



УДК 669.187.526:51.001.57

ПРОИЗВОДСТВО КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛИТКОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, В. А. Березос,
В. А. Крыжановский, А. Ю. Северин

Показаны возможности получения слитков жаропрочных титановых сплавов способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Исследовано качество полуфабрикатов, изготовленных из крупногабаритных слитков жаропрочных титановых сплавов.

Possibilities of producing ingots of heat-resistant titanium alloys using a method of electron beam cold hearth melting at the E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine are shown. The quality of semi-products manufactured of large-sized ingots of heat-resistant titanium alloys was investigated.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; слиток; жаропрочный титановый сплав; полуфабрикаты

Мировые тенденции развития технологии производства слитков жаропрочных титановых сплавов и полуфабрикатов из них для изготовления деталей являются практически общими для ведущих авиационных предприятий, т. е. технология их получения является важным звеном в обеспечении стабильности и необходимого уровня эксплуатационных свойств.

Одним из прогрессивных направлений металлургического производства жаропрочных титановых сплавов является электронно-лучевая плавка (ЭЛП), позволяющая не только более глубоко очищать эти материалы от газовых и летучих металлических примесей, но и существенно упрощать процесс металлургического передела, получать изделия с качественно новыми физико-химическими и механическими свойствами.

Электронно-лучевая плавка также обеспечивает возможность изготовления слитков из сложнoleгированных титановых сплавов путем переplава первичной шихты в виде губчатого титана и лигатуры [1].

В условиях установившейся технологической схемы производства жаропрочных титановых сплавов особое значение приобретает исследование процесса кристаллизации слитков различного диаметра.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведены комплексные исследовательские работы по из-

готовлению слитков жаропрочных сплавов способом ЭЛП [2]. При определении технологических параметров плавок использовались режимы нагрева поверхности слитка в кристаллизаторе, определенные методами математического моделирования. Выполнены эксперименты по изготовлению слитков жаропрочных титановых сплавов BT8 диаметром 200 мм, а также BT3-1 диаметрами 400 и 500 мм.

С целью оптимизации процесса плавки и получения слитков с гарантированным химическим сос-

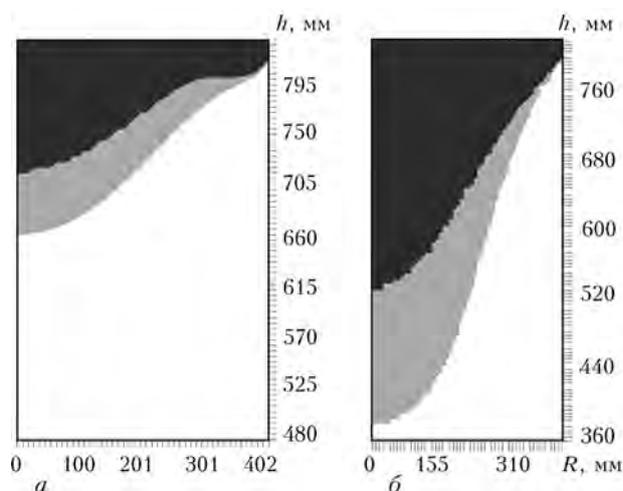


Рис. 1. Температурное поле слитка диаметром 840 мм при производительности плавки, кг/ч: а – 225; б – 600; R – радиус; h – высота слитка

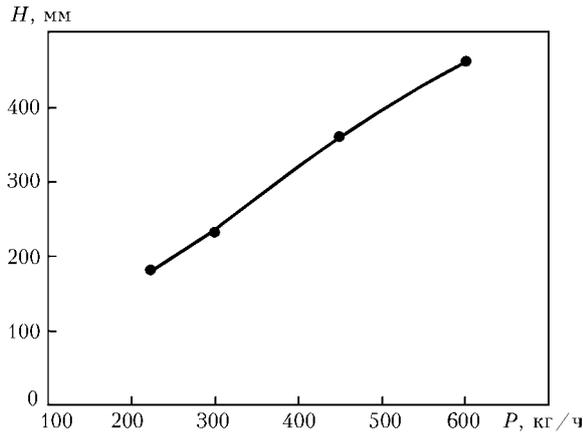


Рис. 2. Зависимость глубины H жидкой ванны от производительности P плавки для слитков диаметром 840 мм

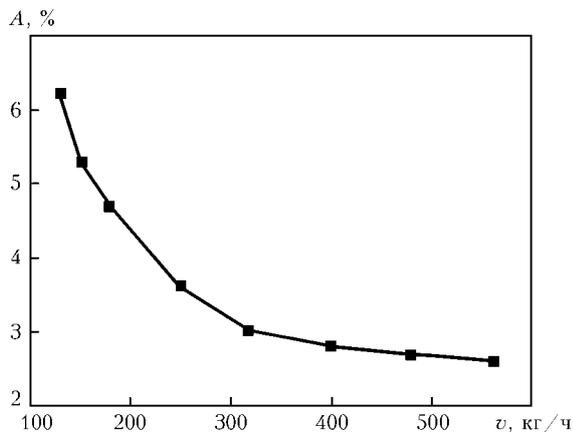


Рис. 3. Общие потери A металла на испарение в зависимости от скорости v плавки слитка диаметром 840 мм

тавом, а также минимизации потерь легирующих элементов при ЭЛП крупногабаритных слитков жаропрочных сплавов титана осуществлены математические расчеты технологических параметров плавки для слитков диаметром 840 мм [3]. В результате расчетов в рамках математической модели



Рис. 4. Слиток жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1 диаметром 840 мм, длиной 4000 мм

получены поля температур в слитке диаметром 840 мм жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1 для электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) разной производительности (рис. 1).

Исследовали зависимость теплового состояния слитка при ЭЛПЕ от производительности плавки. Установили зависимость глубины жидкой ванны и общих потерь металла на испарение от производительности процесса плавки (рис. 2, 3).

Показано, что глубина жидкой ванны при ряде рабочих значений производительности процесса плавки не превышает половины диаметра слитка, что с точки зрения теории кристаллизации является удовлетворительным результатом [2].

Производили слитки на промышленной электронно-лучевой установке УЭ5810 [4]. Установка отличалась высокой технологичностью при проведении некоторых процессов, достигаемой путем несложной замены одной оснастки другой, что позволило производить плавку слитков круглого сечения диаметром до 1200 мм, слитков прямоугольного сечения — до 420×1300 и длиной до 4000 мм.

Таблица 1. Распределение легирующих элементов и примесей по длине в слитке диаметром 840 мм из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1, полученного способом ЭЛПЕ

| Часть слитка | Место отбора пробы | Массовая доля элементов, % | | | | | | | |
|---------------|--------------------|----------------------------|------------|------------|------------|--------------|--------|-------|--------|
| | | Al | Mo | Cr | Fe | Si | H | O | N |
| Верхняя | О | 6,25 | 2,28 | 1,72 | 0,29 | 0,32 | 0,001 | 0,09 | 0,011 |
| | С | 6,30 | 2,40 | 1,83 | 0,30 | 0,33 | | | |
| | П | 6,15 | 2,35 | 1,63 | 0,30 | 0,33 | | | |
| Средняя | О | 6,20 | 2,27 | 1,73 | 0,29 | 0,33 | 0,001 | 0,11 | 0,009 |
| | С | 6,27 | 2,38 | 1,70 | 0,29 | 0,35 | | | |
| | П | 6,18 | 2,36 | 0,70 | 0,30 | 0,30 | | | |
| Нижняя | О | 6,25 | 2,43 | 1,88 | 0,28 | 0,36 | 0,001 | 0,09 | 0,011 |
| | С | 6,26 | 2,50 | 1,95 | 0,28 | 0,35 | | | |
| | П | 6,14 | 2,44 | 1,90 | 0,26 | 0,30 | | | |
| ГОСТ 19807–91 | | 5,5... 7,0 | 2,0... 3,0 | 0,8... 2,0 | 0,2... 0,7 | 0,15... 0,40 | <0,015 | <0,15 | < 0,05 |

Примечание. О — вблизи оси слитка; С — около середины радиуса; П — в периферийной зоне (10 мм от поверхности слитка).



Рис. 5. Кованый диск диаметром 1600 мм из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1

Комплекс теоретических и экспериментальных исследований процесса ЭЛПЕ слитков диаметром

Таблица 2. Механические свойства поковок жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1

| № поковки | σ_B , МПа | δ , % | ψ , % | KCU , Дж/см ² | HV |
|-----------------|------------------|--------------|------------|----------------------------|------------|
| Ц812 | 1150... 1160 | 10 | 23 | 35 | 360 |
| Ц815 | 1100... 1110 | 12 | 26 | 40 | 320 |
| Х479 | 1090... 1100 | 13 | 25 | 38 | 316 |
| Ц819 | 1120... 1130 | 11 | 24 | 37 | 358 |
| Х490 | 1060... 1065 | 12 | 26 | 40 | 332 |
| Ц836 | 1160... 1170 | 10 | 24 | 36 | 361 |
| Ц840 | 1180... 1190 | 9 | 22 | 32 | 363 |
| Х466 | 1060... 1070 | 12 | 25 | 35 | 330 |
| И255.105.091-87 | 950... 1200 | ≥9 | ≥22 | ≥30 | 269... 363 |



Рис. 6. Полуфабрикаты из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1: а – поковки; б – прутки

200... 500 мм дал возможность разработать технологию получения высококачественных слитков жаропрочных сплавов титана диаметром 840 мм, свободных от включений высокой и низкой плотности. Впервые в мировой практике на электронно-лучевой установке УЭ5810 из первичной шихты получили крупногабаритные слитки жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1 диаметром 840 мм (рис. 4).

В выплавленных способом ЭЛПЕ слитках жаропрочного титанового сплава отсутствуют несплошности, неметаллические включения размером более 1 мм, а также плотные скопления более мелких включений. Структура их металла плотная, кристаллическая неоднородность и зональная ликвация в слитках отсутствуют. Распределение легирующих элементов как по длине, так и по поперечному сечению слитков равномерное, а содержание примесных элементов находится в пределах требований ГОСТ 19807-91 (табл. 1).

Из слитков диаметром 840 мм изготовлены полуфабрикаты в виде поволоков и прутков (рис. 5, 6).

Макроструктуру кованых прутков диаметром 45 мм из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1 определяли на продольных и поперечных темплетях. Установили ее соответствие балду 4 по 10-балльной шкале ВИАМ 1054-76 (рис. 7), что полностью отвечает требованиям стандартов. В макроструктуре прутков отсутствуют трещины, расслоения, пусто-

ты, плены, металлические и неметаллические включения, обнаруживаемые визуально.

Исследования показали, что свойства полуфабрикатов, изготовленных из слитков, выплавленных по разработанной технологии ЭЛПЕ, отвечают всем требованиям, предъявляемым промышленностью к качеству жаропрочных титановых сплавов (табл. 2).

Технологические процессы ЭЛП, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, дают возможность получать высококачественные слитки титана и его сплавов с однородной бездефектной структурой. Установленное в ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ оборудование позволяет выпускать промышленные

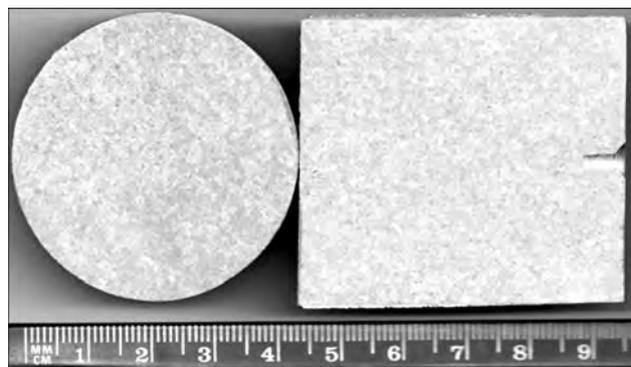


Рис. 7. Макроструктура кованого прутка диаметром 45 мм из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1



партии титановых слитков различных типоразмеров при объеме годового производства до 5000 т.

Разработанная технология дает возможность в результате использования более дешевого исходного сырья и увеличения сквозного выхода годного металла снизить себестоимость титановых полуфабрикатов, а следовательно, повысить конкурентоспособность и расширить области применения титана в различных отраслях промышленности.

Таким образом, благодаря созданию технологий ЭЛП жаропрочных сплавов титана и оборудования для получения высококачественных слитков появилась возможность организовать в Украине конкурентоспособное на мировых рынках производство высококачественных слитков жаропрочных титановых сплавов.

Выводы

1. Впервые в мире способом ЭЛПЕ получены слитки жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1 диаметром 840 мм.

2. Комплексные исследовательские работы показали, что свойства полуфабрикатов, изготовлен-

ных из слитков выплавленных способом ЭЛПЕ, отвечают всем требованиям, предъявляемым промышленностью к качеству жаропрочных титановых сплавов.

3. Разработана технология ЭЛП слитков жаропрочных сплавов титана, а также создано специализированное оборудование для реализации указанной технологии, что позволило организовать в Украине конкурентоспособное производство высококачественных слитков титановых сплавов.

1. Тригуб Н. П., Жук Г. В. Разработка прогрессивных технологических схем производства титановой продукции в ИЭС им. Е. О. Патона // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 4. — С. 7–9.
2. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 250 с.
3. Развитие электронно-лучевой плавки титана в ИЭС им. Е. О. Патона / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. А. Березос // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 3. — С. 22–24.
4. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреакционных металлов. — Киев: Наук. думка, 2008. — 311 с.

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

Поступила 30.06.2010

УДК 669.187.526.001.57

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТИТАНОВОГО СЛИТКА ЭЛПЕ

В. А. Березос

Исследованы процессы формирования жидкой ванны в слитках титана при выплавке в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью. Проведено сравнение экспериментальных результатов с данными математического моделирования. Показано, что модель с достаточной точностью отражает тенденцию изменения глубины формирования жидкой ванны с изменением мощности нагрева слитка.

Processes of formation of molten pool in titanium ingots during melting in electron beam cold hearth furnaces are investigated. Comparison of experimental results with data of mathematic modeling was made. It is shown that the model demonstrates at a sufficient precision the tendency of a change in depth of molten pool formation with a change in ingot heating capacity.

Ключевые слова: математическое моделирование; электронно-лучевая плавка; слиток; жидкая ванна металла

Затвердевание металла сопровождается сложными и быстротекущими физическими процессами переноса тепла, гидродинамического течения, излуче-

ния. На практике зачастую не представляется возможным измерить значения параметров этих процессов, тем более с достаточной точностью.

Кроме того, в металлургии натурные эксперименты сопряжены с большими материальными затратами, связанными с размерами и стоимостью слитков.

© В. А. БЕРЕЗОС, 2010