



УДК 669.187.826

ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ И СЛЯБОВ СПОСОБОМ ЭЛП НА УСТАНОВКАХ, РАЗРАБОТАННЫХ В МК «АНТАРЕС»

А. Я. Дереча, О. Е. Собко-Нестерук, С. А. Сухин

Обобщен 10-летний опыт международной компании «АНТАРЕС» по созданию и развитию промышленного металлургического производства титана. Рассмотрены некоторые технические и технологические аспекты организации производства слитков (прямоугольной формы) и слябов на основе технологии электронно-лучевой плавки. Приведены физические параметры изготавливаемых слитков и слябов, их качественные характеристики.

The 10-year experience of the International Company «Antares» on the establishment and development of metallurgical production of titanium is generalized. Some technical and technological aspects of organizing the production of ingots and slabs (ingots of a rectangular shape) on the basis of technology of electron beam melting are considered. Physical parameters of produced ingots and slabs, their quality characteristics are given.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; установка; титан; слитки; слябы

Возрастающие требования к качеству титана со стороны потребителей аэрокосмического комплекса, а также стремление к удешевлению титановой продукции коммерческого назначения стимулируют развитие новых процессов производства слитков титана. Среди них важное место занимает электронно-лучевая плавка (ЭЛП) как один из наиболее эффективных способов переработки титанового скра-

па [1]. В некоторых случаях холодноподовая ЭЛП титана в сочетании с вакуумно-дуговым переплавом (ВДП) является неотъемлемым технологическим процессом получения титана роторного качества [2].

Сегодня в применении холодноподовой технологии ЭЛП заинтересованы ведущие производители титана США, Китая, Японии и Западной Европы. Построены мощные электронно-лучевые печи, способные плавить самые крупные титановые слитки и слябы, перерабатывать титановую губку и скрап [3].

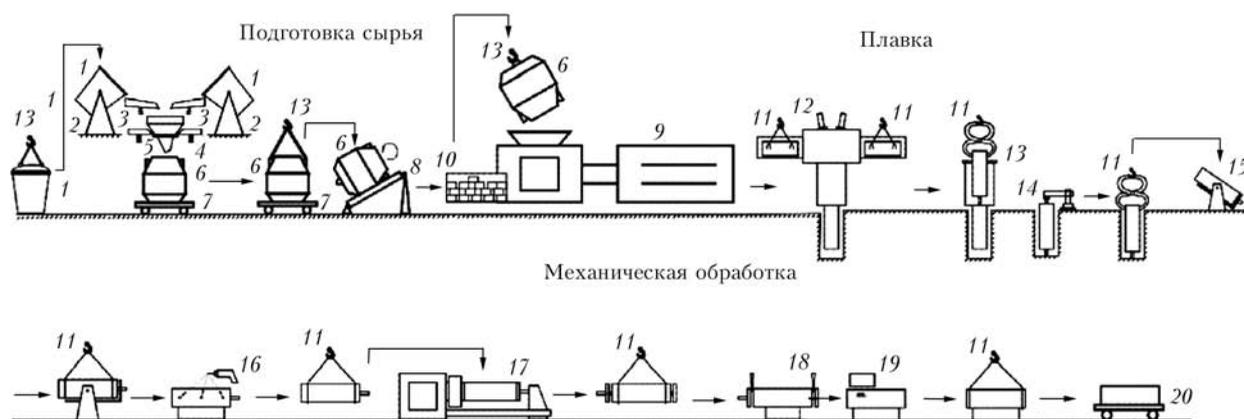


Рис. 1. Схема технологических потоков получения слитков титана: 1 – контейнер с губкой; 2 – кантователь; 3 – виброшитель; 4 – весы-дозатор; 5 – бункер-дозатор; 6 – барабан смесителя; 7 – тележка; 8 – смеситель; 9 – пресс брикетировочный; 10 – контейнер с брикетами; 11 – кран мостовой; 12 – печь; 13 – гузозахватное устройство; 14 – радиально-сверлильный станок; 15 – кантователь; 16 – отбор проб; 17 – токарный станок; 18 – ленточнопильный станок; 19 – прибор УЗК; 20 – тележка передаточная

© А. Я. ДЕРЕЧА, О. Е. СОБКО-НЕСТЕРУК, С. А. СУХИН, 2010

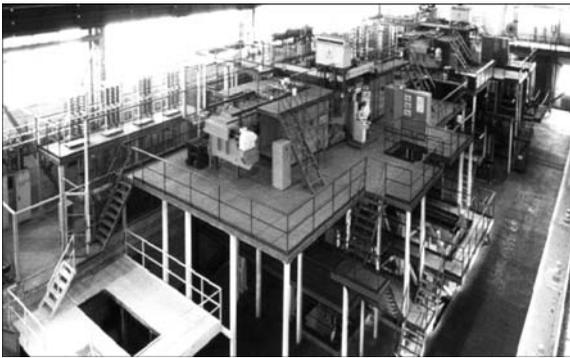


Рис. 2. Производственный цех ЭЛП МК «АНТАРЕС»

В 1999 г. благодаря объединению финансово-инвестиционных ресурсов в международной компании «АНТАРЕС» и практического опыта коллектива специалистов, длительное время работавших в области электронно-лучевых технологий, принято решение об организации промышленного производства титана на основе ЭЛП. Разработан и реализован проект металлургического производства с годовой программой выпуска 5000 т слитков титана. Главная цель проекта заключалась в создании экономичного производства титана высокого качества и превращении его в наиболее привлекательного в ценовом выражении производителя слитков и слябов.

Практическую реализацию проекта выполняли в несколько этапов в течение 2,5 лет. Закладка фундаментов для монтажа установок состоялась в 2000 г. Первую очередь пускового комплекса производства ввели в конце 2002 г. в следующем составе:

- линия для подготовки шихтовых материалов;
- две единицы установок ЭЛП;
- оборудование для механической резки и обработки слитков;
- заводская лаборатория для исследований и контроля качества металла.

Разработанные технология и комплект оборудования, применяемые в производстве слитков (рис. 1), позволяют использовать для переплава различное титановое сырье (скрап или титан губчатый отдельно и их смесь в любых пропорциях), а при необходимости вводить легирующие добавки.

Процесс подготовки шихты включает очистку, сортировку, дозировку и шихтовку титанового сырья, подлежащего переплаву. Линия подготовки



Рис. 3. Электронно-лучевая установка ВТ01

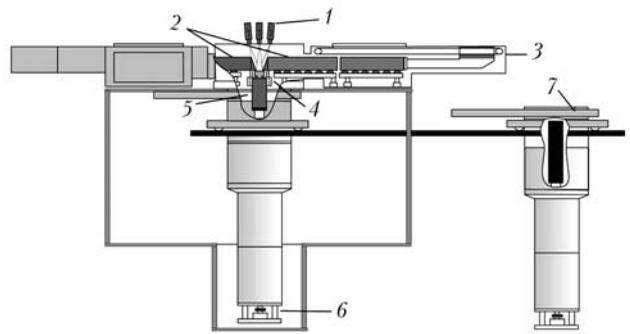


Рис. 4. Схема установки ВТ01: 1 — пушка ВТР; 2 — переплавляемая заготовка; 3 — механизм подачи заготовки; 4 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 — слиток; 6 — механизм вытягивания; 7 — вакуумный затвор

шихты содержит устройства автоматической дозировки в составе двух ленточных питателей и электронных весов с выходом на интерфейс компьютера, что позволяет получать шихтовую смесь из нескольких компонентов в необходимых пропорциях. Для усреднения шихтовой смеси изготовлен конический барабанный смеситель вместимостью 0,65 м³.

Готовую смесь из сыпучих компонентов шихты подвергают уплотнению в брикеты на гидропрессе усилием 6,3 МН. Каждый из двух брикетировочных прессов может обеспечить изготовление 8 т брикетов из губчатого титана или 4 т брикетов из стружки в смену.

Перед загрузкой в установку переплавляемые шихтовые материалы помещают в обычные стальные контейнеры. Необходимое количество сырья для получения крупнотоннажных слитков обеспечивается кассетной загрузкой от двух до шести контейнеров. Вместимость контейнеров и их количество позволяют загрузить на плавку примерно 12 т брикетированной губки, стружки или плавильного лома.

Основу производства (рис. 2) составляют две промышленные электронно-лучевые установки ВТ01. Специализированные установки нового поколения (рис. 3), предназначенные для плавки титана, спроектированы, изготовлены и введены в эксплуатацию на протяжении короткого периода времени. Все оборудование для комплектации установок изготовлено в МК «АНТАРЕС» и на украинских заводах по кооперации.

Техническая характеристика электронно-лучевой установки ВТ01

Мощность ЭЛН, кВт.....	2800
Ускоряющее напряжение, кВ.....	30
Количество электронных пушек, шт.....	7
Рабочий вакуум, Па.....	0,133...1,330
Производительность вакуумной системы, л/с.....	70000
Наибольшие размеры заготовки, м:	
длина.....	4,0
диаметр.....	0,82
ширина/толщина.....	0,86/0,60
Количество загрузочных устройств, шт.....	2
Количество контейнеров на загрузку, шт.....	4...6
Размер слитков, м:	
диаметр.....	0,82; 0,64; 0,40; 0,38
длина.....	4,0
ширина/толщина.....	1,31/0,19; 1,31/0,26; 1,31/0,42
Габариты установки, м.....	20X20X16

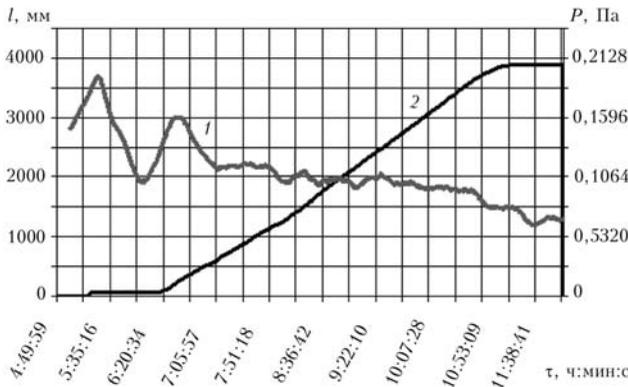


Рис. 5. Изменение вакуума (1) и длины l слитка (2) в процессе плавки

Проектная мощность производства одной установки ВТ01 составляет 2500 т титановых слитков и слябов в год.

Конструктивно электронно-лучевая установка ВТ01 состоит из герметичной камеры диаметром 3 м, к которой пристыкованы в верхней части семипушечный электронно-лучевой нагреватель (ЭЛН) на тележке; в нижней — модуль технологической оснастки и камера слитка с механизмом вытягивания на подвижной платформе; с двух сторон горизонтально расположены две загрузочные камеры с механизмами подачи и сменными контейнерами для шихты.

Для удобства обслуживания камеры в промежутках между плавками, а также для выгрузки крупнотоннажных слитков ЭЛН и камера слитка разрезаются относительно плавильной камеры. Предусмотрена возможность быстрой замены технологического модуля, объединяющего в единый блок кристаллизатор и медный холодный под, при переходе на другой типоразмер слитков, а также установка двух кристаллизаторов для параллельной отливки двух слитков одновременно. Схема установки ВТ01 приведена на рис. 4.

Такая конструкция установки ВТ01 обеспечивает хорошую функциональность, надежность и экономичность работы, при этом до минимума сокращается время непроизводительных простоев.

В процессе ЭЛП шихты, содержащей губчатый титан, основные трудности возникают из-за разбрызгивания металла и интенсивного газовыделения, нарушающих устойчивую работу электронных пушек.

Хорошей стабильностью в таких условиях плавки отличаются электронно-лучевые пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [4]. Ряд мощ-

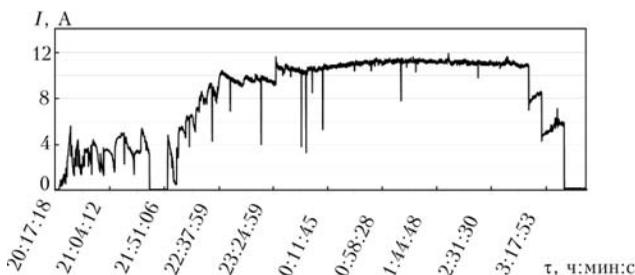


Рис. 6. Изменение тока электронного луча во время плавки

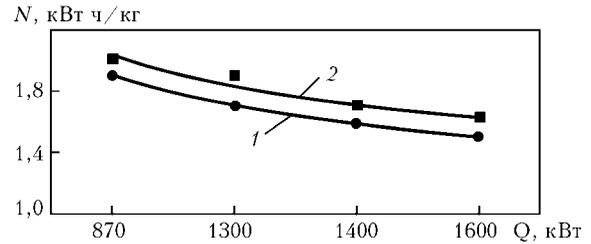


Рис. 7. Зависимость расхода N электроэнергии от подводимой мощности Q ; здесь и на рис. 8, 9: 1 — слиток диаметром 825 мм; 2 — прямоугольный слиток 190×1325 мм

ных пушек ВТР (единичной мощностью 400 и 600 кВт) созданы в МК «АНТАРЕС» при участии специалистов Киевского национального технического университета Украины. Особенность разработанных пушек ВТР состоит в том, что для их стабильной работы не требуется высокий вакуум. Уровень рабочего давления газов в таких пушках выше, чем остаточного в объеме плавильной камеры установки и находится в диапазоне 0,133... 6,660 Па.

Применение мощных электронных пушек ВТР в электронно-лучевых установках ВТ01 позволяет получать крупнотоннажные слитки титана при высоких скоростях плавления, сравнимых с ВДП в промышленных условиях. Благодаря этому существенно снижаются энергетические затраты, потери металла из-за испарения, упрощается задача получения слитков титана и его сплавов требуемого прецизионного состава.

Разработанные пушки ВТР отличаются простой конструкции и обслуживания, изготовлены из недефицитных материалов. Катод выполнен из алюминия, срок наработки которого превышает 1000 ч.

Для реализации принятой технологической схемы плавки установка ВТ01 содержит семь электронных пушек ВТР, размещенных на крышке камеры группами по функциональному принципу: по две на плавку каждой заготовки; одна — для поддержания слива на холодном подду; две — для нагрева металла в кристаллизаторе.

Каждая пушка имеет отдельный источник высоковольтного питания мощностью 630 кВт, собранный на тиристорных преобразователях. При такой схеме питания колебательные процессы при разрядах в отдельных пушках (в промежутке катод-анод) не влияют на стабильную работу других пушек.

Управление электронными лучами по нагреваемой поверхности выполнено от микропроцессора

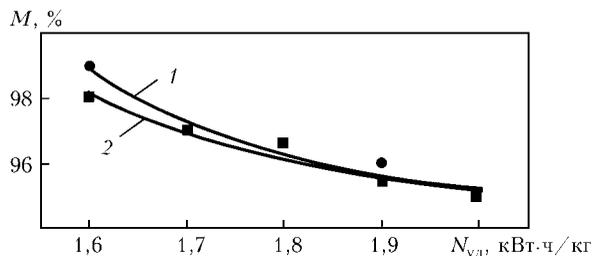


Рис. 8. Зависимость выхода годного металла M от удельного расхода $N_{уд}$ электроэнергии

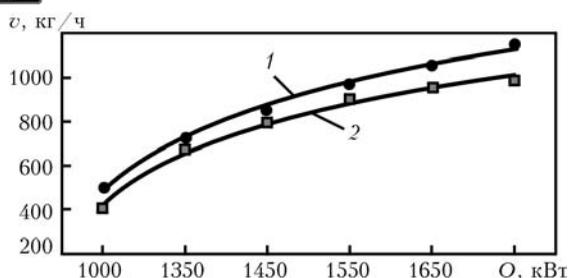


Рис. 9. Зависимость скорости v плавки от подводимой мощности

верхнего уровня и контроллеров с набором программ нижнего уровня. Программное распределение мощности и траектории электронных лучей создает требуемую оптимальную конфигурацию зон нагрева. Безопасный ход лучей ограничивается в пределах оснастки.

Установка ВТ01 оснащена системой контроля и записи параметров процесса плавки. Текущие параметры от массива датчиков регистрируются компьютером с определенной периодичностью и выводятся на печать в виде протокола плавки. На рис. 5, 6 представлены диаграммы записи изменения длины слитка, вакуума и электрических режимов пушек во время плавки.

Диаграмма вакуума показывает, что в начальный период происходит повышение давления в камере, обусловленное выделением адсорбированных газов с экранов и внутренних стенок камеры. При выходе на стационарный режим вакуум восстанавливается, стабилизируется работа электронных пушек (рис. 6), скорость плавки постоянная.

Другим важным фактором, обеспечивающим экономичный процесс получения слитков, является холодноподовый переплав на встречной подаче двух заготовок одновременно. Развитая поверхность плавления каждой заготовки создает условие для взаимного их «экранирования» и «аккумуляции» части лучистой энергии, а также продуктов разбрызгивания и испарения титана. При этом уменьшаются энергетические затраты на выплавку слитков и безвозвратные потери металла. Зависимость энергетических и массовых показателей про-

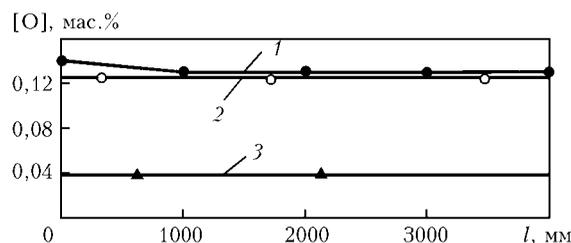


Рис. 10. Распределение кислорода в прямоугольном слитке 190×1325 мм, легированном TiO₂: 1 – экспериментальное; 2 – расчетное; 3 – в губчатом титане

цесса плавки губчатого титана при получении слитков диаметром 825 мм и прямоугольных 190×1325 мм приведена на рис. 7 и 8.

Так, при увеличении подводимой мощности электронного нагрева на плавку и росте скорости плавки происходит снижение расхода электроэнергии на единицу продукции, а выход годного при этом возрастает (рис. 9).

Химический состав слитков титана, полученных из губки марок ТГ100–ТГ130, приведен в таблице. По содержанию контролируемых элементов титан соответствует маркам Grade1 и Grade2 ASTM B348.

Низкое содержание кислорода в слитках, полученных из губчатого титана, не всегда является оправданным с точки зрения потребителя, прежде всего из-за механической прочности. В то же время кислород при определенном содержании является эффективным упрочнителем титана. Для повышения прочностных свойств титана коммерческой чистоты разработана эффективная технология его легирования. Добавки непиговой двуокиси титана TiO₂ вводят на этапе подготовки брикетов из губки.

Результаты анализа кислорода в прямоугольном слитке, легированном кислородом, приведены на рис. 10. Содержание кислорода соответствует расчетному 0,13 мас. % при исходном содержании в губке 0,038...0,042 мас. %. Распределение кислорода по длине слитка практически равномерное. Выполнен ряд заказов по изготовлению титановых слитков массой 9 т с содержанием кислорода 0,22...0,24 %.

Химический состав слитков, полученных из губчатого титана, мас. %

Размер слитка, мм	Место отбора пробы	Fe	O	N	H	C	Остаток (max)	
							Каждого	Всего
Ø830	Голова	0,05	0,04	0,011	0,0017	0,01	≤0,1	≤0,4
	Дно	0,05	0,05	0,012	0,0018	0,01	≤0,1	≤0,4
Ø640	Голова	0,05	0,05	0,011	0,0019	0,01	≤0,1	≤0,4
	Дно	0,05	0,06	0,012	0,0019	0,01	≤0,1	≤0,4
190×1325	Голова	0,05	0,04	0,010	0,0015	0,01	≤0,1	≤0,4
	Дно	0,05	0,05	0,011	0,0018	0,01	≤0,1	≤0,4
ASTM B 348-00	Не более	0,30	0,25	0,030	0,0100	0,10	0,1	0,4

Примечание. Титан – основа.

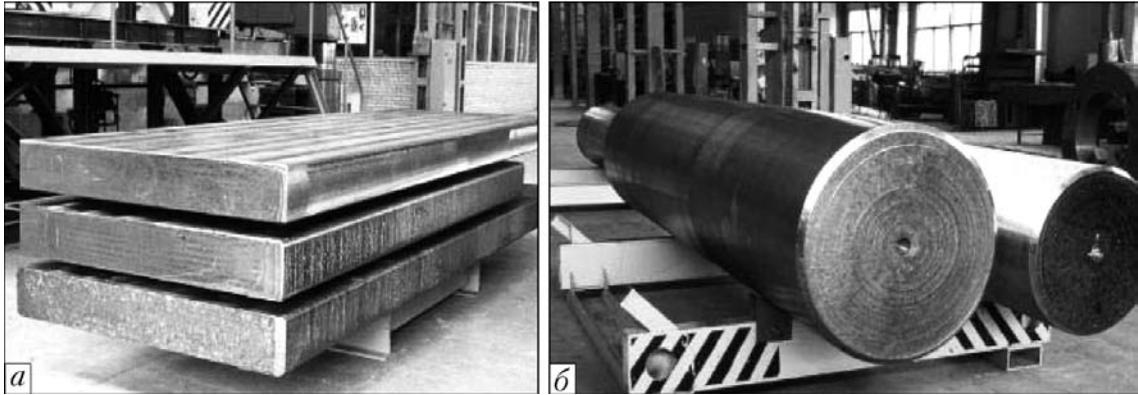


Рис. 11. Внешний вид слитков, произведенных на МК «АНТАРЕС»: а — прямоугольного сечения 190×1325 мм; б — круглого сечения диаметром 825 мм

В состоянии поставки слитки и слябы имеют обработанную поверхность. Цилиндрические слитки обтачивают на токарном станке 1А660, а прямоугольные — фрезеруют на станке 6М616.

Механическую обработку поверхности производят твердосплавными инструментами без применения охлаждающей жидкости, что не приводит к загрязнению образующейся стружки. Мелкие дефекты удаляют абразивной зачисткой. По согласованию с заказчиком, торцы слитков обрезают.

С целью снижения производственных затрат и расхода металла для порезки применяют ленточно-пильный станок производства фирмы «Everising» (Тайвань), позволяющий производить высокопроизводительную резку слитков. Ширина реза 1,6 мм. Максимальные возможности станка относительно разрезаемой заготовки — 1300×1300 мм.

Образующиеся после механической обработки титановые отходы в виде стружки и обрезей повторно вовлекаются в переработку при выплавке слитков. Перед использованием стружку измельчают и брикетируют.

Обработанные слитки и слябы подвергают 100%-му ультразвуковому контролю на наличие внутренних дефектов.

Качество титановых слитков контролируют в заводской лаборатории путем проведения анализа химического состава металла на соответствие требованиям заказчика и норм стандартов. Лаборатория оснащена приборами для спектрального анализа

«Spectromax» фирмы «Spectra» (Германия) и аппаратурой для анализа содержания газов (кислорода, азота, водорода) и углерода фирмы «Leco» (США).

С начала эксплуатации на установках переплавлено несколько тысяч тонн титанового сырья. При этом профиль и сортамент полученных слитков следующий: цилиндрические диаметром 825 и 640 мм, прямоугольные 190×1325; 250×1325; 420×1325 мм. Внешний вид слитков приведен на рис. 11.

В планах развития МК «АНТАРЕС» выполняется проект по изготовлению новой, более производительной установки для получения титановых слитков и слябов массой до 14 т.

1. *Состояние* технологии производства слитков титановых сплавов за рубежом // М. Н. Мусатов, А. Ш. Фридман, В. А. Фролов и др. // *Технология легких сплавов*. — 1990. — № 8. — С. 60–75.
2. *Froes F. H., Senkov O. N. Titanium today and tomorrow* // *Electron-beam melting and refining state of the art, 1977*. — P. 2–27.
3. *Maximelt II — titanium hearth technologies for new electron-beam furnace* // М. Ritchie, А. Mitchell, С. К. Rhee, S. L. Cockeroff // *Melting and Refining State of the art, 1997*. — P. 252–261.
4. *Электронно-лучевая* плавка титановой губки с применением пушек высоковольтного тлеющего разряда // А. Л. Тихоновский, Н. К. Лашук, А. А. Тур и др. // *Пробл. специальной электротехнологии*. — 1993. — № 1. — С. 70–73.

МК «АНТАРЕС», Киев

Поступила 16.02.2010