

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ

Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, С. В. Ахонин, В. А. Березос

Разработана технология производства полых слитков циркониевого сплава методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Методами математического моделирования определены оптимальные технологические параметры плавки. Исследованы химический состав и механические свойства трубных заготовок.

Technology for production of hollow ingots from zirconium alloy using the method of electron beam cold hearth melting has been developed. Optimum technological parameters of melting were determined by the methods of mathematical simulation. Chemical composition and mechanical properties of tubular billets were investigated.

Ключевые слова: трубная заготовка; электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью; математическое моделирование; сплав циркония

Трубные заготовки из циркониевых сплавов традиционно получают способом прошивки цилиндрических слитков, выплавленных с помощью вакуумно-дугового переплава (ВДП) и прошедших предварительную механическую обработку. При этом пластическая обработка трудоемкая и требует содержания значительного парка кузнечно-прессового оборудования.

С целью упростить существующую технологию и сократить потери металла при механической обработке в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология выплавки полых трубных заготовок способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) по следующей схеме. Исходный металл переплавляется в промежуточную емкость. Из промежуточной емкости непрерывно или порциями жидкий металл поступает в формирующий кристаллизатор (рис. 1), который состоит из внешней обечайки и внутреннего дорна, изготовленных из меди с каналами охлаждения. По мере наплавления слиток вытягивают из кристал-



Рис. 1 Процесс получения полых слитков

лизатора. В процессе плавки электронные лучи перемещаются по верхнему торцу формируемого слитка в зоне контакта расплава с рабочей поверхностью дорна и кристаллизатора. Одновременно развертка луча по свободной поверхности расплава обеспечивает заданный температурный режим в металлической ванне. Такой характер обогрева слитка предотвращает образование усадочной раковины, способствует растеканию поступающего металла по поверхности слитка в кристаллизаторе [1].

Для определения температурных условий формирования полых трубных заготовок использовалась разработанная математическая модель [2]. Модель основана на решении уравнения теплопроводности Фурье в области полого слитка:

$$C_V \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda (T) \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda (T) \frac{\partial T}{\partial z}),$$

$$R_1 < r < R_2; \quad 0 < z < H_{c.l}(t); \quad t > 0,$$

где C_V — теплоемкость; λ — теплопроводность; R_1, R_2 — внутренний и внешний радиусы слитка; $H_{c.l}(t)$ — текущая высота слитка. Основными параметрами математической модели (и технологического процесса) являются производительность плавки (скорость наплавления слитка), тепловая мощность, используемая для обогрева верхнего торца слитка, и закон ее распределения $q(r, t)$ по обогреваемой поверхности (поверхностная плотность теплового потока).

Закон распределения определяется требованиями, предъявляемыми к глубине и форме металлической ванны. В нашем случае таковыми требованиями являются минимальная глубина (тонкая

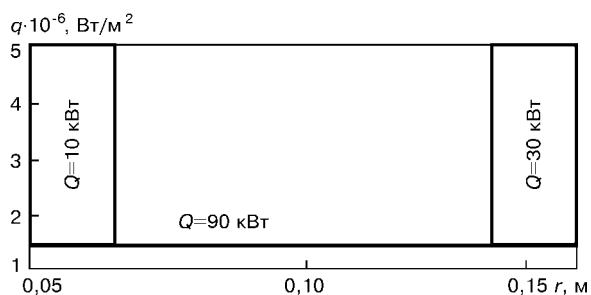


Рис. 2. Схема распределения тепловой мощности по обогреваемой поверхности слитка

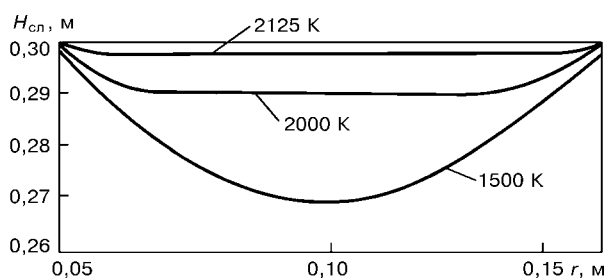


Рис. 3. Изотермы температурного поля полого слитка

пленка жидкого металла) и цилиндрическая форма ванны (дно ванны плоское). Исходя из этого, рассчитывали $q(r, t)$ для полого циркониевого слитка наружным диаметром 0,3 м и внутренним 0,1 м при квазистационарном режиме плавки.

Расчеты показывают, что для компенсации потерь тепла излучением поверхности при ее температуре 2200 К необходима поверхностная плотность теплового потока $q = 7 \cdot 10^5$ Вт/м². Такая же величина q требуется для компенсации потока тепла в глубь слитка за счет кондуктивной теплопроводности. Тогда интегральный расход тепла Q на излучение и отвод в глубь слитка составит 90 кВт. Поверхностная плотность теплового потока у стенок дорна и кристаллизатора в 3–4 раза больше, чем в остальной зоне. Ширина зоны (кольца) с повышенной плотностью теплового потока при плавке равнялась диаметру фокального пятна электронного луча — 0,02 м. В эту зону необходимо подать дополнительную мощность $Q = 40$ кВт (30 кВт у стенки кристаллизатора и 10 кВт у стенки дорна). Тогда общий тепловой поток составит 130 кВт. При нагреве циркония электронным лучом эффективный КПД составляет 80...85 % [3]. С учетом этого мощность электронно-лучевых пушек, используемых для нагрева верхнего торца выплавляемого слитка, составляет 160...180 кВт. Проведенный расчет режима обогрева иллюстрирует рис. 2. При этом, как видно из температурного поля слитка (рис. 3), глубина жидкой ванны на поверхности слитка минимальна.

Экспериментальные плавки полых слитков циркония проводили в соответствии с технологией, описанной выше, с использованием рекомендованного режима их обогрева в кристаллизаторе. Анализ структуры полых слитков показывает, что металл заготовки плотный, без дефектов литейного происхождения. Направление роста кристаллов вертикальное с весьма незначительным углом разориентации отдельных кристаллов относительно верти-

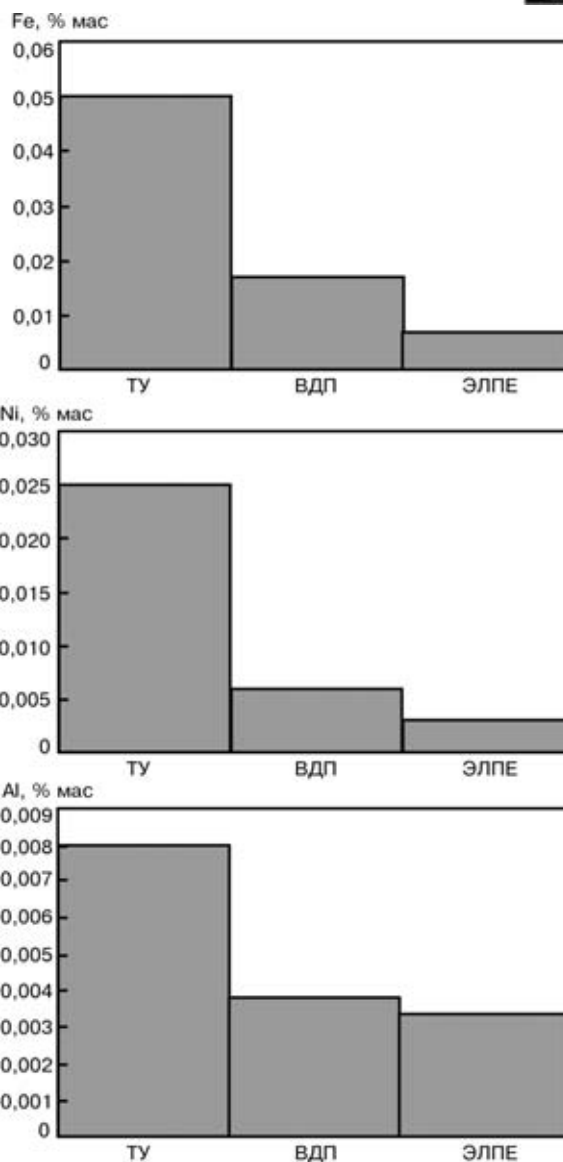


Рис. 4. Содержание железа, никеля и алюминия в цирконии после ЭЛПЕ и ВДП

кальной оси слитка. Так как процесс получения полых слитков циркония методом электронно-лучевой плавки осуществляют в высоком вакууме, то происходит эффективная очистка циркония от железа, никеля и алюминия. При этом степень рафиниро-



Рис. 5. Внешний вид полого слитка после оплавления



Механические свойства труб диаметром 88×79,5 мм

Трубная заготовка	t = 20 °C			t = 350 °C		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
ЭЛПЕ	<u>620... 700</u> 656	<u>435... 495</u> 472	<u>21,5... 26,0</u> 23,7	<u>375... 465</u> 433	<u>255... 345</u> 309	<u>19,0... 25,0</u> 20,75
ВДП	<u>540... 700</u> 611	<u>360... 520</u> 428	<u>19... 31</u> 25,6	<u>320... 470</u> 381	<u>200... 340</u> 257	<u>19... 34</u> 27,2

Примечание. Над чертой приведены минимальные и максимальные значения, под чертой — средние

вания металла от этих примесей при ЭЛПЕ выше, чем при вакуумно-дуговом переплаве (рис. 4). Твердость металла слитков находится в пределах требований ТУ — 75... 85 HV.

Слитки, полученные способом ЭЛПЕ, имеют поверхностные дефекты в виде гофр, присущие переплавному процессам. Для их устранения обычно применяют механическую обработку (обдирку), вследствие чего потери металла составляют до 15 % [4]. С целью сократить потери металла в стружку вместо механической обработки применяли технологию оплавления наружной поверхности слитков электронным лучом [5]. При оплавлении поверхности трубной заготовки угловую скорость вращения варьировали в пределах 0,003... 0,005 рад/с, поверхностную плотность теплового потока — $(0,8... 1,2) \cdot 10^7$ Вт/м². При таких режимах поверхностный слой проплавляется на глубину 0,003... 0,008 м, что обеспечивает полное устранение поверхностных дефектов (рис. 5).

Исследования механических свойств труб, изготовленных из выплавленных по описанной технологии трубных заготовок, показали, что их прочностные свойства, по сравнению со штатными, несколько выше и более стабильны (таблица). Установлено также снижение относительной деформации и скорости ползучести при испытаниях в условиях, близких к рабочим.

Выводы

1. Технология получения циркониевых трубных заготовок методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью и применение электронно-лучевого оплавления их поверхности позволяют значительно снизить расход металла и сократить количество технологических операций. При этом качество трубных заготовок ЭЛПЕ полностью отвечает требованиям технических условий.

2. Применение метода математического моделирования для изучения теплофизических условий формирования трубных заготовок позволило оптимизировать режим электронно-лучевого нагрева слитка при незначительном количестве натуральных экспериментов.

1. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
2. *Жук Г. В., Ахонин Л. В., Тригуб Н. П.* Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1998. — № 2. — С. 21-25.
3. *Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. — М: Машиностроение, 1978. — 239 с.
4. *Шуравлев М. В.* Методы зачистки поверхностных дефектов металла. — М.: Металлургиздат, 1953. — 56 с.
5. *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 27.04.2004