



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВВЕДЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ti_2AlNb ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКЕ

С.В. Ахонин, А.Ю. Северин, В.А. Березос

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для решения задач введения тугоплавких элементов в орто-сплавы титана проведены работы по отработке технологии электронно-лучевой плавки (ЭЛП) сплавов, содержащих молибден, вольфрам и цирконий. Представлены результаты экспериментальных исследований по введению тугоплавких легирующих элементов при выплавке слитков интерметаллидного сплава на основе соединения Ti_2AlNb способом ЭЛП. Показана перспективность использования ЭЛП для получения качественных слитков алюминидов титана, легированных тугоплавкими элементами. Библиогр. 11, табл. 2, ил. 5.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; алюминид титана; орто-фаза; электронно-лучевая плавка; промежуточная емкость; слиток; тугоплавкие элементы

При создании материалов для современных газотурбинных двигателей (ГТД) главным требованием является повышение их рабочих температур, а также долговечность и надежность деталей из которых они изготовлены. Наиболее остро стоит вопрос долговечности турбинных лопаток и колец, работоспособность которых, в основном, определяет срок службы двигателя [1–3]. За свойства деталей двигателя отвечают множество параметров: выбор системы легирования сплавов, их получение, режимы обработки. В связи с этим актуальным является использование современных металлургических процессов при получении соответствующих изделий и полуфабрикатов из перспективных жаропрочных сплавов.

В последнее время достаточно широкое применение получают материалы на интерметаллидной основе. Например, при легировании интерметаллидного соединения Ti_3Al (которое достаточно хорошо изучено, но не пользуется популярностью из-за крайне низкой пластичности) ниобием в количествах более 10 ат. % в структуре сплавов появляется новая упорядоченная фаза — Ti_2AlNb , так называемая орто-фаза [4]. Основными преимуществами сплавов на основе орто-фазы являются высокие прочность, упругие и пластические характеристики, жаропрочность и жаростойкость, низкий коэффициент термического расширения.

Основным же недостатком — повышенная плотность и сложности металлургического производства в связи с присутствием большого количества тугоплавких легирующих элементов, в частности ниобия.

Анализ литературных данных показал, что основные принципы легирования сплавов на основе алюминида Ti_2AlNb сводятся к следующему [4, 5]: содержание алюминия в сплаве составляет не менее 23...25 ат. %; необходимо легирование сплава ниобием свыше 15 ат. %, что позволяет повысить прочность, пластичность, вязкость и характеристики жаропрочности; для повышения пластичности и жаропрочности — дополнительное легирование молибденом; дополнительное легирование цирконием, которое повышает сопротивление ползучести без значительного влияния на пластичность и предел текучести.

Несмотря на достоинства этих сплавов до сих пор не освоено производство в промышленных масштабах какого-либо орто-сплава. Основными причинами торможения являются: необходимость использования для легирования дорогих элементов (ниобия, тантала, вольфрама); применение оборудования с защитной атмосферой (вакуум или инертный газ); обеспечение высокой однородности химического состава слитков; жесткий контроль макро- и микроструктуры полуфабрикатов.

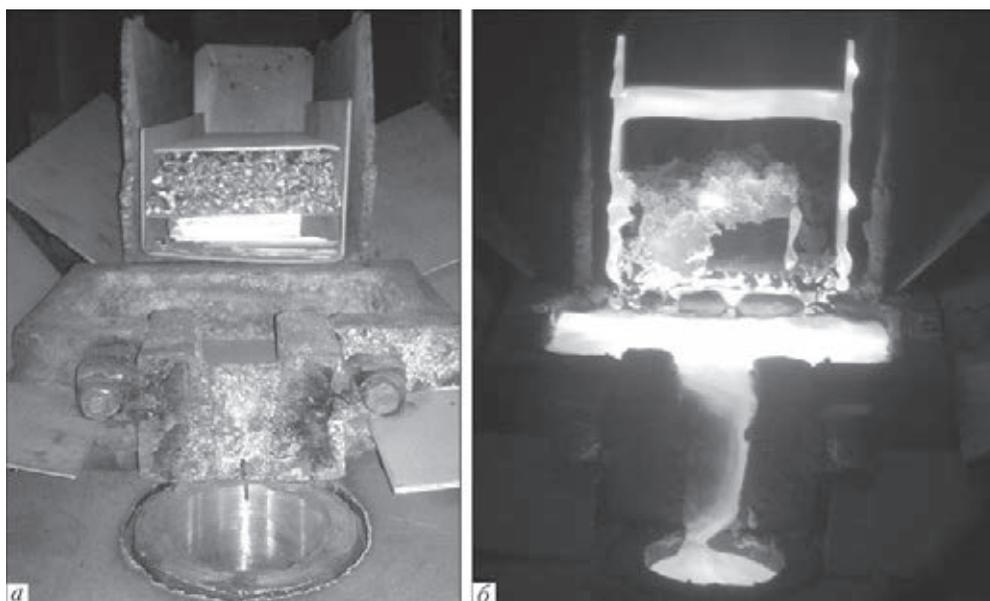


Рис. 1. Исходная шихтовая заготовка (а) и процесс ее плавки (б) для получения интерметаллида Ti_2AlNb

Метод электронно-лучевой плавки может обеспечить необходимые условия для промышленного производства слитков из этих материалов, а именно: высокую подводимую удельную энергию для расплавления тугоплавких элементов; проведение процесса плавки в вакууме; применение промежуточной емкости, что обеспечивает равномерность химического состава. Эти особенности электронно-лучевой плавки делают ее перспективной для производства орто-сплавов [6–8].

Однако, при выплавке способом ЭЛП орто-сплавов с повышенным содержанием тугоплавких легирующих элементов значительно затрудняется обеспечение равномерного химического состава по сечению слитка. В особенности сложно обеспечить равномерное содержание элементов с высокой упругостью пара.

Для решения задач введения тугоплавких элементов в орто-сплавы титана в ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ проведены работы по созданию технологии ЭЛП орто-сплавов, содержащих молибден, вольфрам и цирконий.

Опытные плавки слитков диаметром 165 мм сплава $Ti-12Al-40Nb-1Mo-2W-0,5Zr$ проводили на установке УЭ-208 [9]. Наличие в составе сплава тугоплавких легирующих элементов (ниобия, вольфрама) и элемента с высокой упругостью пара (алюминия) не позволяет получить качественный и химически однородный слиток за один переплав, так как происходит интенсивное испарение алюминия еще на стадии плавления шихтовой заготовки. К тому же предыдущий опыт получения сплава дополнительно легированного вольфрамом показал, что введение чистого вольфрама в виде кусков более 3 мм достаточно проблематично, так

как вольфрам полностью не расплавился на стадии плавления заготовки, кусочки попали в промежуточную емкость и возникла угроза проникновения их в слиток, что является недопустимым. Для решения этой проблемы и ввода в сплав ниобия, вольфрама и других легирующих элементов в качестве лигатуры использовали промышленный сплав 5ВМЦ, что позволило вести плавку в стационарном режиме с заданной скоростью. Химический состав сплава 5ВМЦ следующий, мас. %: Nb–90; Mo–2,5; W–5,0; Zr–1,0.

Лигатуру сплава 5ВМЦ в виде стружки загружали в короб вместе с остальными компонентами сплава (рис. 1).

Предварительно проведенные плавки с добавлением всех компонентов сплава в исходную шихту показали, что высокая температура плавления тугоплавких элементов вызывает интенсивное испарение алюминия вплоть до 70 % (табл. 1).

С целью снижения температуры плавления основного тугоплавкого компонента шихты (ниобия) приняли решение получить сплав $TiNb$, который имеет более низкую температуру плавления, чем чистый ниобий, с дополнительным легированием тугоплавкими элементами — молибденом, вольфрамом и цирконием (рис. 2).

Таблица 1. Химический состав исходной шихты и слитка интерметаллида Ti_2AlNb после однократного ЭЛП, мас. %

Металл	Al	Nb	Zr	Mo	W	Ti
Исходная шихта	12,0	41,0	0,5	1,2	2,0	Осн.
Слиток ЭЛП	4,2	43,2	0,4	1,17	2,2	Осн.

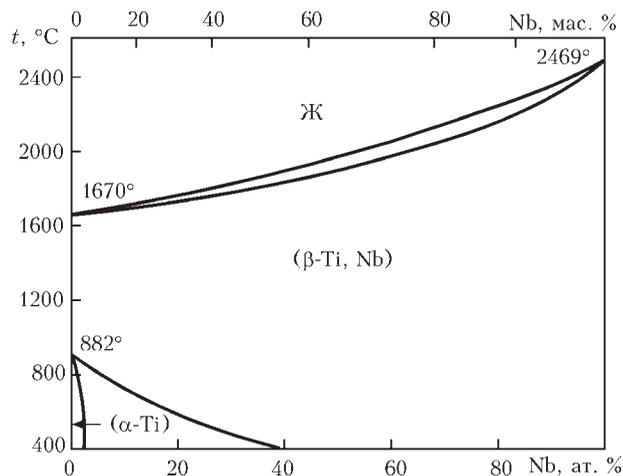


Рис. 2. Диаграмма состояния сплава Ti-Nb

Слитки получали двойным переплавом для обеспечения требуемой химической однородности. Первый переплав проводили без добавления алюминия. При втором к полученному слитку сплава TiNb добавляли стружку алюминия с учетом его потерь на испарение (рис. 3) [10, 11].

После загрузки шихты установку вакуумировали до уровня остаточного давления в камере пушек — 10^{-2} Па, а в камере плавки — 10^{-1} Па. Подготовленную шихту сначала наплавляли в промежуточную емкость до ее заполнения, а затем металл периодически сливали в медный водоохлаждаемый кристаллизатор до полного сплавления шихты. Выплавку слитка осуществляли в соответствии с рассчитанными мощностями и конфигурацией нагрева его торца в кристаллизаторе. Суммарная мощность электронно-лучевого нагрева составляла 120 кВт. Скорость плавки — 30 кг/ч (рис. 4).



Рис. 3. Шихтовая заготовка для второго переплава



Рис. 4. Процесс получения слитка диаметром 165 мм интерметаллида Ti_2AlNb с высоким содержанием тугоплавких элементов



Рис. 5. Слиток интерметаллида Ti_2AlNb с высоким содержанием тугоплавких элементов

В результате проведенных плавок был получен слиток диаметром 165 и длиной 300 мм (рис. 5).

Отбор проб производили вдоль слитка на глубине 10 мм от его поверхности. Исследовали три зоны: верхнюю, нижнюю и среднюю. Результаты химического анализа экспериментального слитка показали равномерное распределение легирующих элементов по длине слитка (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав слитка интерметаллида Ti_2AlNb с высоким содержанием тугоплавких элементов, мас. %

Место отбора проб	Al	Nb	Mo	W	Zr	Ti
Верх	10,94	41,76	0,63	1,33	0,62	Осно- ва
Середина	11,85	40,89	0,69	1,41	0,53	
Низ	10,58	40,01	0,59	1,55	0,49	



Таким образом, разработанная технология и проведенные опытные плавки слитков интерметаллида системы TiAl способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью показали перспективность использования его для получения качественных слитков алюминидов титана, легированных тугоплавкими элементами.

Выводы

Выбрана система легирования исследуемого интерметаллидного жаропрочного сплава на основе орто-фазы Ti_2AlNb .

Разработан способ ввода в сплав тугоплавких легирующих элементов и проведена экспериментальная плавка слитка диаметром 165, длиной 300 мм.

Показано, что ЭЛП позволяет получить химически однородный слиток сплава на основе интерметаллидного соединения Ti_2AlNb с высоким содержанием ниобия и легированного тугоплавкими элементами — вольфрамом, молибденом, цирконием.

1. Анташов В.Г., Ночовная Н.А., Иванов В.И. Тенденция развития жаропрочных титановых сплавов для авиадвигателестроения // Технология легких сплавов. — 2002. — № 4. — С. 72–76.
2. Dimiduk D.M., Mendiratta M.G., Subramanian P.R. Development of intermetallic materials for aerospace //

- Materials Science and Technology. — 1992. — 8. — P. 367–375.
3. Каблов Е.Н., Лукин В.И. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники // Автомат. сварка. — 2008. — № 11. — С. 76–82.
4. Поварова К.Б., Банных О.А. Принцип создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов // Материаловедение. — 1999. — № 2. — С. 27–32.
5. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. — М.: ВИС-МАТИ, 2009. — 520 с.
6. Электронно-лучевая плавка титана / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
7. Жук Г.В., Тригуб Н.П., Замков В.Н. Получение слитков γ -алюминидов титана методом ЭЛП // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 20–22.
8. Получение сплавов интерметаллида системы TiAl с добавками бора и лантана способом ЭЛП / Н.П. Тригуб, Е.А. Аснис, В.А. Березос и др. // Там же. — 2011. — № 3. — С. 10–12.
9. Электронно-лучевая установка УЭ-208 / А.А. Тур, А.Н. Кравец, А.Л. Тихоновский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1992. — № 1. — С. 71–74.
10. Evaporation behaviour of components in Ti-15-3 melt during ISM process / G. Jingjie and other // Trans. non-ferrous Metals Soc. China. — 1998. — 8, № 4. — P. 539–543.
11. Испарение алюминия из сплавов на основе титана в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью / И.Ю. Варич, С.В. Ахонин, Н.П. Тригуб, А.Н. Калинюк // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1997. — № 4. — С. 15–21.

To solve the problems of adding the refractory elements of titanium ortho-alloys, the works were carried out for testing the technology of electron beam melting of ortho-alloys containing molybdenum, tungsten and zirconium. Presented are the results of experimental investigations for adding of refractory alloying elements in melting of ingots of intermetallic alloy on the base of Ti_2AlNb compound using the method of electron beam melting. The prospects of EBM application for producing quality ingots of titanium aluminides, alloyed with refractory elements, are shown. 11 Ref., 2 Tables, 5 Figures.

Key words: gas-turbine engine; titanium aluminide; ortho-phase; electron beam melting; cold hearth; ingot; refractory elements

Поступила 04.08.2015

УКРАИНА ОСТАЛАСЬ В ДЕСЯТКЕ МИРОВЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ СТАЛИ



Украина заняла десятую строку в рейтинге мировых производителей стали. Всего в июне 2015 г. в мире произведено 135,594 млн. т стали. Из них украинской — 2,004 млн. т. С начала года в стране произведено 11,258 млн. т стали.

Крупнейшие мировые производители стали в июне 2015 г.:

1. Китай — 68,946 млн. т (-0,8% сравнительно с июнем 2014 года);
2. Япония — 8,571 млн. т (-6,2 %);
3. Индия — 7,422 млн. т (+0,8 %);
4. США — 6,721 млн. т (-8,5 %);
5. Ю. Корея — 5,862 млн. т (-3,6 %);
6. Россия — 5,643 млн. т (-7,5 %);
7. Германия — 3,769 млн. т (+5,8 %);
8. Турция — 2,842 млн. т (-4,5 %);
9. Бразилия — 2,777 млн. т (+2,1 %);
10. Украина — 2,177 млн. т (-23 %).

В целом с начала года в мире произведено 813 млн. т, что на 2 % ниже аналогичного показателя 2014 г.
<http://delo.ua/business>