



УДК 669.187.526:51.001.57

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛЫХ ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ МЕТОДОМ ЭЛПЕ

**Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб,
Г. В. Жук, С. В. Ахонин, В. А. Березос**

Разработана технология производства толстостенных полых слитков большого диаметра методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. С использованием математической модели подобраны оптимальные режимы плавки. Исследовано качество полученных слитков.

Technology of production of thick-walled hollow large-diameter ingots using the method of electron beam cold hearth melting was developed. Using a mathematical model the optimum melting conditions were selected. Quality of produced ingots was examined.

Ключевые слова: *полый слиток; электронно-лучевая плавка; промежуточная емкость; математическое моделирование; сплавы титана; трубы большого диаметра*

Трубные заготовки из титановых сплавов традиционно получают либо механической обработкой катаных прутков, либо прессовой прошивкой цилиндрических слитков, выплавленных с помощью вакуумно-дугового переплава (ВДП) и прошедших предварительную механическую обработку [1]. При этом пластическая обработка трудоемкая и требует содержания значительного парка кузнечно-прессового оборудования. Механическая обработка как слитка ВДП, так и трубной заготовки приводит к значительным потерям металла (до 15 %).

В последнее время предпринят ряд успешных попыток производства титановых труб из слитков электронно-лучевой плавки (ЭЛП) [2, 3]. Слитки выплавливаются как в глухонный кристаллизатор с применением электромагнитного перемешивания, так и с использованием промежуточной емкости. Качество полученных труб из металла ЭЛПЕ соответствует требованиям стандартов [2, 3]. Вместе с тем, трубные заготовки получают методами сверления и прошивки катаных прутков.

Кардинально новым подходом в производстве трубной заготовки, с точки зрения экономии материала и сокращения технологических операций, является получение полых слитков методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Использование технологии ЭЛПЕ при изготовлении титановых слитков позволяет не толь-

ко практически полностью разделить процессы плавления и кристаллизации и тем самым управлять формированием структуры полого слитка, но и удалять из титана неметаллические включения и такую вредную примесь внедрения, как водород. Традиционная технология ВДП не обеспечивает гарантированного удаления таких включений в полном объеме. Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью позволяет перегреть поверхность расплава до температур выше, чем при ВДП, и дает возможность выдерживать металл в жидком состоянии любое необходимое время [4, 5].

Анализ результатов экспериментальных плавки показал, что за время пребывания жидкого металла в промежуточной емкости тяжелые включения типа карбидов вольфрама и молибдена оседают на дно и накапливаются в гарнисаже, в то время как более легкие тугоплавкие включения нитрида титана и насыщенные азотом частицы α -титана растворяются в процессе выдержки расплава в промежуточной емкости в условиях нагрева поверхности расплава электронными лучами [6].

С целью отработки технологии получения полых титановых слитков в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины были проведены экспериментальные плавки на электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью УЭ-182М. В качестве формирующего устройства использовали проходной кристаллизатор с центральным дорном. Процесс получения полых слитков осуществляли следующим образом.

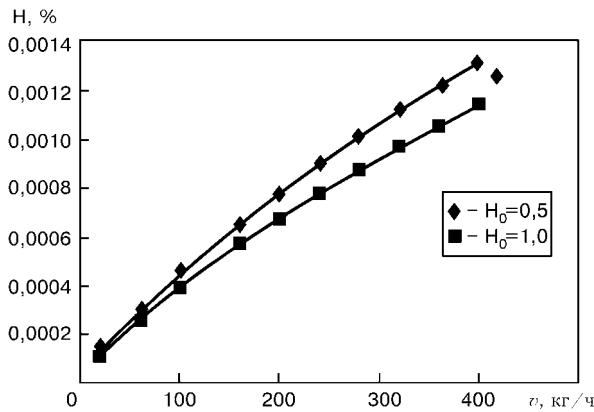


Рис. 1. Зависимость содержания водорода в полом слитке от скорости плавки

Исходную заготовку загружали в печь и герметизировали ее. При достижении рабочего давления в камерах плавки 10^{-2} Па и электронно-лучевого нагревателя 10^{-3} Па в определенной последовательности включали электрические блоки питания и управления электронно-лучевым нагревателем. Механизмом горизонтальной подачи переплавляемую заготовку подавали в зону действия электронных лучей. Повышая ток накала катодов, увеличивали мощность электронных лучей и прогревали заготовку. После прогрева заготовку плавил в медную водоохлаждаемую промежуточную емкость, где расплав металла накапливался и рафинировался от вредных примесей, газов и неметаллических включений. Из промежуточной емкости, по мере накопления, жидкий металл порциями сливали по сливному носку в формирующий кристаллизатор, состоящий из внешней обечайки и внутреннего дорна, изготовленных из водоохлаждаемой меди, где формировался полый слиток. По мере наплавления слитка его вытягивали из кристаллизатора посредством штока механизма вытягивания.

В процессе плавки электронные лучи перемещаются по верхнему торцу формируемого слитка и зоне контакта расплава с рабочей поверхностью дорна и кристаллизатора, компенсируя теплоотвод к кристаллизатору и дорну, что положительно сказывается на структуре получаемой заготовки. Одновременно развертка луча по свободной поверхности расплава обеспечивает заданный температурный режим в металлической ванне. Такой характер обогрева слитка предотвращает образование усачной раковины в его верхней части, способствует растеканию поступающего металла и формированию качественной боковой поверхности. Процесс продолжается до полного сплавления исходной заготовки и получения полого слитка необходимой длины. Мощность и скорость плавки поддерживаются постоянными.

Для изучения закономерностей рафинирования титана от водорода при ЭЛПЕ полых слитков использовали математическую модель десорбции водорода при выплавке этим же методом сплошных слитков [7]. При этом в математическую модель были внесены поправки на наличие дорна, который

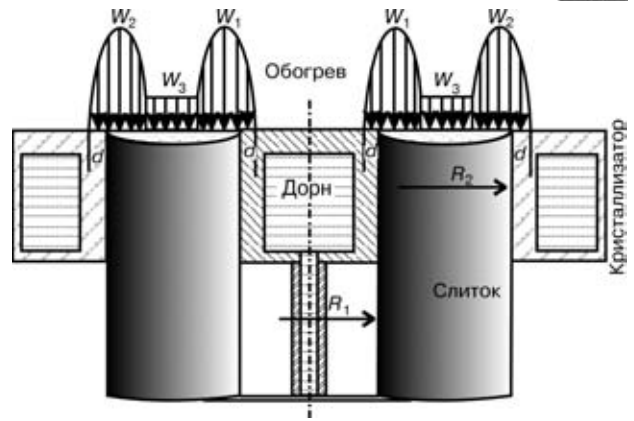


Рис. 2. Модель процесса формирования полого слитка при ЭЛПЕ

формирует внутреннюю поверхность слитка. Построенная на основе материального баланса водорода в трех зонах рафинирования металла (оплавляемый торец расходуемой заготовки, а также ванна жидкого металла в промежуточной емкости и в кристаллизаторе), математическая модель устанавливает зависимость эффективности рафинирования от технологических параметров плавки и кинетических констант водорода в титане.

Обработка результатов экспериментальных плавок нелегированного титана позволила получить численные значения коэффициента массопереноса водорода в жидком титане β_H и константы скорости поверхностной реакции молизации водорода k_2^H в титане:

$$\beta_H = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}; \quad k_2^H = 6,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}/(\% \cdot \text{с}). \quad (1)$$

Расчеты по математической модели для полого слитка позволили установить зависимость эффективности рафинирования титана от водорода при ЭЛПЕ при различных скоростях v плавки (рис. 1).

Анализ полученных зависимостей показывает, что степень рафинирования монотонно возрастает при уменьшении скорости плавки. Это обусловлено увеличением времени выдержки жидкого металла в вакууме. Установлено, что рафинирование металла при выплавке полых слитков подчиняется тем же закономерностям, что и при получении слитков сплошного сечения.

Таким образом, установлено, что требуемый уровень содержания водорода при ЭЛПЕ полых слитков обеспечивается в широком диапазоне значений технологических параметров, и оптимизацию технологического процесса следует осуществлять с точки зрения формирования необходимой структуры полого слитка и себестоимости его производства.

Для определения оптимальных теплофизических условий формирования слитка были проведены расчеты в рамках математической модели тепловых процессов в цилиндрическом слитке [8], адаптированной для случая полого слитка (рис. 2). В используемой модели жидкий металл сливается в кристаллизатор порциями, а слиток из него вытягивается периодически. Поверхность слитка обогревается тремя электронными лучами, причем

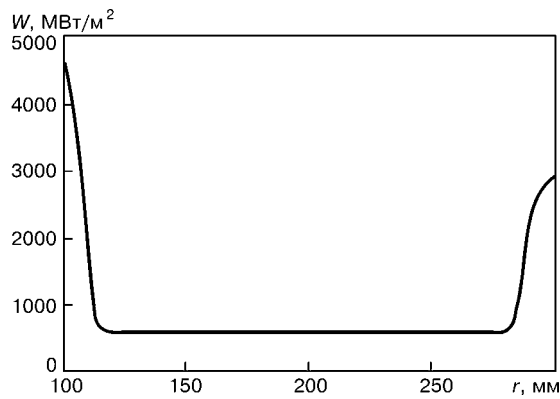


Рис. 3. Распределение удельной мощности по торцевой поверхности слитка

мощность W_3 одного из них равномерно распределена в центральной зоне ($R_2 < r < R_1$), а двух других W_1 и W_2 сконцентрирована в периферийных зонах. В математической модели контролируемые технологическими параметрами являются: мощность лучей W_1 , W_2 и W_3 , периодичность заливки τ , высота сливаемой в кристаллизатор порции h , величина смещения d периферийного луча от центра на стенку кристаллизатора.

Процесс переноса тепла описывается уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат (r, ϕ, z) для случая осевой симметрии. Ось oz системы координат совпадает с осью слитка (ось симметрии), а ось or — с радиальным направлением. Начало координат задано на нижнем основании слитка.

Уравнение теплопроводности в этом случае принимает вид

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}), \quad (2)$$

$R_2 < r < R_1; \quad 0 < z < s(t); \quad t > 0,$

где c — удельная теплоемкость; ρ — плотность; λ — коэффициент теплопроводности; R_1 и R_2 — внешний и внутренний радиусы слитка; $s(t)$ — текущая высота слитка. При этом граничное условие на внутренней поверхности слитка — теплообмен со стенкой дорна. В зависимости от того, в каком отношении находится температура поверхности слитка с некоторой критической температурой T_k (при которой поверхность слитка отделяется от стенки кристаллизатора), теплообмен слитка с кристаллизатором осуществляется по разным законам.

При $T < T_k$ — по закону Стефана–Больцмана:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{cp}^4), \quad (3)$$

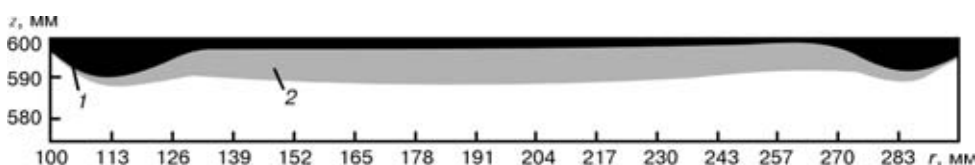


Рис. 4. Температурное поле в полой слитке титана внешним диаметром 600 и внутренним 200 мм: 1 — $T > 1898$ К (жидкая ванна); 2 — $T = 1868 \dots 1898$ К (твердожидкая область)



Рис. 5. Внешний вид оплавленного полого слитка титана внешним диаметром 600 и внутренним 200 мм

где ε — степень черноты; σ — постоянная Стефана–Больцмана; T_{cp} — температура стенки кристаллизатора.

При $T > T_k$ — по закону Ньютона–Рихмана:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha (T - T_{cp}), \quad (4)$$

где α — коэффициент теплопередачи между слитком и кристаллизатором.

Скорость плавки была принята равной 100 кг/ч, периодичность заливки порций жидкого металла — 3 мин. В результате проведенных расчетов в качестве оптимального было выбрано распределение мощности электронных лучей в кристаллизаторе (рис. 3), обеспечивающее мелкую жидкую ванну на всей поверхности слитка (рис. 4). При таком распределении мощности достигается равномерное растекание заливаемых порций жидкого металла и практически плоский фронт кристаллизации, способствующий образованию в слитке однородной структуры из равноосных зерен.

С использованием рассчитанного режима электронно-лучевого обогрева полого слитка в кристаллизаторе на электронно-лучевой установке УЭ-182М были выплавлены опытные полые слитки титанового сплава ВТ1-0 внешним диаметром 600 мм, внутренним 200 мм и длиной 2 м (рис. 5). Внешняя поверхность слитков была оплавлена электронным лучом [9].

Для выявления в полых титановых слитках внутренних дефектов в виде неметаллических включений, а также пор и несплошностей использовали метод ультразвуковой дефектоскопии (УЗК). Исследования проводили с применением прибора УД-11УА эхо-импульсным методом при контактном варианте контроля. Рабочая частота УЗК составляла

2,5 и 5 МГц, что обеспечивало максимальное соотношение «сигнал/шум».

Исследование полых слитков проводили путем последовательного ручного сканирования боковой поверхности



вдоль образующей цилиндра (параллельно продольной оси). Шаг между линиями сканирования составлял 10... 20 мм. Ось излучения соответствовала радиусу цилиндра. Сканированию подвергалась вся боковая поверхность полого слитка, что обеспечивало контроль всего его объема. Наблюдали множественные отражения малой амплитуды, что типично для литого металла и является результатом отражения сигнала от границ зерен. Анализ не выявил отражений, которые можно было бы интерпретировать как крупные неметаллические включения, поры, усадочные раковины.

Таким образом, УЗК показал, что в исследованных полых титановых слитках отсутствуют несплошности, неметаллические включения размером более 1 мм, а также плотные скопления более мелких включений. Эти результаты были подтверждены визуальными исследованиями травленого фрагмента полого слитка (рис. 6). Структура слитка однородная, состоящая из равноосных зерен размером 10... 30 мкм.

Таким образом, в ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мировой практике по разработанной технологии ЭЛПЕ получен толстостенный полый титановый слиток большого диаметра. Применение такой технологии производства полых титановых слитков и электронно-лучевого оплавления их поверхности позволяет значительно снизить расход металла и сократить количество технологических операций.

1. *Полуфабрикаты* из титановых сплавов / Н. Ф. Аношкин, М. З. Ерманюк, Г. Д. Агарков и др. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
2. *Получение* титановых труб из заготовок электронно-лучевой плавки с использованием отходов / Т. Н. Буряк, В. С. Вахрушева, С. В. Ладохин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 3. — С. 24–29.
3. *Калинюк А. Н., Козловец О. Н., Ахонин С. В.* Производство полуфабрикатов из титановых слитков, полученных методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // Там же. — 2002. — № 2. — С. 25–28.

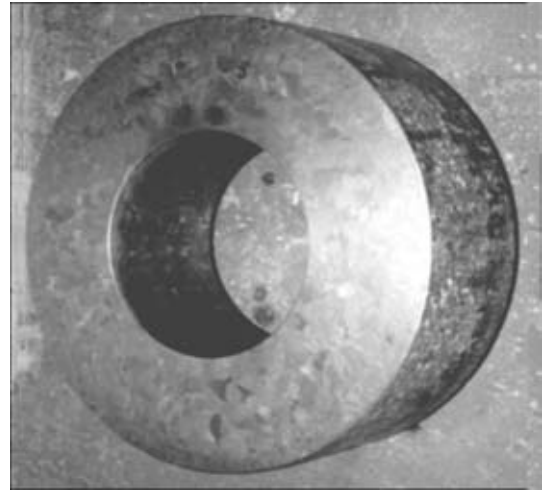


Рис. 6. Фрагмент полого слитка после травления

4. *Развитие* технологии электронно-лучевой плавки титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, В. Н. Замков и др. // Там же — 2000. — № 2. — С. 34–40.
5. *Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В.* Перспективные технологии электронно-лучевой плавки титана // Титан. — 2003. — № 2. — С. 20–25.
6. *Ахонин С. В.* Математическое моделирование процесса растворения включений TiN в расплаве титана при ЭЛП // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 1. — С. 20–24.
7. *Математическое* моделирование процессов рафинирования металлов от газов при электронно-лучевом переплаве с промежуточной емкостью / С. В. Ахонин, Н. П. Тригуб, А. Н. Калинюк, С. В. Цвелодуб // Там же. — 1995. — № 2. — С. 36–42.
8. *Жук Г. В., Ахонин Л. В., Тригуб Н. П.* Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ // Там же. — 1998. — № 2. — С. 21–25.
9. *Электронно-лучевое* оплавление слитков титана / А. Н. Пикулин, Г. В. Жук, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 17–19.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 09.06.2004