

УДК 621.762.04

А.А. Сметкин

A.A. Smetkin

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

TENDENCIES FOR DEVELOPMENT OF PRODUCTION PROCESSES OF TITANIUM MATERIALS BY POWDER METALLURGY

Представлен краткий обзор выполненных в Научном центре порошкового материаловедения ПНИПУ работ в области порошковой металлургии титана. С использованием методов механической активации и механического легирования, других методов обработки титана выполняются исследования и разработка высокопрочных сплавов в сочетании с высокими значениями вязкости разрушения, жаропрочных со стабильными свойствами до 650 °С, интерметаллических систем с работоспособностью до 800 °С и т.п. Дальнейшая перспектива порошковой металлургии титана представляется в развитии исследований, направленных на расширение спектра современных материалов различного назначения — композиционных конструкционных и функциональных.

Ключевые слова: материалы на основе титана, порошковая металлургия, структура, свойства, технологии обработки порошков.

Provides a brief overview of the performed at the Scientific Center of Powder Material Science of PNRPU works in the field of titanium powder metallurgy. Using the methods of mechanical activation and mechanical alloying, other methods of processing of titanium performed research and development of high-strength alloys combined with high values of fracture toughness, heat-resistant with stable properties to 650 °C, intermetallic systems with performance up to 800 °C etc. The further prospects for powder metallurgy titanium is represented in the development of studies aimed at expanding the range of advanced materials for various purposes – composite structural and functional.

Keywords: titanium materials, powder metallurgy, structure, properties, processing technology of powders.

Перспективы развития материаловедения обусловлены двумя важнейшими факторами: 1) востребованность новых материалов с уникальными свойствами; 2) технология и экономическая эффективность. Следует учесть, что чисто сравнительный анализ и выявление превосходства одного материа-

ла над другим нельзя рассматривать статически, поскольку требования к свойствам постоянно меняются.

В период развития и становления порошковой металлургии титана значимая доля разработок была ориентирована на военный заказ. В 70–80-х гг. прошлого века в Научном центре порошкового материаловедения ПНИПУ (НЦ ПМ) был разработан ряд порошковых титановых сплавов на основе электролитического порошка титана марки ПТЭС, по химическому составу соответствующих литым сплавам серии ВТ и ОТ: ВТ1, ВТ5, ВТ5-1, ОТ4, ВТ20, ВТ3-1, ВТ6, ВТ15, ВТ9, ВТ18, ВТ23 [1, 2]. Разработанные материалы были внедрены при производстве деталей типа втулок, фланцев, колец, опор, плат для приборостроительных предприятий авиационной промышленности и ракетной техники.

Развитие процессов получения титана (плазменная металлургия, непрерывная металлотермия, электролиз) позволяет получать часть или всю массу титана в порошкообразном виде, и в этом случае порошковая металлургия не только дополняет существующий метод производства титановых изделий, а в той или иной мере заменяет его. Однако до настоящего времени четкие и исчерпывающие представления о технических особенностях порошковой металлургии титана и ее возможностях в отношении обеспечения высокого уровня свойств титановых спеченных сплавов отсутствуют, что является основной причиной недостаточно широкого применения изделий из титана и его сплавов.

В настоящей статье нами представлен некоторый обобщенный взгляд на современные тенденции развития порошковой металлургии титана и показаны результаты исследовательских работ, выполненных в НЦ ПМ.

В современной технике ясно обозначилась тенденция использования материалов с дисперсной структурой. Эти материалы находятся в термодинамически неравновесном состоянии и потому имеют более многообразные и необычные сочетания физико-механических свойств, чем материалы в состоянии, близком к равновесному.

Актуальные задачи порошковой металлургии титана на сегодняшний день представляются следующими:

- получение новых материалов для экстремальных условий эксплуатации (высокие и низкие температуры, агрессивные среды);
- выявление механизмов формирования необходимых типов структур высоконеравновесных титановых порошковых материалов на различных масштабных уровнях, определяющих в конечном результате новый уровень физико-механических свойств;
- разработка условий консолидации, обеспечивающих сохранение нано- и микрокристаллической структуры в конечном продукте.

На рис. 1 представлены основные технологические схемы, используемые в центре при разработке и производстве титановых материалов, изделий. Методами дополнительной обработки спеченных материалов являются: интенсивная пластическая деформация; химико-термическая обработка, лазерная термическая обработка, лазерное легирование.



Рис. 1. Основные технологии получения титановых материалов в НЦ ПМ

С использованием новых методов приготовления шихты и консолидации в центре разработаны такие титановые материалы, как VT1, VT6, VT3-1, OT4, алюминиды титана Ti–Al и Ti–Al–Nb, быстроохлажденные волокна титановых сплавов VT1, VT6 и др. [3], проницаемые функциональные материалы, тернарные соединения системы Ti–Si–C.

Применение метода механоактивации на стадии получения порошка, в частности титанового, позволяет получить особую структуру материала, активизировать процессы спекания, сформировать неравновесную структуру с высокой плотностью микро- и макроскопических дефектов кристаллической структуры и ячеистой дислокационной структурой [4, 5].

Методом механоактивации титановой губки в специально сконструированной высокоэнергетической мельнице – атриторе с последующим холод-

ным прессованием и спеканием при 1300 °С получен нелегированный материал (аналог ВТ1) с относительной плотностью 0,95. Исследованы механические характеристики спеченного ВТ1 на основе механоактивированной титановой губки фракции 50–630 мкм. Установлено, что полученный ВТ1 обладает пределом прочности $\sigma_b = 660 \dots 720$ МПа (в 1,5 раза выше, чем у литого аналога), относительным удлинением 4–11 %, пределом усталостной прочности при испытаниях на изгиб с кручением $\sigma_a = 475$ МПа на базе испытаний 10^5 циклов и $\sigma_a = 320$ МПа на базе $3 \cdot 10^6$ циклов (выше, чем у литого аналога и на уровне литого деформированного материала).

Другой важной задачей в материаловедении титана является достижение еще более высоких характеристик прочности и жаропрочности титановых сплавов, особенно в самолетостроении, поэтому развивается принципиально новое направление по созданию титановых сплавов. В частности, проводятся работы по расширению класса титановых сплавов с интерметаллидным типом упрочнения, а также с метастабильными структурными составляющими [6]. Такие сплавы позволят достичь прочности 130–140 МПа при $T = 700 \dots 800$ °С с сохранением удовлетворительных значений пластичности и трещиностойкости.

Алюминиды титана рассматриваются как перспективная основа для развития жаропрочных сплавов с более высоким уровнем рабочих температур. Высокотемпературные процессы формирования структуры материалов системы Ti–Al имеют диффузионную природу. Проведенные нами исследования были главным образом ориентированы на изучение особенностей диффузии в этих системах, обусловленных дисперсностью и высокой термодинамической неравновесностью исходного состояния порошков. Методом механического легирования получены все основные типы интерметаллидов системы Ti–Al, представляющих интерес в качестве основы жаропрочных материалов [7]. Отличительной чертой полученных материалов является микрокристаллическая и однородная структура. Технология получения экологически безопасна, экономична и практически безотходна.

Универсальной особенностью ультрадисперсных порошковых смесей, получаемых методом механического легирования, является их коагулированность. Оценки показали, что даже достаточно крупные частицы, размером около 100 мкм, способны образовывать пространственные структуры.

Методом высокоэнергетического размола механической смеси порошков титана и алюминия состава 50%Ti–50%Al с последующим изотермическим спеканием получен ($\alpha_2 + \gamma$)-алюминид титана с относительной плотностью 98 %. Дополнительная термомеханическая обработка позволила достичь размера зерна 1–2 мкм. Этим же методом были получены интерметаллиды на основе Ti_2AlNb . Структура спеченных алюминидов титана представлена

на рис. 2 (здесь и далее – сканирующий электронный микроскоп Ultra 55, Carl Zeiss). Таким образом, показано, что диффузионным синтезом в рамках порошковой технологии возможно получение всех основных жаропрочных интерметаллидов системы Ti–Al.

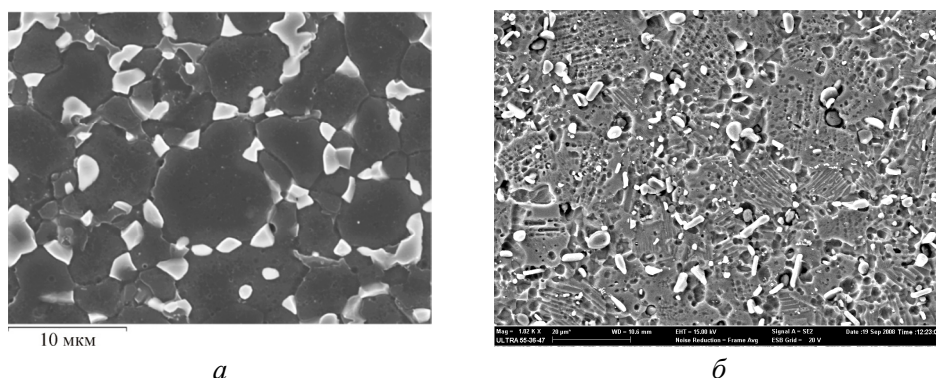


Рис. 2. Структура алюминидов титана: *a* – орторомбический алюминид титана Ti_2AlNb ; *б* – $(\alpha_2+\gamma)$ -алюминид титана

Одним из перспективных материалов нового поколения, разрабатываемым в научном центре при сотрудничестве с Институтом химии Коми НЦ УрО РАН является композиционный материал на основе карбосилицида титана [8–9]. Основу поликристаллической матрицы наноламинатной керамики составляют так называемые MAX-фазы – сложные карбидные и нитридные соединения переходных металлов, имеющие слоистую кристаллическую решетку. К классу MAX-фаз относятся, в частности, Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2 , Ti_2AlC , Ti_4AlN_3 и др. В структуре этих соединений карбидные или нитридные слои размером порядка 1 нм разделены атомными слоями кремния или алюминия. Отдельные зерна Ti_3SiC_2 представляют собой пакеты довольно прочно связанных между собой слоев (рис. 3).

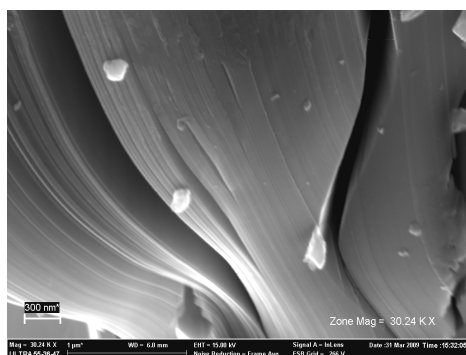


Рис. 3. Наноламинатная структура карбосилицида титана

Связь между отдельными слоями в зерне Ti_3SiC_2 слабее, чем внутри самого слоя, что обеспечивает некоторую подвижность слоев друг относительно друга. При этом химическая связь между атомами различных слоев остается достаточно прочной, что обеспечивает материалу высокую механическую прочность. Это принципиально отличает наноламинатную керамику от других слоистых соединений, таких как

графит и слоистые силикаты, где связь между слоями обусловлена значительно более слабым взаимодействием.

Таким образом, изучены особенности разрушения и деформации плотных поликристаллических образцов Ti_3SiC_2 , полученных методом горячего прессования. Разрушение наноламинатной керамики на основе Ti_3SiC_2 сопровождается сдвигом, изгибом и расслоением зерен, также наблюдаются сминание, коробление и микроразрывы слоев. Такой сложный характер разрушения способствует рассеянию механической энергии на микроуровне – локализации механических повреждений в одном конкретном зерне, что препятствует макроскопическому разрушению материала.

В сравнении с недавним прошлым гораздо больший сектор экономики и промышленности в настоящее время имеют убедительные данные по технико-экономической эффективности использования титана и его сплавов. Оригинальные технологии производства порошковых изделий позволяют значительно расширить область применения титана – от оборонной промышленности и добывающих отраслей до медицины и экологии.

Разработанная технология получения высокоактивных многокомпонентных порошковых композиций на основе титана, в том числе интерметаллидного типа, актуальна для предприятий, оснащенных традиционным оборудованием порошковой металлургии, так как позволит им выпускать широкий класс изделий с повышенным уровнем физико-механических свойств. Решение материаловедческих задач в металлургии титана при разработке новых материалов с уникальными свойствами значительно расширит область применения титана в специальной технике, медицине и смежных областях. В объектах общетехнического назначения существует та степень свободы, когда при разработке новых классов материалов на основе титана различного назначения исследователи опираются на аналитическую оценку различных вариантов. Отсюда очевидны перспективы расширения применения легированных высокопрочных сплавов ($\sigma_b \geq 1200$ МПа), обладающих также высокими значениями вязкости разрушения ($K_{IC} \geq 170$ МПа·м^{1/2}). Различным отраслям промышленности необходимы новые жаропрочные материалы со стабильными свойствами до 650 °С, интерметаллические системы с работоспособностью до 800 °С, сплавы для сверхпластической деформации, биосовместимые материалы, металломатричные композиты и т.п.

Список литературы

1. Анциферов В.Н., Устинов В.С., Олесов Ю.Г. Спеченные сплавы на основе титана. – М.: Металлургия, 1984. – 168 с.

2. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

3. О получении, свойствах и применении быстроохлажденных волокон / В.Н. Анциферов, М.М. Серов, В.П. Лежнин, А.А. Сметкин // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. – № 1. – С. 55–58.

4. Моделирование процесса получения порошков титана / В.Н. Анциферов, С.А. Мазеин, С.Н. Пещеренко, А.А. Сметкин // Цветные металлы. – 1995. – № 4. – С. 77–79.

5. Анциферов В.Н., Пещеренко С.Н., Ярмонов А.Н. Неравновесная растворимость при механическом легировании // ФХОМ. – 2000. – № 12. – С. 13–26.

6. Kunal Kothari, Ramachandran Radhakrishnan, Norman M. Wereley Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques // Progress in Aerospace Sciences. – 2012. – Vol. 55. – P. 1–16.

7. Анциферов В.Н., Сметкин А.А. Механически легированные интерметаллические сплавы алюминидов титана // Перспективные материалы. – 2003. – № 6. – С. 12–15.

8. Керамические композиты на основе Ti_3SiC_2 для изделий сложной формы / А.В. Надуткин, П.В. Истомин, Ю.И. Рябков, Б.А. Голдин, А.А. Сметкин // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 1. – С. 50–56.

9. Истомин П.В., Надуткин А.В., Сметкин А.А. Деформация и разрушение керамических наноламинатов на основе карбосилицида титана // Керамика и композиционные материалы: тез. докл. VII Всерос. науч. конф., 21–25 июня 2010 г. – Сыктывкар, 2010. – С. 38.

Получено 2.09.2013

Сметкин Андрей Алексеевич – кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 6, e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru).

Smetkin Andrey Alekseevich – Candidate of Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University (614013, Perm, Prof. Pozdeeva st., 6, e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru).