

Многокомпонентные жаропрочные сплавы с ниобием

Н. П. Бродниковский, А. С. Кулаков, Н. А. Крапивка,
Д. Н. Бродниковский, А. В. Самелюк, С. А. Фирстов

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: nbrodnik@gmail.com

Исследована зеренная структура, фазовый состав и механические свойства многокомпонентных жаропрочных сплавов состава Nb—16Cr—16Al—16Ti—16Me—4Si (% (ат.)), где Me — Mo или Zr. Показано, что в сплаве Nb—16Cr—16Ti—16Mo—16Al—4Si образуется более 90% (об.) ОЦК твердого раствора на основе Nb. Хром и кремний, имеющие атомные радиусы значительно меньшие, чем у остальных составляющих сплава, формируют свои фазы, которые в сумме составляют до 10% (об.). Введение Zr вместо Mo приводит к значительному изменению соотношения количества и состава образующихся в сплаве фаз, а также его механических свойств. Увеличение несоответствия атомных радиусов компонентов при введении циркония затрудняет получение однофазного ОЦК сплава. Помимо высокой энтропии смешения, на формирование фаз в многокомпонентном сплаве большое влияние оказывает соотношение атомных радиусов компонентов сплава.

Ключевые слова: ниобиевые сплавы, жаропрочность, фазовый состав, структура.

Введение

Модернизация газового привода крыла ракеты потребовала повышения рабочих характеристик материала для изготовления деталей. Моделирование условий работы рабочего тела газового привода показало, что необходим материал с плотностью меньше 7 г/см^3 и пределом текучести при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ не менее 500 МПа.

Перспективными жаропрочными материалами для получения необходимых характеристик являются сплавы на основе ниобия, которые активно разрабатываются со второй половины прошлого века [1, 2]. Ниобий имеет минимальную плотность среди металлов, чья температура плавления выше $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Создание сплавов начиналось с использования твердорастворного упрочнения ниобия тугоплавкими металлами и дисперсионного упрочнения карбидами, боридами и интерметаллидами [3, 4]. Такие сплавы обладают высокой жаропрочностью, однако плотность у них выше $8,2 \text{ г/см}^3$ и низкая жаростойкость.

Значительные достижения в разработке сплавов ниобия с низкой плотностью относятся к началу 2000-х годов и отмечены созданием сплавов на основе эвтектики в системе Nb—Si [5—7]. Новый подход, кроме высокой жаропрочности, обеспечил высокую жаростойкость и снижение плотности сплавов на основе ниобия до $7—7,2 \text{ г/см}^3$. Однако применение сплавов на основе системы Nb—Si ограничивается их низкой пластичностью и необходимостью длительных отжигов для формирования зеренной структуры и фазового состава.

© Н. П. Бродниковский, А. С. Кулаков, Н. А. Крапивка,
Д. Н. Бродниковский, А. В. Самелюк, С. А. Фирстов, 2016

В работе [8] показана возможность получения высокопрочных до 800 °С сплавов ниобия и достаточно пластичных. Используется установленная в последнее время возможность упрочнения сплава за счет увеличения количества входящих в него компонентов. Это повышает не только твердорастворное упрочнение, но и энтропию смешения, что изменяет закономерности образования фаз [9]. Однако в представленных в работе [8] сплавах при температурах выше 800 °С прочность резко снижается.

Обсуждается влияние различных факторов на образование фаз в высокоэнтропийных сплавах. Активно исследуется факт подавления образования интерметаллидов в результате снижения свободной энергии Гиббса за счет высокой энтропии смешения ОЦК и ГЦК твердых растворов [9—11]. Из-за упорядочения энтропия смешения в интерметаллидах уменьшается. Это дает возможность получать в многокомпонентном сплаве только одну фазу с простой решеткой (ОЦК или ГЦК). Однако есть и другие факторы, которые влияют на тип образующихся фаз. Это химическое сродство элементов друг к другу, различие атомных радиусов, соотношение величин энтальпии и энтропии смешения. Под влиянием этих факторов возможно образование не только ОЦК или ГЦК твердых растворов, но и интерметаллидов, фаз внедрения, стекол [9]. В работе [12] показано, что в многокомпонентных сплавах в результате отжига часто происходит распад твердого раствора с выделением мелких частиц на нано- и более мелком уровне. Упрочнение многокомпонентного сплава объясняют таким процессом распада твердого раствора. Особый интерес представляет изучение возможности повышения жаропрочности многокомпонентных сплавов за счет дисперсионного упрочнения сплавов в результате выделения частиц интерметаллидов.

Цель настоящей работы — создать сплав с ниобием, в котором большое количество компонентов обеспечивает твердорастворное упрочнение матрицы, дополнительно упрочненной дисперсными выделениями для обеспечения жаропрочности при температуре до 1000 °С. При этом подбор компонентов должен обеспечить плотность меньше 7 г/см³.

Материалы и методика эксперимента

Для выплавки сплавов брали материалы чистотой 99,9% (мас.). Плавку осуществляли в аргонно-дуговой установке с нерасходуемым вольфрамовым электродом в медных луночных тиглях с водяным охлаждением в атмосфере аргона. Для очистки аргона проводили предварительный переплав гетера Ti—Zr, который поглощает из атмосферы печи примеси кислорода, азота, паров воды и углеродных соединений. Сплав получали сплавлением компонентов по мере увеличения их температур плавления. Сплавы выплавляли методом последовательного разбавления. В законченном варианте слиток переплавлялся еще 4—5 раз для усреднения состава. Для удаления усадочной раковины поверхность слитка оплавливали дугой малой мощности. Время подогрева верхней части слитка подбирали