

И. И. КОРНИЛОВ

К ВОПРОСУ О СВЯЗИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ И ЖАРОПРОЧНОСТИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

(Представлено академиком А. А. Бочваром 25 XI 1970)

Исследование открытого в 1945 г. А.А. Бочваром и З. А. Свицерской явления сверхпластичности ⁽¹⁾ сплавов двойной системы цинк — алюминий получило широкое развитие. Эти исследования велись в направлениях разработки теории сверхпластичности, дальнейшего накопления экспериментальных материалов, возможного использования этого свойства для обработки металлов при малых усилиях и получения изделий методом глубокой вытяжки. Обзор работ по сверхпластичности (до 1968 г.) приведен в ^(2, 3).

Доказано, что сверхпластичность при определенных условиях проявляется в металлах и сплавах с полиморфными превращениями, в сплавах с тонкой структурой, в сплавах, по составу близких к эвтектическим (или эвтектоидным) и, наконец, в сплавах, образующих упорядоченные фазы.

По мнению авторов ^(2, 3), сверхпластичность может иметь место: а) при температурах от 0,3 до 0,7 $T_{пл}$, б) при наличии мелкой (порядка нескольких микрон) и равноосной структуры фаз ^(2, 4) и в) при наличии растворно-осадительных процессов, связанных со взаимной растворимостью компонентов ^(5, 6). Последнее условие, как отмечается в ⁽²⁾, тесно связано с твердофазными реакциями между компонентами в сплавах, что приводит к явлениям массопереноса. Эти реакции между фазами, связанные с массовыми перемещениями атомов, обусловлены характером диаграммы состояния и переменной растворимостью компонентов в системе.

Во вступительной части доклада о сверхпластичности ⁽²⁾ отмечалось, что сверхпластичный материал является антиподом жаропрочного материала или сверхжаропрочного сплава (superheat resistant superalloy).

В результате многолетних исследований жаропрочности металлических систем нами было установлено, что в системах с ограниченной растворимостью компонентов на диаграммах состав — жаропрочность имеются составы сплавов как с максимальной жаропрочностью, так и с максимальной пластичностью — сверхпластичностью ⁽⁷⁾. Исходя из установившегося понимания термина сверхпластичности, мы считаем возможным для противоположного ей свойства ввести термин «максимальная для данной системы жаропрочность». Составы подобных сплавов на диаграмме состав — жаропрочность в большинстве случаев располагаются вблизи границы предельной растворимости, а сверхпластичные сплавы непосредственно следуют за областью составов сплавов, обладающих максимумом жаропрочности.

В результате уточнения некоторых вопросов было выяснено, что максимальные значения пластичности и сверхпластичности связаны с растворно-осадительным механизмом разупрочнения сплавов ^(5, 6), а максимумы жаропрочности обусловлены действием растворно-дисперсионного механизма упрочнения сплавов ^(7, 8). Установленные нами закономерности

изменения жаропрочности металлических систем в зависимости от состава сплавов, строения фаз и температуры легли в основу высказанных нами взглядов по физико-химической теории жаропрочности сплавов (⁷), стр. 475—496). Эти закономерности нашли подтверждение на многих примерах экспериментально изученных сплавов двойных, тройных и более сложных металлических систем на основе алюминия, железа, никеля, титана и других металлов (⁷⁻⁹).

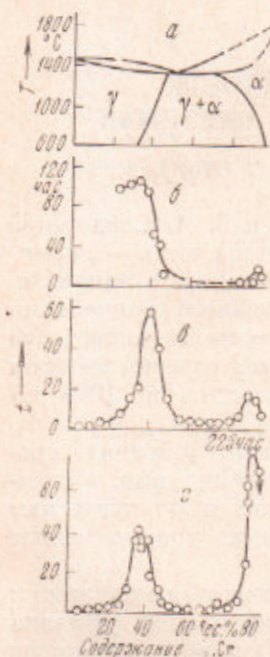


Рис. 1

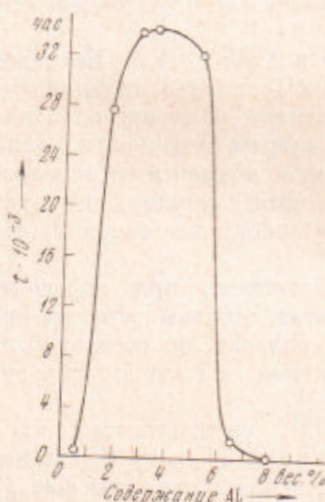


Рис. 2

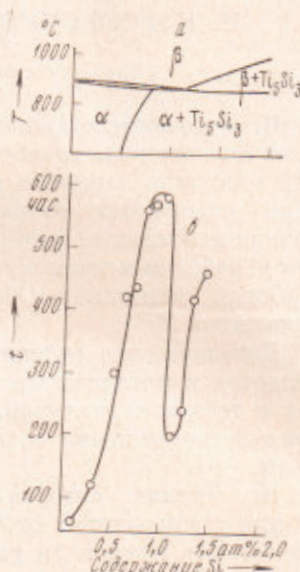


Рис. 3

Рис. 1. Диаграмма состояния (а) и состав — жаропрочность (б—г) сплавов системы Ni—Cr. t — время достижения стрелы изгиба 5 мм при: б — 1200°C и $\sigma = 0,25 \text{ кг/мм}^2$, в — 1000° и $\sigma = 2,7 \text{ кг/мм}^2$, г — 800° и $\sigma = 12,3 \text{ кг/мм}^2$.

Рис. 2. Диаграмма состав — жаропрочность сплавов пятикомпонентной системы Ni—Cr—W—Ti—Al. Составы сплавов: Ni—основа, Cr—20%, W—6%, Ti—1,5% при содержании алюминия от 0 до 8%. Испытание методом изгиба при 900° и $\sigma = 6 \text{ кг/мм}^2$ в течение 35 000 час. t — время достижения стрелы изгиба 30 мм.

Рис. 3. Диаграмма состояния и состав — жаропрочность двойной системы Ti—Si. Испытание методом изгиба при 400° и $\sigma = 20 \text{ кг/мм}^2$ в течение более 600 час.

Для иллюстрации на рис. 1 приводятся экстремальные значения жаропрочности и пластичности на диаграммах состав — жаропрочность* системы Ni—Cr (⁷). При всех изученных температурах 1200, 1000 и 800° имеются максимумы жаропрочности на составах, расположенных вблизи границы растворимости, и сопутствующие им минимумы в области составов сплавов с эвтектической структурой. Времена достижения стрелы изгиба 5 мм при этих изотермах различаются в 15—40 раз.

Наибольший эффект этого различия выявляется в сплавах многокомпонентной системы Ni—Cr—W—Ti—Al с переменным содержанием алюминия (рис. 2). Время достижения стрелы изгиба 30 мм при 900° и $\sigma = 6 \text{ кг/мм}^2$ сплавов этой системы в области максимальной жаропрочности для сплавов с 3—5% Al составляет около 35 000 час., а для сплавов

* Значения жаропрочности на диаграммах состав — жаропрочность нами выражены временем достижения заданной стрелы изгиба при деформации сплавов на изгиб центробежным методом (⁷).

с 6—8% Al — всего несколько десятков час. (рис. 2). Многие другие примеры аналогичного типа описаны в работах (7-9).

За последнее время нами установлены закономерности изменения жаропрочности и пластичности в двойных и более сложных системах на основе ограниченных твердых растворов α -Ti (10-13). В качестве примера на рис. 3 приведена система Ti—Si (10). Она характеризуется ограниченной растворимостью кремния в α - и β -Ti, образованием силицида титана Ti_5Si_3 и эвтектоидным превращением (рис. 3а). Как и в предыдущих случаях, на диаграмме состав — жаропрочность за областью сплавов с максимальной жаропрочностью имеет место резкое ее снижение (рис. 3б). Составы сплавов с высокой пластичностью почти соответствуют эвтектоидному составу. Однако характер диаграммы состав — жаропрочность этой системы несколько отличается от системы Ni—Cr, вследствие наличия в системе Ti—Si силицида титана и отсутствия интерметаллида в системе Ni—Cr. В системе Ti—Si за областью снижения жаропрочности (рис. 3) имеет место дальнейшее ее повышение. Оно связано с влиянием возрастающего содержания в структуре сплавов тугоплавкого силицида титана. Такого рода закономерности нами установлены на других титановых системах: Ti—Cu (11), Ti—V—Nb (12), Ti—Al—Nb (13) и других.

Не приводя других диаграмм состав — жаропрочность с областями максимальных жаропрочности и пластичности изученных нами двойных, тройных и более сложных систем, ограничимся сводкой некоторых данных (табл. 1). В ней приведены изученные системы, условия испытания на жаропрочность, составы сплавов с максимальным и минимальным временем достижения заданной стрелы изгиба и различие этого времени для двух областей составов сплавов.

Как видно из табл. 1, время достижения заданной стрелы изгиба для сплавов с максимальной и минимальной жаропрочностью различается от нескольких единиц до тысячи раз. Это различие особенно возрастает по мере перехода от простых к сложным многокомпонентным сплавам, где, как мы отмечали выше, наблюдается значительное повышение жаропрочности (9).

Таблица 1

Сравнительная жаропрочность и пластичность сплавов в простых и многокомпонентных металлических системах (12)

Системы	T, °C	$\sigma_{0.2}$, кг/мм ²	Составы сплавов (вес.%) с максимальными жаропрочностью (I) и пластичностью (II)				
			I	t, час.	II	t, час.	различие (I/t II)
Ni—Cr	1000	2,7	37—43 Cr	60	55—65 Cr	3—4	15—20
	800	12,3	35—40 Cr	40	50—60 Cr	1—2	20—40
Ti—Si	400	20	0,8—1,0 Si	600	1,1—1,3 Si	200	3
Ti—Cu	400	20	1,0—1,5 Cu	>1500	2—2,5 Cu	300	>5
Ti—V—Nb	500—600	20—15	3—4 Nb + V	140	20—30 Nb + V		
			V : Nb = 1 : 3		V : Nb = 1 : 3	1	~140
Ni—Cr—Ti	800	6,4	20 Cr		20 Cr		
			5,5—6,5 Ti	420	9—10 Ti	1	~400
Ni—Cr—Ti—Al	900	8,0	17 Cr	620	17 Cr	1	~620
			1,8 Ti		1,8 Ti		
			5,5—6,2 Al		8,5—9,5 Al		
Ni—Cr—W—Ti—Al	800	30	20 Cr, 6 W		20 Cr, 6 W		
			4,5 Al	540	4,5 Al	1	~540
			2—2,5 Ti		4,5—5,5 Ti		
Ni—Cr—W—Ti—Al	900	6	20 Cr, 6 W		20 Cr, 6 W		
			1,5 Ti	900	1,5 Ti	2	~4500
			5—6 Al		7—8 Al		

Хотя полученные данные не могут служить количественными характеристиками высокой жаропрочности и высокой пластичности сплавов, они качественно характеризуют несомненную связь между этими двумя взаимно противоположными свойствами. В одних и тех же металлических системах с ограниченной растворимостью составы сплавов с максимальной жаропрочностью сопутствуют сплавам с максимальной пластичностью. Следовательно, эти два экстремальные свойства могут рассматриваться совместно с учетом влияния состава, структуры, размеров и форм зерна, взаимодействия фаз в системе во времени и явления массопереноса при твердофазных реакциях. Важную роль в изучении этих явлений играют растворно-осадительный механизм разупрочнения и растворно-дисперсионный механизм упрочнения металлических сплавов.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
18 XI 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. А. Бочвар, З. А. Сви́дерская, Изв. АН СССР, ОТН, № 9, 321 (1945).
- ² А. А. Бочвар, Сверхпластичность металлов и сплавов. Доклад в Инст. металлургии АН СССР, апрель, 1969. ³ А. А. Пресняков, Сверхпластичность металлов и сплавов, 1969. ⁴ A. Ball, M. Hutchison, Metal Science J., 3, № 1, 1 (1969).
- ⁵ А. А. Бочвар, Изв. АН СССР, ОТН, № 5, 649 (1948). ⁶ А. А. Бочвар, Изв. АН СССР, ОТН, № 1, 136 (1957). ⁷ И. И. Корнилов, Физико-химические основы жаропрочности сплавов, Изд. АН СССР, 1961, стр. 475. ⁸ И. И. Корнилов, Свойства и применение жаропрочных сплавов, Сборн. докл., «Наука», 1966, стр. 3. ⁹ Л. А. Рябцев, И. И. Корнилов, Л. И. Прихина, Структура и свойства жаропрочных материалов. Сборн. докл., «Наука», 1967, стр. 143. ¹⁰ Н. А. Зуйкова, Т. Т. Нартова, ДАН, 185, № 3, 633 (1969). ¹¹ Н. А. Зуйкова, И. И. Корнилов, Т. Т. Нартова, Металловед. и термообработка металлов, № 5, 53 (1970). ¹² В. С. Власов, И. И. Корнилов, Изв. АН СССР, ОТН, № 4, 31 (1958). ¹³ О. Н. Андреев, Металлы, № 1, 193 (1970).