ -кривые для  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железа, которые теоретически рассчитали Грин и Маннинг<sup>(1)</sup>. Кривые пригодны также для многих переходных металлов с аналогичными железу кристалли-

ческими структурами. При изменении общего числа валентных электронов на атом, как это будет происходить при переходе от титана к никелю, высшие занятые уровни для обеих решеток находятся в интервале энергий от  $a$  до  $b$ . Для абсолютного нуля температур и вблизи температур плавления границы интервала будут мало отличаться.

Анализируя эти кривые, можно объяснить как большую жаропрочность  $\gamma$ -твердых растворов сравнительно с жаропрочностью твердых растворов  $\alpha$ , так и понять, а также предугадать влияние на нее ряда компонентов.

При образовании твердых растворов с аналогичными  $\alpha$ - или  $\gamma$ -железу решетками будет происходить резонанс или наложение  $N(\epsilon)$ -кривых, свойственных каждому из компонентов. В результате получится обобщенная  $N(\epsilon)$ -кривая, отличная от  $N(\epsilon)$ -кривых исходных компонентов. Но общий характер этой новой кривой для твердого раствора будет близок к  $N(\epsilon)$ -кривым  $\alpha$ - или  $\gamma$ -железа, представленным на рис. 1, так как он определяется в основном симметрией кристаллической решетки и так как наибольший вклад в общую  $N(\epsilon)$ -кривую будет сделан компонентом-растворителем.

$N(\epsilon)$ -кривые для  $\alpha$ - и  $\gamma$ -решеток, в соответствии с рис. 1, по своей форме имеют много общего. Но в значительной части интервала энергий  $ab$  плотность электронных состояний при одинаковой энергии электронов в  $\gamma$ -решетке значительно меньше, чем в  $\alpha$ -решетке. Этим мы и объясняем большую жаропрочность  $\gamma$ -решеток. Действительно, при пластической деформации под влиянием внешних усилий электронный газ должен изменять свою энергию и свое распределение в кристаллической решетке. Вероятность перераспределения будет тем меньше, чем меньше имеется разрешенных состояний для электронов по соседству с высшими занятыми уровнями. Чем меньше эта вероятность, тем большее сопротивление действующим усилиям будет оказывать электронный газ, тем большей жаропрочностью должен обладать чистый металл или сплав.

В соответствии с этим можно, вероятно, сформировать один из общих принципов следующим образом: однородный твердый раствор с наименьшей плотностью электронных состояний в области высших занятых уровней на  $N(\epsilon)$ -кривой должен обладать наибольшей жаропрочностью. Вероятно, имеет значение также наклон  $N(\epsilon)$ -кривой по соседству с высшим занятым уровнем.

Этот принцип согласуется с экспериментальными данными по жаропрочности  $\alpha$ - и  $\gamma$ -твердых растворов.

Теперь посмотрим, как с помощью  $N(\epsilon)$ -кривых можно объяснить влияние компонентов на жаропрочность  $\gamma$ -твердых растворов.

Пусть компоненты имеют  $\gamma$ -решетку и их  $N(\epsilon)$ -кривые соответствуют  $N(\epsilon)$ -кривой для  $\gamma$ -железа, приведенной на рис. 1. В этом случае все компоненты будут вносить равный вклад в общую  $N(\epsilon)$ -кривую для раствора, и она не будет сильно отличаться от  $N(\epsilon)$ -кривых компонентов. Существенных изменений в распределении и энергии электронов не произойдет. Электроны не должны быть локализованы преимущественно вблизи атомов какого-нибудь одного компонента. В связи с этим естественно ожидать, что при образовании твердого раствора сопротивляемость электронного газа внешним усилиям существенно не изменится.

В общем виде этот вывод можно сформулировать так. Компоненты, имеющие при высоких температурах гранцентрированную кубическую решетку и распределение электронных состояний, близкое к распределению в  $\gamma$ -железе, будут мало изменять жаропрочность  $\gamma$ -твердого раствора на железной основе. Вероятно, это будет справедливо для любого  $\gamma$ -твердого раствора и любых компонентов с

$\gamma$ -решеткой. Для  $\gamma$ -железа, например, высший занятый уровень при абсолютном нуле температуры соответствует состоянию 1 на рис. 1; соответствующее состояние для никеля с той же решеткой совпадает с б. Эти состояния мало изменяются и при температурах, близких к точкам плавления.

По соседству с высшими занятыми уровнями плотность состояний в  $\gamma$ -железе меньше, чем в никеле. Поэтому  $\gamma$ -железо должно оказывать большее сопротивление деформированию, чем никель. При образовании твердых растворов  $\gamma$ -железа с никелем высшие занятые уровни будут непрерывно перемещаться от состояния 1 к состоянию б. Примерно до 50% никеля (состояние 2) плотность электронных состояний очень мало изменяется. Соответственно этому не следует ожидать существенного влияния никеля на сопротивляемость сплавов деформированию; при большем содержании никеля надо ожидать уменьшения этой сопротивляемости.

Иное влияние на жаропрочность твердого раствора будут оказывать компоненты с  $\alpha$ -решеткой, плотности электронных состояний в которых аналогичны показанному на рис. 1 распределению плотностей в  $\alpha$  железе. Плотность электронных состояний в решетке таких компонентов значительно больше, чем в  $\gamma$ -решетке. Поэтому при образовании  $\gamma$ -твердого раствора  $N(\epsilon)$ -кривые  $\alpha$ - и  $\gamma$ -решеток дадут незначительный резонанс, электроны будут мало делокализованы; резко будет выражена неравномерность в распределении электронов; вблизи атомов таких компонентов химическая связь будет значительно отклоняться от металлической связи. Произойдет как бы естественное упрочнение решетки за счет неравномерного распределения электронов и, в крайнем случае, за счет сосуществования разных типов химической связи в ней. Для таких растворов естественно ожидать высокой жаропрочности. Это подтверждается экспериментальными данными. Хром, например, резко повышает жаропрочность двойного, тройного и четверного  $\gamma$ -твердых растворов.

Можно поэтому сделать общее утверждение в следующем виде. Компоненты, имеющие при высоких температурах объемноцентрированную кубическую решетку с плотностью электронных состояний, резко отличной от плотности состояний в решетке  $\gamma$ -железа, будут создавать в  $\gamma$ -твердом растворе неравномерное распределение электронов и значительно повышать его жаропрочность. Жаропрочность будет тем выше, чем больше концентрация такого компонента в  $\gamma$ -твердом растворе. Надо полагать, что этот вывод будет справедлив и по отношению к компонентам с любой другой кристаллической решеткой, если распределение электронных состояний в них резко отличается от распределения в  $\gamma$ -решетке.

В тесной связи с последним выводом можно высказать следующие дополнительные соображения. Известно, что химические соединения (интерметаллические фазы) чаще всего образуются металлами с разными кристаллическими решетками и далеко отстоящими в периодической системе элементов. Несомненно, что распределение электронов в решетках таких металлов также резко отличается (для многих металлов это доказано). При вхождении таких компонентов в  $\gamma$ -твердый раствор они будут усиливать неравномерность в распределении электронов и способствовать возникновению в нем направленных химических связей. В результате жаропрочность твердого раствора должна возрастать. Можно, следовательно, ожидать повышения жаропрочности  $\gamma$ -твердого раствора при одновременном легировании его несколькими компонентами, образующими между собой химические соединения.

Этот принцип легирования может быть полезным при изыскании новых жаропрочных сплавов, так как имеется значительно больше

данных относительно способности многих металлов давать химические соединения, чем относительно их  $N(\epsilon)$ -кривых.

Институт общей и неорганической химии  
им. Н. С. Курнакова  
Академии Наук СССР

Поступило  
10 IV 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> J. B. Green and M. F. Manning, Phys. Rev., **63**, Nos. 5, 6 (1943).