



УДК 669.187.526:51.001.57

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ОПЛАВЛЕНИЕ СЛИТКОВ ЦИРКОНИЯ

Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, А. Н. Пикулин

В данной работе представлена технология электронно-лучевого оплавления цилиндрических слитков циркония и экспериментально определены оптимальные технологические режимы. Металлографический анализ слитков показал, что оплавленный слой характеризуется отсутствием макропор, несплошностей и других дефектов литейного происхождения.

This article presents technology of electron beam surface melting of cylindrical zirconium ingots and experimental determination of optimum technological parameters. Metallographic analysis of ingots showed that surface melted layer is characterized by the absence of macropores, discontinuities and other defects of casting origin.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое оплавление; цирконий; слиток

Одним из заключительных этапов производства высококачественных литых заготовок из циркония является переплав в вакуумно-дуговой или электронно-лучевой установке [1]. При этом поверхностный слой получаемых слитков имеет различного рода дефекты. Для их устранения обычно выполняют механическую обработку поверхности слитков и заготовок, что приводит к значительным потерям металла (от 5 до 15 % массы зачищаемого слитка) в виде стружки или металлоабразивной пыли [2].

Для сокращения потерь металла и замены механической обработки в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология оплавления боковой поверхности слитков электронным лучом [3] и создано соответствующее оборудование для ее реализации [4].

Сущность данного метода заключается в нагреве и расплавлении поверхностного слоя слитка одновременно по всей длине электронными лучами. За счет сканирования электронного луча вдоль образующей слитка протяженность зоны оплавления одной пушкой составляла 0,2...0,3 м, тогда как ширина ванны жидкого металла не превышала 0,02 м. В процессе оплавления слиток вращается вокруг продольной оси и, таким образом, наведенная вдоль образующей слитка ванна жидкого металла перемещается по всей его боковой поверхности.

Электронно-лучевая обработка поверхностного слоя слитков и заготовок имеет определенные пре-

имущества: наличие в печном пространстве вакуума как защитной и рафинирующей среды, высокая плотность подводимой энергии, прецизионность, простота контроля и управления технологическими параметрами.

Для отработки оптимальных технологических параметров процесса оплавления слитков циркония диаметром 360 мм была проведена серия опытных плавов с оперативным измерением следующих параметров: мощность электронно-лучевого нагрева, размер зоны оплавления, линейная скорость оплавления, время оплавления, остаточное давление и натекание в камере плавки. Всего было осуществлено более 60-ти опытных плавов, технологические параметры некоторых из них приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Основные режимы опытных плавов слитков циркония**

| Технологическая операция | Время операции, мин | Удельная мощность нагрева, кВт/см <sup>2</sup> | Линейная скорость вращения слитка, мм/мин |
|--------------------------|---------------------|--|---|
| Предварительный нагрев   | 23                  | 0,66   | 51,3                                      |
| Оплавление               | 34                  | 1,20   | 33,2                                      |
| Предварительный нагрев   | 22                  | 0,56   | 51,2                                      |
| Оплавление               | 33                  | 1,29   | 34,2                                      |
| Предварительный нагрев   | 22                  | 0,63   | 50,9                                      |
| Оплавление               | 20                  | 1,44   | 57,2                                      |
| Предварительный нагрев   | 22                  | 0,64   | 40,9                                      |
| Оплавление               | 22                  | 1,80   | 51,3                                      |

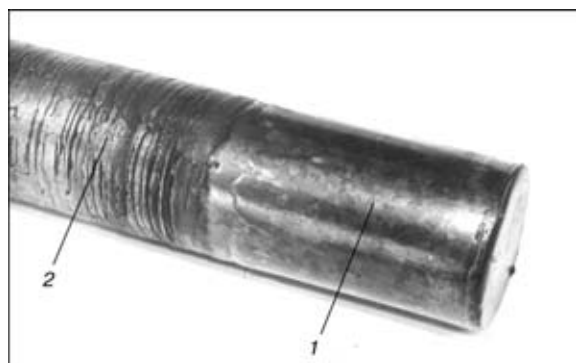


Рис. 1. Внешний вид слитка циркония с оплавленной (1) и неоплавленной (2) боковой поверхностью

В процессе оплавления в камере плавки поддерживали вакуум  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  мм рт. ст., натекание в вакуумную камеру установки не превышало  $10 \text{ л} / (\text{мкм}\cdot\text{с})$ . Ширина ванны жидкого металла на боковой поверхности слитка циркония составляла 15 мм.

Для сравнения качества поверхности слитка циркония до и после оплавления на рис. 1 приведен фрагмент слитка с оплавленной и неоплавленной боковой поверхностью. После обработки поверхности электронным лучом она приобретает ровный микрорельеф, шероховатость находится в пределах 3...4 класса при волнистости поверхности, соответственно равной 0,2...0,6 мм.

Металлографические исследования слитков с оплавленной боковой поверхностью проводили на образцах, вырезанных из продольных и поперечных темплетов. Для выявления макроструктуры циркониевого сплава использовался реактив следующего состава: 10 мл плавиковой кислоты, 60 мл перекиси водорода и 50 мл воды.

Металл слитков, оплавленных электронным лучом, характеризуется отсутствием макропор, несплошностей и других дефектов литейного происхождения. Основной металл имеет полиэдрическую зернистую структуру  $\alpha$ -твердого раствора (рис. 2).

Оплавленный слой по окружности слитка, глубина которого составляла 3...5 мм, характеризуется мелкокристаллической структурой. Как показали проведенные исследования, глубина проплавления более 3 мм обеспечивает удаление всех плавильных дефектов с боковой поверхности слитков.

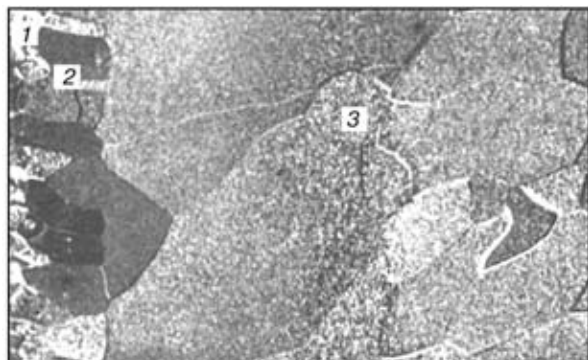


Рис. 2. Макроструктура поперечного темплета слитка циркония с оплавленной боковой поверхностью: 1 — оплавленный слой; 2 — зона термического влияния; 3 — основной металл

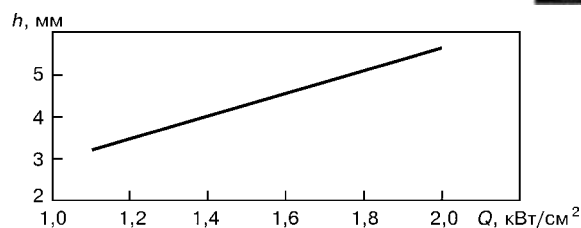


Рис. 3. Зависимость глубины проплавления  $h$  от удельной мощности электронно-лучевого нагрева  $Q$

Обработка результатов экспериментальных плавов, проведенных на различных режимах, показала (рис. 3), что глубина проплавления практически линейно зависит от удельной мощности электронно-лучевого нагрева.

Структура зоны термического влияния размером 90...95 мм, обусловленная температурным воздействием электронного луча, представлена зернами, вытянутыми в направлении центра слитка.

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе «Neophot 32» после травления в реактиве следующего состава: 10 мл азотной кислоты, 10 мл плавиковой кислоты и 10 мл воды. Было отмечено, что характер структуры циркониевых сплавов зависит от скорости охлаждения и содержания легирующих элементов. Зона оплавления характеризуется пластинчатой структурой корзиночного типа, аналогичной структуре литого металла основы (рис. 4). Данная структура образуется в результате полиморфного превращения  $\beta$ -фазы в процессе охлаждения. В зоне термического влияния игольчатая микроструктура имеет более тонкое строение.

С целью определения влияния электронно-лучевого оплавления на состав металла от боковой поверхности слитка на глубине 1, 3 и 5 мм были отобраны пробы для химического анализа. Кроме того, пробы отбирали из зоны термического влияния и основы слитка. Результаты химического анализа сплава Э-125 приведены в табл. 2.

Обработка полученных значений распределения примесных элементов по сечению слитка циркония показывает, что в оплавленном слое происходит снижение содержания водорода, железа, алюминия, кремния и хрома, тогда как остальные примеси находятся на уровне значений основы слитка. При этом наблюдается снижение содержания водорода не только в оплавленном слое, но и в зоне терми-

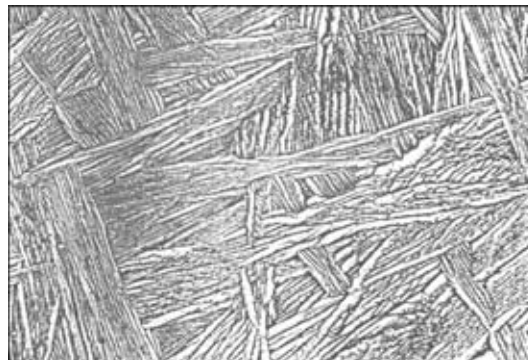


Рис. 4. Микроструктура оплавленного слоя слитка циркония,  $\times 500$



Таблица 2. Распределение примесей и легирующих элементов в слитках циркониевого сплава Э-125

| Исследуемая область | Место отбора пробы | Содержание элементов, % |        |      |         |        |        |        |        |        |        |     |
|---------------------|--------------------|-------------------------|--------|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
|                     |                    | C                       | N      | O    | H       | Fe     | Si     | Cu     | Al     | Ni     | Cr     | Nb  |
| Оплавленный слой    | $H = 1$            | 0,02                    | 0,0032 | 0,05 | 0,00030 | 0,009  | 0,0046 | 0,0010 | 0,0046 | 0,0049 | 0,0040 | 2,5 |
|                     | $H = 3$            | 0,02                    | 0,0030 | 0,04 | 0,00029 | 0,010  | 0,0048 | 0,0011 | 0,0046 | 0,0048 | 0,0043 | 2,5 |
|                     | $H = 5$            | 0,02                    | 0,0030 | 0,04 | 0,00030 | 0,0098 | 0,0050 | 0,0012 | 0,0047 | 0,0049 | 0,0046 | 2,5 |
| ЗТВ                 | $H = 15$           | 0,02                    | 0,0034 | 0,05 | 0,00043 | 0,015  | 0,0074 | 0,0014 | 0,0056 | 0,0052 | 0,0058 | 2,5 |
|                     | $H = 40$           | 0,02                    | 0,0032 | 0,04 | 0,00038 | 0,013  | 0,0075 | 0,0010 | 0,0046 | 0,0061 | 0,0054 | 2,5 |
|                     | $H = 65$           | 0,02                    | 0,0030 | 0,04 | 0,00037 | 0,014  | 0,0058 | 0,0012 | 0,0052 | 0,0049 | 0,0043 | 2,5 |
| Основа слитка       | Центр              | 0,02                    | 0,0037 | 0,05 | 0,00054 | 0,014  | 0,0070 | 0,0010 | 0,0055 | 0,0049 | 0,0049 | 2,5 |
|                     | $1/3R$             | 0,02                    | 0,0039 | 0,05 | 0,00050 | 0,012  | 0,0079 | 0,0012 | 0,0060 | 0,0051 | 0,0052 | 2,5 |
|                     | $2/3R$             | 0,02                    | 0,0036 | 0,05 | 0,00053 | 0,015  | 0,0061 | 0,0011 | 0,0053 | 0,0051 | 0,0048 | 2,5 |

Примечания. Каждое значение является средним от пяти измеренных;  $H$  — глубина, мм.

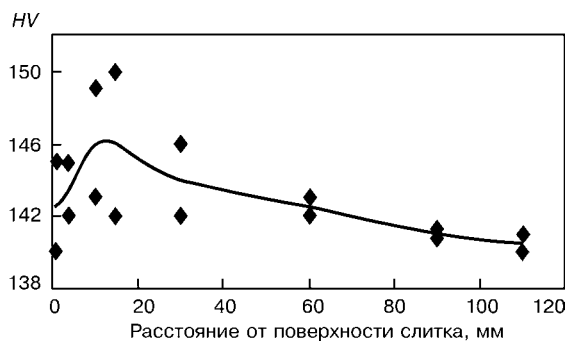


Рис. 5. Твердость слитков циркония, оплавленных электронно-лучевым методом

ческого влияния, что обусловлено высокой подвижностью водорода в твердом цирконии. Однородность распределения легирующего элемента ниобия в результате оплавления не нарушается.

Измерение твердости поперечных темплетов оплавленных слитков показало, что средняя твердость циркония электронно-лучевой плавки составляет около  $HV140$  (рис. 5). Снижение твердости металла слитка в зоне оплавления обусловлено уменьшением

содержания примесей внедрения, а небольшое повышение твердости циркония в зоне термического влияния — наличием тут закалочных условий.

Таким образом, проведенные исследования показали, что оплавленный электронным лучом слой слитка циркония характеризуется отсутствием макропор, несплошностей и других дефектов литейного происхождения, а также более чистым по химическому составу металлом, и позволили разработать технологию электронно-лучевого оплавления, которая повышает выход годного металла на 5... 15 %.

1. Тихинский Г. Ф., Ковтун Г. П., Ажажа В. М. Получение сверхчистых редких металлов. — М.: Металлургия, 1986. — 160 с.
2. Шуравлев М. В. Методы зачистки поверхностных дефектов металла. — М.: Металлургиздат, 1953. — 56 с.
3. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
4. Электронно-лучевая установка УЭ-185 для оплавления поверхностного слоя слитков / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. Н. Пикулин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2003. — № 3. — С. 12–14.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 31.03.2004

## III Международная конференция «Ti-2005 в СНГ»

Украина, г. Киев, Украинский Дом  
22–25 мая 2005 г.

### Организаторы

ЗАО «Межгосударственная ассоциация Титан»  
Национальная академия наук Украины  
Запорожский титано-магниевого комбинат

### Основные темы конференции

- обзор рынка титана в странах СНГ и мире
- национальные программы развития отрасли
- тенденции развития сырьевой базы и производства губчатого титана
- новые достижения в области металлостроения и металлургии титана
- динамика развития сфер применения титана
- анализ рынка ферротитана
- информационные технологии

Регистрация на сайте: <http://www.titan-association.com/Ti-2005>  
Контактные телефоны (факсы): +7(095) 444-91-24, +7(34345) 245-92