

УДК 669.295:621.762.5

М. В. Матвийчук, канд. техн. наук Д. Г. Саввакин

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев

СИНТЕЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Титановые сплавы Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr и Ti-10V-2Fe-3Al (масс. %) синтезированы экономичным методом прессования и спекания смесей порошковых компонентов на основе гидрированного титана. Проанализирована эволюция микроструктуры и плотности на разных этапах синтеза, характеристики конечных сплавов и их механические свойства. Прочность и пластичность синтезированных сплавов сравнимы с соответствующими показателями для данных сплавов в литом/горячедеформированном состоянии. Достигнутый комплекс механических свойств достаточен для практического применения синтезированных сплавов и изделий из них.

Ключевые слова: титановые сплавы, порошковые смеси, синтез, микроструктура, плотность, механические свойства.

Введение

Высоколегированные титановые сплавы псевдо бета класса имеют наиболее высокие значения удельной прочности среди титановых сплавов и значительный потенциал для оптимизации комплекса механических свойств термообработкой. Прочность этих сплавов может достигать значений 1600 МПа, что делает их чрезвычайно привлекательными для использования в качестве конструкционных материалов. Наиболее распространенные сплавы данного класса Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (масс. %) и Ti-10V-2Fe-3Al (масс. %) широко применяются в современном самолетостроении [1]. В то же время, сфера использования титановых сплавов псевдо бета класса, как и большинства материалов на основе титана, существенно ограничена их относительно высокой стоимостью. Поэтому значительный интерес представляет получение титановых сплавов и изделий из них с помощью экономично-эффективных технологий, например методами порошковой металлургии.

Преимущество порошковой металлургии проявляется наиболее полно при использовании метода смесей порошковых компонентов (СПК), в котором сплавы необходимого состава получают смешиванием порошка титановой основы и легирующих элементов (металлов или лигатур), компактированием смеси в изделия необходимой формы и их спеканием, преимущественно в вакууме, при температурах, обеспечивающих образование химически гомогенного сплава и необходимое уплотнение (залечивание пор).

Ранее на примере наиболее распространенного титанового сплава Ti-6Al-4V было показано [2], что получение данным методом оптимальных микроструктур, обеспечивающих необходимый комплекс физико-механических характеристик, возможно лишь при использовании в качестве основы смесей порошка гид-

рированного титана вместо традиционного порошка титана.

Целью данного исследования было изучить возможность синтеза химически и микроструктурно однородных сплавов Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr и Ti-10V-2Fe-3Al методом СПК на основе гидрированного титана.

Материалы и методики исследования

В качестве основы порошковых смесей использовали порошок гидрида титана TiH_2 (3,5 %H, < 100 мкм). Для достижения составов Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr и Ti-10V-2Fe-3Al легирующие элементы вводили в виде порошков комплексных лигатур состава 27.8Al-27.8V-27.8Mo-16.6Cr и 66.67V-13,33Fe-20Al соответственно.

Использование этих лигатур, строго соответствующих содержанию всех легирующих элементов в сплавах, упрощает процесс изготовления исходных порошковых смесей. К тому же, данные лигатуры технологически удобны, поскольку в силу своей хрупкости легко измельчаются до требуемой дисперсности. Важно и то, что при нагревании до температуры спекания выбранные лигатуры не склонны к образованию легкоплавких эвтектик, способных существенно замедлить процесс уплотнения [3].

Смеси компактировали при комнатной температуре и давлении 750 МПа в компакты размера 10×10×50 мм, нагревали в вакуумной печи со скоростью 20 °С/мин до температур в интервале 1000-1350 °С и охлаждали вместе с печью. Часть образцов изотермически выдерживали при 1250 °С в течение 15, 60, 120 и 240 мин и 240 мин при 1350 °С.

Плотность образцов после различных стадий нагрева определяли методом гидростатического взвешивания, объемный процент пор дополнительно контролировали численным анализом изображений поверхности шлифов. Микроструктуру термообработанных материалов исследовали с помощью оптической микроскопии (Olympus

IX-70). Механические испытания на растяжение проводили при комнатной температуре на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 4 мм.

Результаты и дискуссия

На рис. 1 изображен график повышения плотности обоих исследованных составов при поэтапном нагреве и выдержках. Рост плотности порошковых пресовок определяется двумя процессами: дегидрированием порошка основы и собственно спеканием порошковых частиц.

При нагреве гетерогенных смесей на основе гидрированного титана выделение водорода из его решетки активно проходит выше 350 °С. Этот процесс сопровождается значительным объемным эффектом (усадкой), в результате чего плотность образцов резко возрастает еще до начала активной диффузии и спекания порошковых частиц. В интервале температур до 1000 °С концентрация водорода в титановой матрице существенно снижается, что и определяет значительное повышение плотности образцов от исходной 3,2–3,3 г/см³ до 3,6 г/см³ (рис. 1).

Анализ микроструктур, полученных нагревом до 1000 °С (рис. 2), не даёт оснований утверждать, что диффузионное перераспределение элементов между матрицей и лигатурой получило заметное развитие: частички лигатуры всё ещё чётко очерчены, вокруг отсутствуют признаки образования диффузионных зон. Однако, такое перераспределение активно происходит при нагреве до 1100 °С и, особенно, до 1250 °С (рис. 2), что проявляется в размытии зон с повышенной концентрацией легирующих элементов, хорошо различимых микроструктурно на фоне титановой матрицы. Нагрев в интервале 1000–1250 °С сопровождается существенным повышением плотности, что, безусловно, вызвано уплотнением матрицы. При этом повышение плотности сплава Ti-10V-2Fe-3Al в этом температурном интервале происходит заметно быстрее. В то же время, из рис. 2 видно, что достаточно

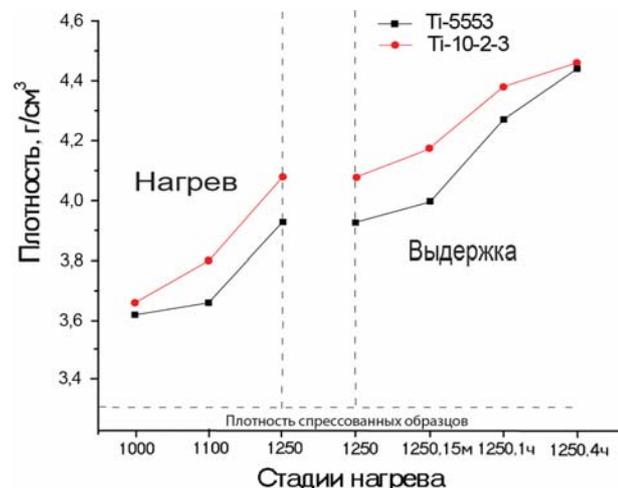


Рис. 1. Изменение плотности сплавов при нагреве и изотермической выдержке

много пор образуется на границе диффузионного фронта вокруг исходных легирующих частиц. Этот процесс более заметен в сплаве Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr. Причиной возникновения таких пор является коагуляция вакансий, образовавшихся вследствие различия в диффузионной подвижности атомов легирующих элементов в титановую матрицу и встречной диффузии атомов титана (так называемая пористость Киркендалла). Исследованные составы содержат достаточно большое количество легирующих элементов (15–18 %), и формирование пористости по данному механизму объясняет несколько повышенную конечную пористость (2–3 %) по сравнению с конечной пористостью сплава Ti-6Al-4V (1,8 %), содержащего всего 10 % легирующих элементов.

Выдержка при 1250 °С приводит к дальнейшему повышению плотности и постепенному выравниванию химического состава по всему объёму материала.

При небольших выдержках (15 мин) весь объём материала ещё чётко разделяется на зоны, где концентрация легирующих элементов выше или ниже $\alpha+\beta$ границы однофазной и в двухфазной $\alpha+\beta$ областей. Первые, расположенные вокруг исходных частиц лигатур, не претерпевают при охлаждении фазовых превращений, в то время как в менее легированных областях высокотемпературная β -фаза распадается с образованием пластинчатой ($\alpha+\beta$)-структуры. Однородная микроструктура формируется при 1250 °С в течение 2 часов для сплава Ti-10V-2Fe-3Al и в течение 3 часов для Ti-5553. Однако, для достижения достаточной плотности необходимы выдержки не менее 4 часов. При 1350 °С гомогенное состояние достигается уже в течение 1 часа; при этом конечная плотность после выдержки 4 ч заметно выше (4,48 г/см³ для сплава Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr и 4,50 г/см³ для Ti-10V-2Fe-3Al), чем при 1250 °С (соответственно, 4,43 г/см³ и 4,46 г/см³).

Характеристики (микроструктура, остаточная пористость и механические свойства) обоих сплавов, полученных спеканием в течение 4 часов при 1250 и 1350 °С, приведены в таблице 1. Прирост в прочности и пластичности при повышении температуры до 1350 °С связан с уменьшением как общей пористости, так и среднего размера пор, что минимизирует их негативное влияние на механические свойства. Комбинация прочности и пластичности сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr выглядит несколько предпочтительнее. Прочность и пластичность обоих синтезированных сплавов сравнимы с соответствующими показателями для данных сплавов в литом/горячедеформированном состоянии. Такой комплекс механических свойств достаточен для практического применения данных сплавов и изделий из них, к тому же баланс прочности и пластичности можно существенно улучшить последующей термообработкой.

Описанный метод получения сплавов может быть широко задействован в промышленности, что обеспечит значительный экономический эффект и расширение сферы использования титановых изделий.

Таблиця 1 – Влияние температуры спекания на свойства синтезированных сплавов

Сплав	T спекания, °C	Сред. размер зерна, мкм	Пористость, %	Ср. размер пор, мкм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
10V-2Fe-3Al	1350	159	2,8 %	10,5	939	1033	12,0	19,5
	1250	105	4,0 %	11,3	944	1033	8,0	13,5
Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr	1350	102	1,6 %	7,0	1025	1111	10,9	14
	1250	87	2,4 %	7,2	1029	1108	6,0	8,2

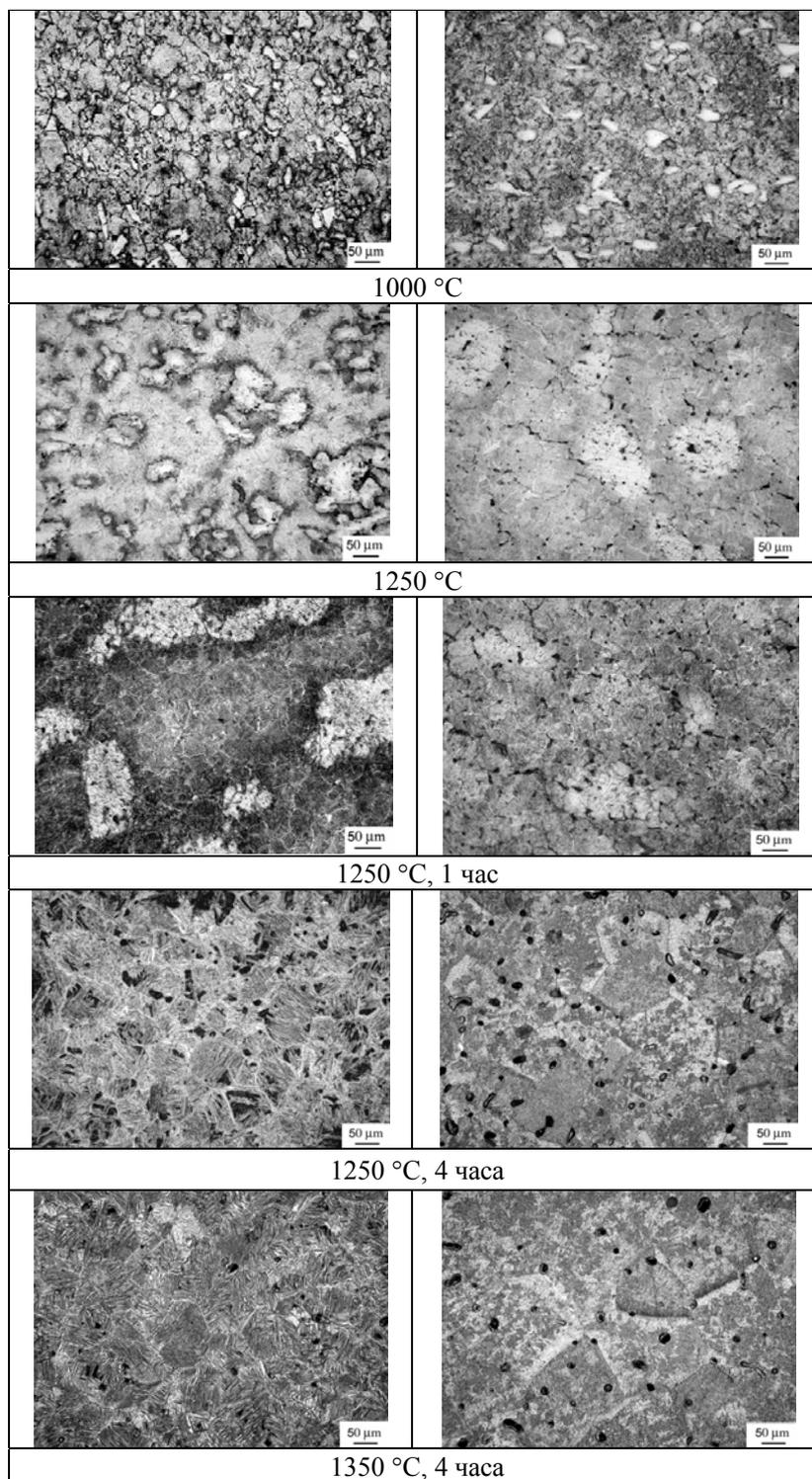


Рис. 2. Эволюция микроструктуры при нагреве образцов состава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (слева) и Ti-10V-2Fe-3Al (справа)

Выводы

1. Химически гомогенные сплавы Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr и Ti-10V-2Fe-3Al были успешно синтезированы методом прессования и спекания смесей порошковых компонентов на основе гидрированного титана.

2. Температура спекания определяет размер зерна и характеристики остаточной пористости синтезированных сплавов. Эти параметры, в свою очередь, определяют комплекс механических свойств.

3. Прочность и пластичность синтезированных сплавов сравнимы с соответствующими показателями для данных сплавов в литом/горячедеформированном состоянии. Баланс прочности и пластичности можно существенно улучшить последующей термообработкой.

Авторы статьи выражают благодарность академику НАН Украины О. М. Ивасишину за ценную дискуссию и полезные замечания при анализе полученных результатов.

Перечень ссылок

1. R. Boyer Recent titanium developments and applications in the aerospace industry / R. Boyer, K. Slattery et al. // Ti-2007 Science and Technology : Proc. of 11th World Conference on Ti, printed by Japan Institute of Metals (Eds : M. Niinomi, S. Akiyama et al.). – 2007. – P. 1255–1262.
2. Синтез сплава Ti-6Al-4V с низкой остаточной пористостью методом порошковой металлургии / [О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, Ф. Фроес и др.]. // «Порошковая металлургия». – 2002. – № 7/8. – С. 54–64.
3. Синтез сплавов Ti-Fe и Ti-Al-Fe из элементарных порошковых смесей / [О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, К. А. Бондарева и др.]. // «Металлофизика и новейшие технологии». – 2004. – Т. 26. – № 7. – С. 963–980.

Одержано 14.10.2009

M. V. Matviychuk, D. G. Savvakin

SYNTHESIS OF HIGHLY ALLOYED TITANIUM COMPOSITIONS USING POWDER METALLURGY METHODS

Титанові сплави Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr та Ti-10V-2Fe-3Al (мас. %) синтезовані економічним методом пресування та спікання сумішей порошкових компонентів на основі гідрованого титану. Проаналізована еволюція мікроструктури та густини на різних етапах синтезу, характеристики кінцевих сплавів та їх механічні властивості. Міцність та пластичність синтезованих сплавів порівняні з відповідними показниками для даних сплавів у литому/горячедеформованому стані. Досягнутий комплекс механічних властивостей є достатнім для практичного використання синтезованих сплавів та виробів з них.

Ключові слова: титанові сплави, порошкові суміші, синтез, мікроструктура, густина, механічні властивості.

Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr and Ti-10V-2Fe-3Al alloys were synthesized with press-and-sinter blended elemental powder metallurgy approach using hydrogenated titanium powder. Microstructure and density evolution at different stages of synthesis, characteristics and mechanical properties of final materials were analyzed. Strength and ductility of manufactured alloys are comparable to corresponding data of materials produced with ingot metallurgy approach. Achieved complex of mechanical properties is enough for practical use of manufactured alloys and their products.

Key words: titanium alloys, powder blends, synthesis, microstructure, density, mechanical properties.