

СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Nb-Si ЗОННОЙ ПЛАВКИ

Карпов М.И., Коржов В.П., Кийко В.М., Прохоров Д.В., Внуков В.И.

*Институт физики твёрдого тела РАН, г. Черноголовка, Россия,
korzhov@issp.ac.ru*

В отличие от жаропрочных сплавов Ni-Al, сплавы Nb-Si в двухфазной области Nb-Nb₃Si₃ с температурой плавления, равной 1920°C, имеют потенциальные возможности для создания конструкционных материалов, способных работать при температурах 1300°C и выше. Эти сплавы обладают эвтектоидной структурой, состоящей из относительно пластичного твёрдого раствора на основе ниобия и прочного интерметаллического соединения. Такое структурное состояние является определяющим фактором при разработке жаропрочных материалов, для которых важны большие значения прочности при хорошей вязкости разрушения.

На первом этапе исследовались сплавы доэвтектического состава. Исходные слитки сплава Nb-3мас.%Si получались электронно-лучевой плавкой в ручьевом водоохлаждаемом Cu-кристаллизаторе из заготовки, составленной из Nb-полос и крошки пластинчатого кремния. Длина получаемых слитков – ~150 мм, сечение – ~20×8 мм². Бестигельная зонаная перекристаллизация сплава проводилась в вертикальном исполнении. В процессе 1-го прохода достигалось выравнивание состава по длине слитков, при двух последующих проходах происходила направленная перекристаллизация слитков. Скорость перемещения зоны равнялась 1, 2 и 4 мм/мин.

Микроструктура сплавов (рис. 1) на 87% состояла из дендритных зёрен твёрдого раствора Si в Nb (1) [Nb(Si)] и на 13% расположенной между ними эвтектики (2, 3 и 4) [Nb(Si) + Nb₃Si]. Результаты локального рентгеноспектрального анализа с небольшого эвтектического участка между выделениями Nb(Si) показали, что содержание кремния в выделениях твёрдого раствора в составе эвтектики (мелкие светлые выделения) равно 1,47 ± 0,50 мас.%, а в соединении Nb₃Si – ~8,5 мас.% Si. В крупных выделениях Nb(Si) содержалось 0,72 ± 0,01 мас.% Si.

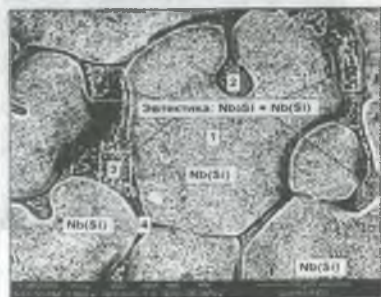


Рис. 1. Структура сплава после зонной плавки при скорости перемещения зоны 2 мм/мин

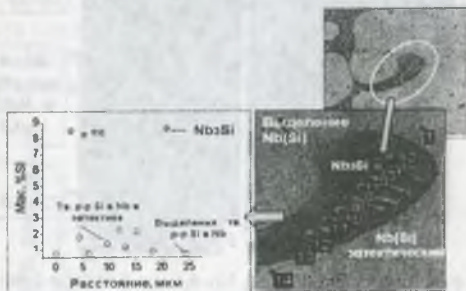


Рис. 2. К результатам локального рентгеноспектрального анализа

Направленность структуры просматривается в направлении стрелок на менее масштабных фотографиях структуры сплава (рис. 3). Здесь же можно отметить, что с увеличением скорости зоны структура становилась более мелкозернистой. Средний размер выделений Nb(Si) уменьшался от 160 до ~70 мкм при скоростях зоны, соответственно, 1 и 4 мм/мин.

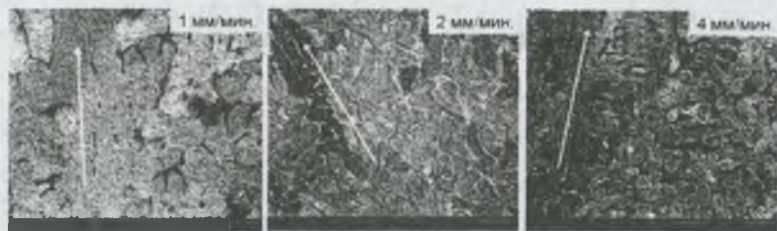


Рис. 3. Микроструктура слитков сплава Nb–3%Si, полученных зонной перекристаллизацией при скоростях движения расплавленной зоны 1, 2 и 4 мм/мин

Аналогичным способом изготавливался сплав эвтектического состава (6,5 мас.%Si). Его структура состояла из Г-образных выделений Nb₃Si с линейным размером, равным 70–80 мкм, и эвтектики (рис. 4а). Для иллюстрации результатов рентгеноспектрального анализа на рис. 5б изображён фрагмент этой же структуры, но при большем увеличении: (1) эвтектика – смесь интерметаллида Nb₃Si (фаза серого цвета) и твёрдого раствора Si в Nb (светлая фаза), и (2) Г-образные выделения Nb₃Si. В средней части каждой из сторон некоторых Nb₃Si-выделений присутствовали тонкие (1–2 мкм) выделения чёрного цвета, идентифицируемые как интерметаллид Nb₅Si₃.

Образцы сплава Nb–7,4 мас.%Si получали в два этапа. Сначала методом плавки во взвешенном состоянии с разливкой в массивные Cu-изложницы в атмосфере чистого Ar получали слитки в виде цилиндров высотой 30 и Ø9 мм. Сплавы с ожидаемой структурой изготавливались переплавкой полученных слитков путём перемещения жидкой зоны вдоль вертикальной оси слитка в электронно-лучевой печи. Для задания структурной направленности слиток помещался на W-затравку. Между образцом и затравкой наблюдался хорошо заметный переходный слой толщиной 18,5 мкм.

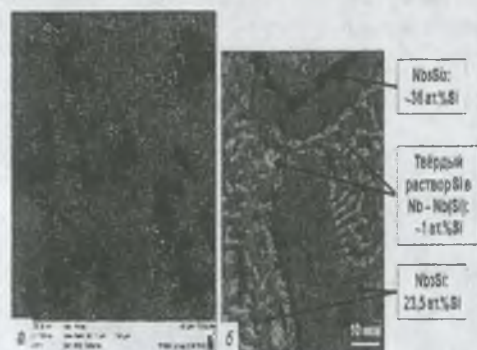


Рис. 4. Структура сплава Nb–6,5 мас.%Si (а) и фрагмент структуры в увеличенном масштабе (б) для иллюстрации результатов рентгеноспектрального анализа

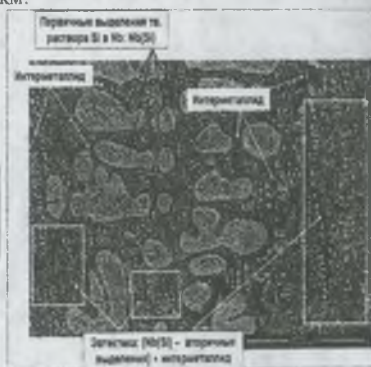


Рис. 5. Структура сплава Nb–7,4 мас.%Si: сечение середины слитка вдоль его центральной оси

В структуре образцов (рис. 5) присутствовали светлые дендритоподобные выделения твёрдого раствора Si в ниобии Nb(Si) (первичные выделения) и эвтектика Nb(Si)–Nb₃Si, представляющая собой матрицу из интерметаллидной фазы Nb₃Si с мелкими светлыми выделениями твердого Nb(Si). Наличие крупных первичных выделений Nb(Si) свидетельствует о том, что потери кремния превысили 0,9 мас.%, и его содержание в сплаве стало меньше эвтектической концентрации кремния в сплаве.

Направленность структуры этого сплава хорошо проявлялась в направленности структуры эвтектики. Это убедительно подтверждается, если сравнить эвтектические структуры в поперечных сечениях слитка, приготовленных параллельно (рис. 6а) и перпендикулярно (рис. 6б) направлению движения расплавленной зоны.

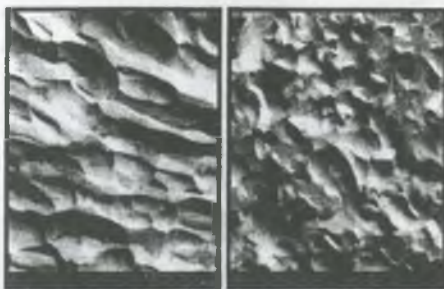


Рис. 6. Микроструктура сплава Nb-7,4 мас.%Si при съёмке во вторичных электронах (рельефный режим): а и б – поперечное сечение параллельно и перпендикулярно направлению перемещения расплавленной зоны

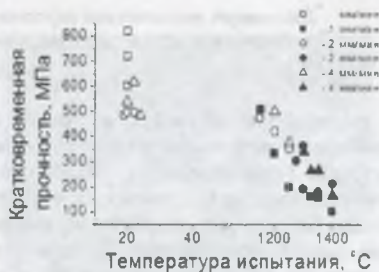


Рис. 7. Кратковременная прочность сплавов с 3 мас.%Si в зависимости от температуры

При комнатной температуре прочность сплавов с 3 мас.%Si при испытаниях на 3-точечный изгиб находилась в интервале от 600 до 800 МПа, а кратковременная прочность этих сплавов при температурах 1200–1300°C составляла 350–450 МПа (рис. 7). Светлые символы относились к образцам, претерпевшим хрупкое разрушение, тёмные – образцам с хрупко-вязким разрушением. Если отслеживать изменение прочности в зависимости от скорости перемещения расплавленной зоны, то при 4 мм/мин она примерно на 100 МПа больше, чем при других скоростях.

Сплав Nb-7,4 мас.%Si. Кратковременная прочность на изгиб при 1200°C составляла ~410 МПа и при 1350°C падала до 285 МПа. Исходные данные испытаний на длительную прочность при 1300°C представлены на рис. 8. Первоначальная нагрузка – 105 МПа, на втором этапе она была повышена до 158 МПа. Рассчитанная зависимость скорости деформации ползучести от напряжения при 1300°C (рис. 9) сопоставима с аналогичными данными для суперсплавов системы Ni-Al при 1100–1150°C.

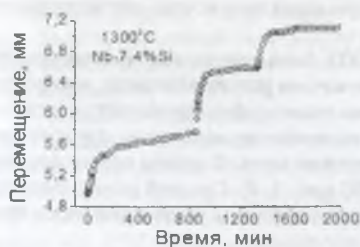


Рис. 8. Экспериментальная кривая перемещение-время, полученная в результате испытаний на ползучесть при 3-точечном изгибе при 1300°C

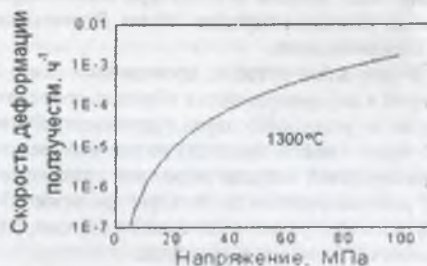


Рис. 9. Скорость деформации ползучести от напряжения при 3-точечном изгибе при 1300°C