

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Прохорова Дмитрия Владимировича «Структура и механические свойства жаропрочных композиционных материалов на основе системы Nb-Al», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность работы определяется потребностью современной аэрокосмической, энергетической и химической промышленности в легких, прочных и жаропрочных материалах. Применение новых материалов должно обеспечить повышение температуры газа на входе в турбину с 1650-1750°C до 1850-1950°C, что должно привести к повышению тяги двигателя, повышению КПД генераторов электроэнергии, уменьшению расхода топлива и загрязнения окружающей среды. Современные жаропрочные никелевые суперсплавы, а также сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al с монокристаллической структурой имеют температуры начала плавления не выше 1360-1395°C и не могут обеспечить необходимое повышение температуры газа на входе в турбину. В связи с этим работа Д.В. Прохорова, направленная на создание новых более тугоплавких жаропрочных сплавов и создание технологии их изготовления, является весьма актуальной. Большое внимание привлекают интерметаллиды, в особенности алюминиды переходных металлов, более легкие и более жаростойкие, чем никелевые суперсплавы, благодаря высокому содержанию алюминия. В настоящее время известны почти 300 двойных ИМ с температурой плавления ($T_{пл}$) свыше 1500°C ($\leq 2750^\circ C$). К ним относятся моноалюминиды никеля $NiAl$ ($T_{пл}=1640^\circ C$) и рутения ($T_{пл}\sim 2100^\circ C$) с ОЦК упорядоченной типа В2 кристаллической структурой, образующиеся конгруэнтно, а также алюминид ниобия Nb_3Al ($T_{пл}\sim 2060^\circ C$). Выбор в качестве основы для создания нового жаропрочного материала алюминида ниобия Nb_3Al , который образуется по перитектической реакции и находится в равновесии с, является оправданным, поскольку твердым раствором на основе ниобия может выступать в роли вязкой структурной составляющей в сплавах типа «интерметаллид - металл».

Настоящая работа направлена на разработку лабораторной технологии получения жаропрочных сплавов Nb-Al методами порошковой металлургии, а также диффузионной сваркой под давлением многослойных пакетов Nb/Al, объединенной с горячей прокаткой.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 190 странице, содержит 94 рисунка и 38 таблиц. Библиография включает 184 наименования.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы ее цель, научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, который состоит из двух основных разделов. В первом рассмотрены основные виды и способы упрочнения жаропрочных сплавов на основе ниобия. Второй раздел посвящен технологиям получения жаропрочных сплавов на основе ниобия. Обсуждаются полученные в последние годы данные, касающиеся описания многочисленных попыток получения сплавов и композитов типа Nb_3Al-Nb с использованием различных технологических приемов (плавление, порошковая металлургия, получение слоистых композитов и др. и их комбинации).

В заключении, на основании анализа литературных данных, обоснован выбор системы легирования и намечены основные технологические схемы, которые предполагается использовать для разработки технологии получения лабораторных образцов системы Nb_3Al-Nb .

Во второй главе описаны исходные материалы, способы получения экспериментальных модельных образцов и методы исследования. Для решения поставленных задач диссертант использовал разнообразное лабораторное технологическое оборудование, позволившее реализовать получение лабораторных образцов по нескольким технологическим схемам. В этих схемах скомбинированы как ранее опробованные другими исследователями процессы получения, так и новые процессы, ранее не использовавшиеся. Исследование микроструктуры и фазового состава образцов проводилось при помощи взаимодополняющих методов и методик (растровая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ, рентгенофазовый анализ и др.). Механические испытания на трехточечный изгиб и высокотемпературную ползучесть в сочетании со специальной методикой расчета и обработки экспериментальных результатов позволили получить в относительно короткие сроки оценочные характеристики ползучести материалов, пригодные, в том числе, и для сравнительного анализа образцов.

Третья глава посвящена исследованию структуры и свойств образцов, полученных прямым смешиванием порошков ниобия и алюминия и механическим легированием их смесей. Подтверждена невозможность получения сплавов ниобия, упрочненных Nb_3Al спеканием образцов из смесей, полученных простым перемешиванием исходных порошков Nb и Al по выбранному режиму, из-за отсутствия растворения алюминия в ниобии при $500^\circ C$ и практически полного испарения алюминия при последующем спекании в вакууме при $1500-1900^\circ C$. Показано, что спекание прессовок из смесей порошков с содержанием алюминия, соответствующим твердому раствору на основе ниобия, полученных 20-ч механоактивацией на воздухе, приводит к формированию пористых структур с

большим количеством включений оксида алюминия. Только спекание под давлением позволило частично предотвратить окисление Al, уменьшить остаточную пористость и сформировать выделения упрочняющей фазы Nb₃Al. Суммарная объемная доля пор и оксидов после свободного спекания в вакууме составляла ~30 об. %, после спекания под давлением снизилась до 13-14 % (на воздухе) и 10-11% (в аргоне). Прочность на изгиб при 1250°C спеченных под давлением образцов колебалась в пределах 160-370 МПа. При комнатной температуре образцы были хрупкими.

Четвертая глава посвящена изучению структурно-фазового состава и механических свойств образцов сплавов, полученных с использованием в качестве прекурсоров алюминидов ниобия Nb₃Al и Nb₂Al по технологии, называемой диссертантом «интерметаллидной». В качестве связки использовались порошки Nb или сплава Nb+5,1 мас.% Al. Для приготовления порошковых интерметаллидных прекурсоров диссертант использовал порошки, полученные размолотом миниатюрных слитков интерметаллидов, выплавленных во взвешенном состоянии. Последующей механоактивацией в планетарной мельнице, консолидацией и спеканием в вакууме, в том числе под давлением, а также в режиме SPS, диссертантом получены компактные образцы. Диссертантом установлено, что наиболее эффективным методом получения образцов сплава Nb₃Al+10 мас.%[Nb+5,1 мас.% Al] является спекание под давлением. Применение этого метода позволяет получать образцы с наименьшей пористостью (5,5-9 об. %) и более высокими прочностными характеристиками при испытаниях на изгиб при комнатной температуре и при 1300°C, которые обусловлены присутствием достаточно крупных (размером ≈ 5-15 мкм) выделений оксидов и карбидов (3,5-4 об. % Al₂O₃ и 4-5,5 об. % карбидов ниобия). Показано, что при комнатной температуре все сплавы разрушаются хрупко, а при 1300°C хрупко разрушаются только образцы из сплава с минимальным содержанием ниобиевой связки. Проведено сравнение скорости ползучести сплавов, спеченных под давлением, со скоростью ползучести литейных сплавов ЖС-32 и ВКНА-4У при температуре 1150°C.

Пятая глава посвящена изучению структурно-фазового состояния и механических свойств слоистых композитов, получаемых методом диффузионной сварки фольг Nb и Al. Варьируя соотношения толщин фольг получали композиции, примерно соответствующие областям твердого раствора на основе ниобия, двухфазной области Nb_{ss} + Nb₃Al и области Nb₃Al при полном взаимодействии алюминия с ниобием. Диссертантом предложен механизм взаимодействия Nb и Al при формировании диффузионного слоя, определены направления диффузионных потоков в условиях реактивной диффузии, выявлены механизмы образования пор. Это позволило диссертанту предложить метод пакетной прокатки Nb/Al слоистых композитов для регулирования масштабных (от микро- до нано-) параметров слоистой структуры. Последовательное увеличение содержания слоев Al (добавлением фольг Al) при многоцикловогой прокатке позволяет увеличить содержание алюминия по

