



ПОЛУЧЕНИЕ СЛИТКОВ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23 СПОСОБОМ ЭЛП

А.Н. Пикулин, С.В. Ахонин, В.А. Березос, Р.В. Селин

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

Проведены комплексные работы по исследованию возможности получения слитков сложнолегированного титанового сплава VT23 из первичной шихты. По технологии электронно-лучевого переплава с промежуточной емкостью и порционной подачей металла в водоохлаждаемый кристаллизатор были получены слитки прямоугольного сечения 530×165 мм и длиной до 3 м, из которых на реверсивном прокатном ДУО стане марки Skoda 355/500 были изготовлены полуфабрикаты в виде листов толщиной 5 мм. Показано, что металл полученных слитков и полуфабрикатов соответствует требованиям ОСТ 1-90013–81 «Сплавы титановые. Марки». Представлены результаты исследований структуры и механических свойств полуфабрикатов в виде листов, изготовленных из слитков титанового сплава VT23, полученных электронно-лучевой плавкой. Показано, что электронно-лучевая технология является эффективным способом получения сложнолегированных сплавов титана. Библиогр. 9, табл. 2, ил. 6.

Ключевые слова: титановый сплав; шихтовая заготовка; слиток; электронно-лучевая плавка; промежуточная емкость; электронно-лучевое оплавление; полуфабрикат; лист; качество металла

В современном промышленном производстве полуфабрикаты из сплавов титана занимают важное место. Сложнолегированные ($\alpha + \beta$)-титановые сплавы с высокими показателями механических свойств являются перспективными конструкционными материалами, которые находят применение в авиационной и космической технике, энергетической, нефтегазовой и химической отраслях промышленности [1].

Одним из таких сплавов является сплав VT23, который разработан на основе теории комплексного легирования титановых сплавов. Из него изготавливают различные полуфабрикаты: листы, ленту, фольгу, трубы, поковки, штамповки, плиты, прутки, профили. Сплав VT23 обладает высокой прочностью и трещиностойкостью основного материала, а самое главное — сварных соединений. Он относится к сплавам, в которых при закалке из β -области фиксируется α'' -фаза (пластичный мартенсит). Поэтому закаленные или быстро охлажденные в процессе изготовления полуфабрикаты имеют высокие механические свойства, что предотвращает их растрескивание и разрушение, имеющее место у сплавов другого класса [1–5]. В титановом сплаве VT23 выгодно сочетаются высокая прочность и низкий модуль упругости, низкая плотность и высокое отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_b$, немагнитность, высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах [2].

Любые несовершенства химической и структурной однородности в титановых сплавах приводят к снижению прочности и долговечности изделий. Получение титановых сплавов связано с трудностями, обусловленными высокой чувствительностью титана к примесям внедрения, особенно к кислороду, азоту, водороду, углероду и взаимодействием со многими химическими элементами, в результате чего образуются твердые растворы или химические соединения. Кроме того, одним из основных структурных несовершенств титановых сплавов является наличие неметаллических включений. Высокая активность титана приводит к протеканию физико-химических процессов взаимодействия с газами даже в твердом состоянии. Поэтому неметаллические включения, в частности гидриды, нитриды, оксиды, образуются как в процессе выплавки слитков с использованием шихтовых материалов, так и на различных этапах технологического передела готовой продукции. В шихтовой заготовке (губчатом титане, ломе) присутствуют кислород, азот, водород, кремний, хлор. Эти примеси в конечном итоге определяют качество и свойства титановых сплавов. Титан активно взаимодействует не только с газами, но и с другими элементами. Поэтому локальное обогащение отдельных объемов слит-



Рис. 1. Слиток сплава ВТ23, полученный способом ЭЛП ков легирующими элементами приводит к образованию интерметаллических включений, таких как Ti_3Al , $TiAl$, $TiCr$ и других [4].

В настоящее время не все методы производства слитков из титановых сплавов позволяют получить качественный металл, а при нарушении технологического процесса производства в слитках обнаруживаются дефекты, которые снижают качество металла.

Таким образом, решение проблемы получения качественных слитков сложнолегированных титановых сплавов из различных шихтовых материалов является весьма актуальной. Работы в данном направлении позволят расширить сырьевую базу и снизить себестоимость продукции из сплавов титана.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) является наиболее эффективным способом вакуумной металлургии для получения тугоплавких и высоко-реакционных сплавов со сверхнизким содержанием газов, летучих примесей и неметаллических включений. При ЭЛП возможно регулирование скорости плавления слитка в широких пределах, благодаря независимому источнику нагрева, что, в свою очередь, позволяет регулировать продолжительность пребывания металла в жидком перегретом состоянии. ЭЛП является технологией, позволяющей практически полностью обеспечить удаление тугоплавких включений высокой и низкой плотности [6, 7].

С целью совершенствования технологии производства слитков сложнолегированных сплавов титана в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины проведены работы по выплавке партии слитков спла-



Рис. 2. Шихтовая заготовка для выплавки слитка титанового сплава ВТ23

ва ВТ23 прямоугольного сечения 530×165 мм и длиной до 3 м (рис. 1). Слитки получали по технологии ЭЛП с промежуточной емкостью и порционной подачей жидкого металла в водоохлаждаемый кристаллизатор.

Шихтовую заготовку для выплавки слитков формировали в нерасходуемый короб. Заготовка представляла собой плотно уложенные брикеты титановой губки ТГ-120 с легирующими компонентами (рис. 2).

На основе ранее проведенных в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины фундаментальных исследований процессов испарения компонентов из расплава в вакууме [6] рассчитан прогнозируемый химический состав выплавляемых слитков, по результатам которых осуществлялась корректировка составляющих шихтовой заготовки. Легирующие компоненты с высокой упругостью пара (Al, Cr) шихтовались с учетом компенсации потерь на испарение.

Для оценки качества металла полученных слитков проводилось исследование химического состава образцов, отобранных по длине слитка в верхней, средней и нижней частях. Результаты анализа химического состава металла полученных слитков сплава ВТ23 показали, что распределение легирующих элементов по длине слитка равномерное и соответствует марочному составу (табл. 1).

Для сокращения потерь металла в виде некондиционных отходов (стружки) вместо механической обработки поверхности слитков была использована технология электронно-лучевого оплавления [8, 9]. Боковая поверхность слитков после оплавления имела ровный микрорельеф,



Таблица 1. Средние значения распределения элементов и примесей по длине слитка-сляба сплава BT23 сечением 530×165 мм

Место отбора проб	Массовая доля, %								
	Al	Cr	Zr	Mo	V	Fe	Si	N	O
Верх	4,5	0,9	0,01	2,0	4,7	0,5	0,02	0,011	0,11
Середина	4,7	0,9	0,01	2,1	5,0	0,6	0,03	0,010	0,10
Низ	4,3	0,9	0,01	1,9	4,7	0,5	0,03	0,014	0,13
ОСТ 1-90013-81	4,0...6,3	0,8...1,4	<0,3	1,5...2,5	4,0...5,0	0,4...0,1	<0,15	<0,05	<0,15

гладкий зеркальный вид, шероховатость поверхности находилась в пределах Rz20...Rz80 при волнистости поверхности 0,2...0,6 мм (рис. 3).

Макроанализ структуры металла слитков сплава BT23 показал, что металл на макрошлифах характеризуется отсутствием пор, трещин, металлических и неметаллических включений, структура — кристаллами близкими к равноосным, участки столбчатой структуры отсутствуют (рис. 4). Величина зерна, которая определяется по 10-бальной шкале макроструктур инструкции № 1054-76 ВИАМ, соответствует 8, 9 балу и 6, 7 в зоне оплавленного слоя глубиной до 10 мм.

С целью дальнейшего изучения качества металла полученных слитков проведены исследовательские работы по изготовлению полуфабрикатов в виде листа. Для изготовления листов слитки резались на плиты размерами 45×150×260 мм. Деформационная обработка плит проводилась на реверсивном прокатном ДУО стане марки Skoda

355/500, в результате которой были получены листы, порезанные на пластины шириной 300, длиной 350, толщиной 5 мм (рис. 5). Листы из титанового сплава BT23 изготавливались с применением продольно-поперечной прокатки, а для получения необходимого качества поверхности и разнотолщинности применяли стандартные отделочные операции. На поверхности полученных листов при визуальном осмотре трещины, расслоения, а также включения не обнаружены. Финишную термообработку листов осуществляли по режиму: нагрев при $T = 750$ °С, выдержка 30 мин, охлаждение на воздухе.

Микроструктуру металла полученных листов сплава BT23 толщиной 5 мм исследовали на ме-

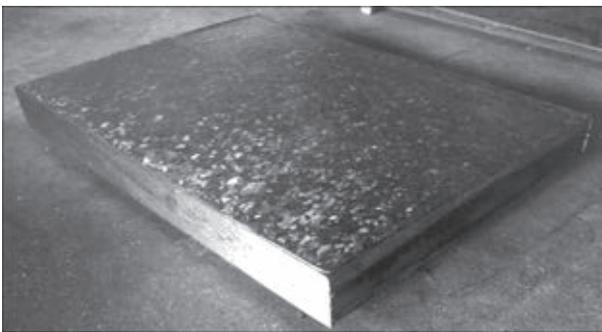


Рис. 3. Оплавленный слиток сплава BT23

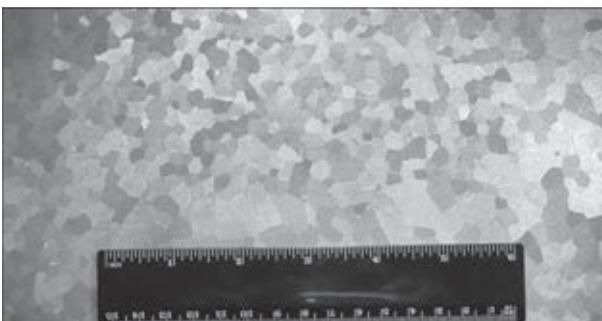


Рис. 4. Макроструктура литого металла слитка сплава титана BT23

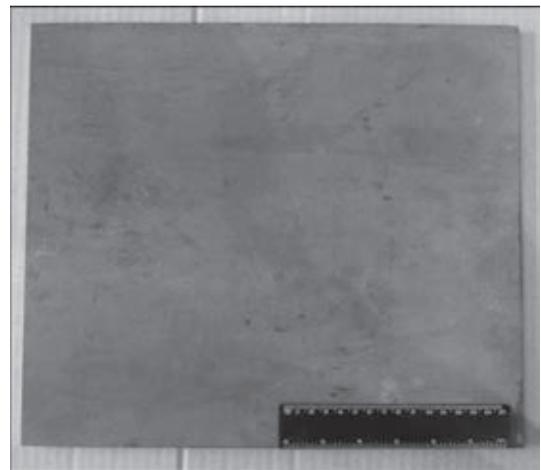


Рис. 5. Полуфабрикат в виде пластины из сплава BT23

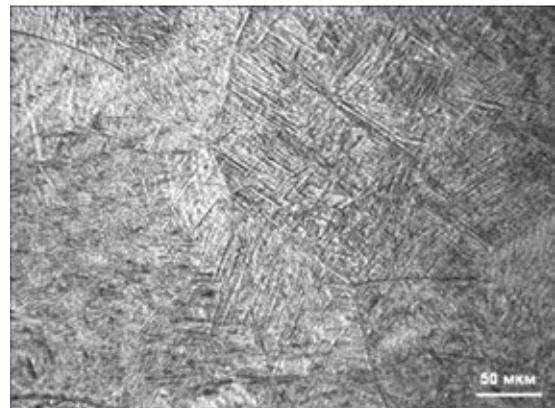


Рис. 6. Микроструктура металла пластины из сплава BT23



Таблица 2. Механические свойства металла листов сплава ВТ23

№ образца	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение φ , %	Ударная вязкость KCV, Дж/м ²
1	1072	1126	11,2	19,5	43,7
2	1054	1106	12,7	24,9	47,9
3	1065	1114	10,7	19,7	43,3
ОСТ 1-90013-81	—	1100...1200	10...13	—	—

таллографическом микроскопе «Neophot-2». На рис. 6 показана типичная микроструктура после финишной термообработки. Внутризеренная структура состоит из пластин α -фазы между которыми находится β -фаза. Толщина α -пластин составляет 0,7...1,0 мкм. По границам β -зерен наблюдается α -оторочка толщиной до 1,5 мкм. Такая микроструктура характерна для титановых $\alpha + \beta$ -сплавов мартенситного типа, к которому относится сплав ВТ23. Направление частиц α -фазы ненаправленное.

Исследования механических свойств полученного металла проводили путем испытания образцов на растяжение при $T = 20$ °С. Результаты испытаний металла полуфабрикатов в виде листов приведены в табл. 2.

Таким образом, проведенные работы показывают, что электронно-лучевая плавка является эффективным способом получения качественных слитков сложнолегированного сплава ВТ23, а качество полуфабрикатов в виде листов, изготовленных из этих слитков, соответствует требованиям стандартов. При этом металл листов имеет повышенную пластичность при высоких прочностных характеристиках.

Выводы

1. Комплекс проведенных исследований показал, что химический состав слитков сплава ВТ23, полученных методом ЭЛП и механические свойства, изготовленных из слитков полуфабрикатов в виде листов, соответствуют требованиям стандартов.

2. Электронно-лучевая плавка является эффективным методом получения качественных слитков сложнолегированных сплавов титана из первичной шихты.

1. Хореев А.И., Хореев М.А. Титановые сплавы, их применение и перспективы развития // *Материаловедение*. — 2005. — № 7. — С. 25–34.
2. Хореев А.И. Комплексно-легированный титановый сплав ВТ23 универсального применения // *Технология машиностроения*. — 2007. — № 7. — С. 5–11.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.
4. Бабенко Е.П., Долженкова Е.В. Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава ВТ23 // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2014. — № 3. — С. 82–85.
5. Петрунько А.Н., Олесов Ю.Г., Дрозденко В.А. Титан в новой технике. — М.: *Металлургия*, 1979. — 160 с.
6. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук. — Киев: *Наук. думка*, 2006. — 250 с.
7. *Производство дисков для энергетического машиностроения из титанового сплава ВТ6, полученного способом электронно-лучевой плавки* / С.В. Ахонин, В.А. Березос, В.А. Крыжановский и др. // *Современ. электрометаллургия*. — 2012. — № 4. — С. 15–20.
8. *Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков титана* / С.В. Ахонин, В.А. Березос, А.Н. Пикулин, и др. // *Там же*. — 2014. — № 2. — С. 21–25.
9. *Электронно-лучевая установка УЭ-185 для оплавления поверхностного слоя слитков* / Н.П. Тригуб, Г.В. Жук, А.Н. Пикулин и др. // *Там же*. — 2003. — № 3. — С. 12–14.

Comprehensive investigations have been performed to study the possibility of producing ingots from complex titanium alloy VT23 from initial charge. Technology of electron beam cold hearth remelting with portioned feed of metal into the water-cooled mould was used to produce ingots of 530 x 165 mm rectangular cross-section of up to 3 m length. These ingots were used to produce semi-finished products in the form of 5 mm sheets in reversing DUO rolling mill of Skoda 355/500 grade. It is shown that metal of the produced ingots and semi-finished products meets the requirements of OST 1-90013-81 «Titanium alloys. Grades». The paper presents the results of investigation of the structure and mechanical properties of semi-finished products in the form of sheets made from VT23 titanium alloy ingots produced by electron beam melting. It is shown that electron beam technology is an effective method to produce complex titanium alloys. 9 References, 2 Tables and 6 Figures.

Key words: titanium alloy; rod charge; ingot; electron beam melting; cold hearth; electron beam surface melting; semi-finished product; sheet; metal quality

Поступила 15.04.2015