

Р. С. МИНЦ, В. М. ТОРОПОВ

СПЛАВ Ni_3Al , УПРОЧНЕННЫЙ СОЕДИНЕНИЕМ Ni_3Nb

(Представлено академиком С. Т. Кишкиным 6 VII 1970)

В работе ⁽¹⁾ были представлены изотермические разрезы сечений (2 и 5 вес. % Мо) фазовой диаграммы четверной системы $Ni - Al - Nb - Mo$ в области богатых никелем сплавов (до 15% Nb и 13% Al). Установлены границы существования (и их температурная зависимость) областей четверных твердых растворов на основе Ni (γ), соединения Ni_3Al (γ') и двухфазной области ($\gamma + \gamma'$). Показано, что γ - и γ' -фазы находятся в двухфазных равновесиях с δ -твердым раствором на основе соединения Ni_3Nb . При увеличении содержания молибдена до 5% области распространения γ - и γ' -твердых растворов в системе $Ni - Al - Nb - Mo$ уменьшаются. Область Ni_3Al граничит с двухфазными областями: ($\gamma' + \gamma$), ($\gamma' + \delta$) и ($\gamma' + \beta$). С понижением температуры от 1200 до 800°С область γ уменьшается, а область γ' практически не изменяется.

В данной работе в результате построения диаграмм состав — жаропрочность установлена высокотемпературная прочность легированного ниобием и молибденом сплава Ni_3Al , упрочненного соединением Ni_3Nb . Материалы и метод приготовления сплавов и образцов описаны в работе ⁽¹⁾.

Испытания относительноной высокотемпературной прочности сплавов проводили методом центробежного изгиба на машине КП ⁽²⁾. Образцами служили стержни, диаметром 4 мм и длиной 55 мм. Термическая обработка образцов перед испытанием — гомогенизирующий отжиг (в вакуумированных кварцевых ампулах) при 1100° в течение 10 час. с охлаждением на воздухе. После термической обработки стержни шлифовали до заданного размера. Испытания проводили при 800—900° и напряжении 25—30 кГ/мм². В течение первых 100 час. испытания проводили при 800° и напряжении 25 кГ/мм² с периодическим измерением стрелы изгиба образцов через каждые 10—20 час. Затем температуру опыта увеличивали до 900°, а напряжение до 30 кГ/мм² и продолжали испытание до момента достижения каждым образцом заданной стрелы изгиба. За характеристику высокотемпературной прочности принимали время достижения образцами стрелы изгиба 2,5; 5,0 и 7,5 мм.

На рис. 1 представлены диаграммы состав — высокотемпературная прочность сплавов системы $Ni - Al - Nb - Mo$ по разрезам с постоянным содержанием молибдена и ниобия и переменным содержанием алюминия. Здесь же над рисунками для удобства обсуждения результатов схематически показано фазовое состояние сплавов перед испытанием. Как следует из рис. 1, *Ia* сплавы с 2% Мо и 5% Nb при содержании до 3% Al в условиях данного эксперимента показывают низкую прочность. При температуре 800° и напряжении 25 кГ/мм² за 4—5 час. испытания они изгибаются на угол 70—80°. Микроструктура этих сплавов (рис. 2а) представляет крупные полиэдры четверного (Ni, Al, Nb, Mo) γ -твердого раствора с тонкими прямолинейными границами. Все сплавы, расположенные в γ -области системы $Ni - Al - Nb - Mo$, при температуре 800° и напряжении 25 кГ/мм² весьма пластичны и сравнительно мало жаропрочны. По мере увеличения концентрации молибдена и ниобия в γ -твердом растворе время достижения образцами критического изгиба, при котором испытание прекращается, лишь незначительно увеличивается. Несколько бо́льшую жаропрочность показывают сплавы из двухфазной области $\gamma + \delta$ (рис. 1, *Iв*). Микроструктура этих сплавов (рис. 2б) состоит из γ -твердого раствора и двух видов выделений δ -фазы: грубых, криволинейно очерченных включений непра-

вильной формы и равномерно распределенных игл или тонких пластин, выделяющихся в процессе испытания (рис. 2 см. вкл. к стр. 877).

Заметную высокотемпературную прочность сплавы системы Ni — Al — Nb — Mo, расположенные в γ -области, приобретают только с появлением в микроструктуре второй фазы — γ' . При этом по мере увеличения содержания γ' -фазы высокотемпературная прочность сплавов возрастает, достигает максимума (120—200 час.), после которого она становится или чрезвычайно малой (рис. 1, Ia), или претерпевает более или менее значи-

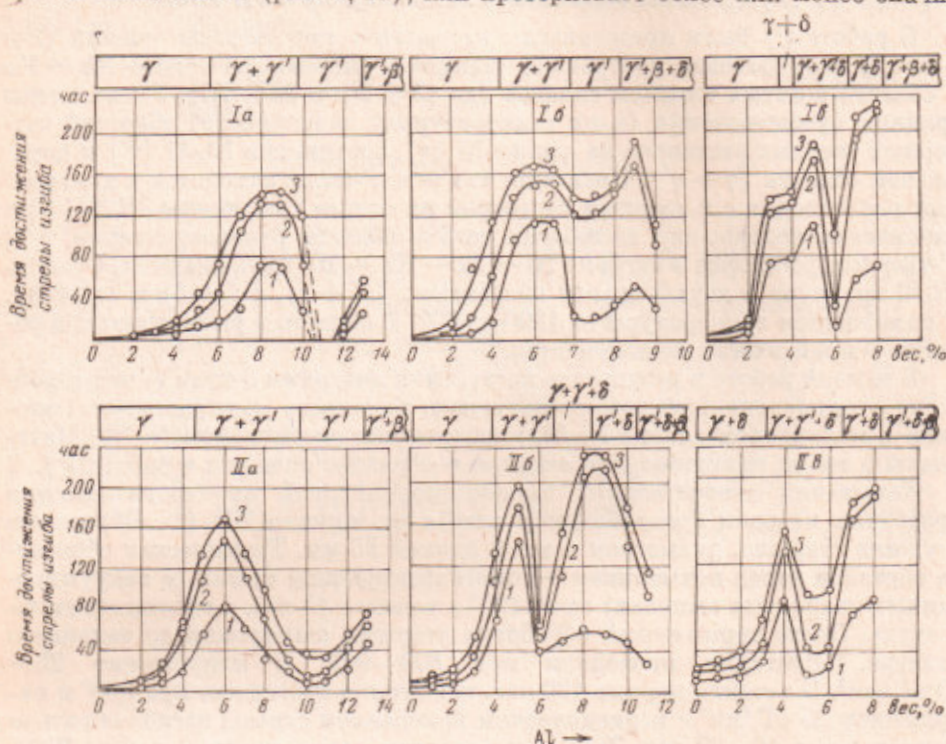


Рис. 1. Зависимость высокотемпературной прочности от содержания Al в сплавах с постоянным содержанием 2% Mo и 5, 10, 15% Nb (I) и 5% Mo и 5, 10, 15% Nb (II). Разрез при 5% Nb (a), при 10% Nb (б) и 15% Nb (в). Время достижения стрелы изгиба 2,5 мм (1), 5 мм (2) и 7,5 мм (3)

тельное снижение. Вслед за этим кривая высокотемпературной прочности вновь круто поднимается и образует второй максимум, величина которого в некоторых случаях больше первого. Так, например, если для сплавов с 5% Mo и 10% Nb первый максимум был достигнут за 200 час. испытания, то второй — за 230 час. (рис. 1, IIб). Кроме того, что, по всей вероятности, имеет немаловажное значение, второй максимум более пологий. После достижения второго максимума высокотемпературная прочность сплавов вновь резко уменьшается (от 230 час. до 80—100 час.).

Первый максимум на кривых состав — свойство, на которых показана зависимость жаропрочности сплавов от содержания алюминия при постоянных содержаниях ниобия и молибдена, соответствует сплавам, микроструктура которых состоит из двух фаз: γ - и γ' - при одинаковом содержании обеих фаз или количественном преобладании γ' -фазы, или из трех фаз: γ , γ' и δ . Микроструктура наиболее прочных при высокой температуре сплавов во всех случаях — крупнозернистая с мелкодисперсными, равномерно распределенными выделениями γ' - или $(\gamma' + \delta)$ -фаз (рис. 2а, г). Следует заметить, что среди сплавов, соответствующих наибольшему показателю высокотемпературной прочности, имеются сплавы с эвтектическим характером расположения фаз.

Второй максимум кривых состав — высокотемпературная прочность сплавов отвечает двухфазной области ($\gamma' + \delta$). Микроструктура этих сплавов (рис. 2б) содержит выделения δ -фазы в виде криволинейно очерченных частиц разнообразной формы. Эти сплавы отличаются наибольшей высокотемпературной прочностью.

Для полной характеристики поведения богатых никелем сплавов системы Ni — Al — Nb — Mo — при испытании высокотемпературной прочностью следует упомянуть о сплавах из двухфазной области ($\gamma' + \beta$), которые проявляют некоторую жаропрочность, но вместе с тем они настолько хрупки, что их высокотемпературные свойства вряд ли могут иметь практическое значение. Микроструктура этих сплавов (рис. 2е) представляет γ' -твердый раствор в виде мелких зерен, по границам которых расположены выделения β -фазы (твердый раствор на основе соединения NiAl). Как известно, собственно β -фаза характеризуется повышенной хрупкостью.

В условиях настоящих испытаний нежаропрочными оказались сплавы, представляющие чистый γ -твердый раствор (рис. 2ж), с присущими этой фазе особенностями: криволинейностью границ полиэдров, наличием сети волнистых линий, которые идут преимущественно от границ зерен, и разнотернистостью. Малолегированные сплавы из γ' -области также не отличаются жаропрочностью. При увеличении концентрации ниобия и молибдена в γ' -твердом растворе появляется некоторая жаропрочность, однако, возможно из-за недостатка пластичности, сплавы разрушаются, не достигнув значительного изгиба. В тех случаях, когда в γ' -твердом растворе наблюдается выделение β -фазы в виде мелких рассеянных включений (рис. 2з), сплавы оказываются жаропрочными. Исключительно хрупки сплавы, расположенные в трехфазной области, где одновременно присутствуют γ' -, δ - и β -фазы (рис. 2и).

Анализ результатов исследования высокотемпературной прочности богатых никелем сплавов системы Ni — Al — Nb — Mo показывает, что высокотемпературная прочность этих сплавов зависит от фазового состава, формы выделения и степени дисперсности избыточных фаз. Никелевые твердые растворы, даже сильно легированные, обладают незначительной жаропрочностью. Только присутствие в структуре сплавов мелкодисперсных выделений γ' -фазы сообщает γ -твердым растворам значительную высокотемпературную прочность. При этом высокотемпературная прочность сплавов тем выше, чем более мелкодисперсны и равномерно распределены выделения γ' -фазы. Наличие в γ -твердом растворе выделений δ -фазы в меньшей степени повышает высокотемпературную прочность сплавов. При одновременном присутствии γ' - и δ -фаз сплавы становятся весьма прочными при высокой температуре и одновременно сохраняют пластичность. Среди богатых никелем сплавов системы Ni — Al — Nb — Mo наибольшей высокотемпературной прочностью обладают крупнозернистые сплавы, имеющие микроструктуру γ' -твердого раствора с выделениями δ -фазы.

Высокотемпературная прочность сплавов на основе γ' -фазы, упрочненных выделениями δ -фазы, впервые была установлена в работе ⁽³⁾ при изучении сплавов системы Ni₃Al — Ni₃Nb. В этой работе было отмечено, что сплавы наряду с прочностью обладают хрупкостью. Введение молибдена в тройные сплавы никеля, алюминия и ниобия сообщило сплавам, расположенным в ($\gamma' + \delta$)-области, высокотемпературную прочность и пластичность.

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

Поступило
1 VII 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Р. С. Минц, В. М. Торопов, ДАН, 189, № 1, 130 (1969). ² И. И. Корнилов, Физико-химические основы жаропрочности сплавов, Изд. АН СССР, 1961.
³ Р. С. Минц, Г. Х. Беляева, Ю. С. Малков, Изв. АН СССР, Металлургия и горное дело, № 4, 151 (1963).