



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

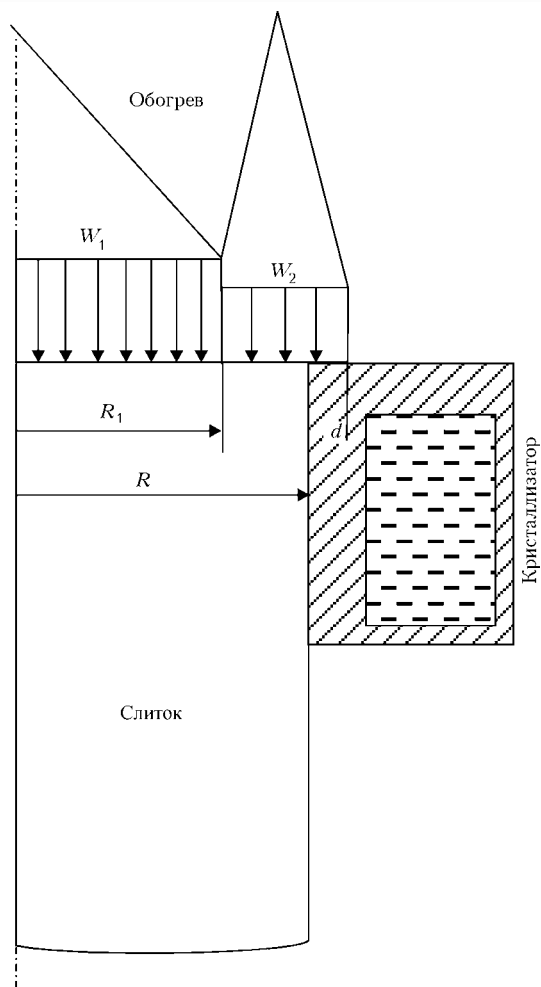


Рис. 1. Схема моделирования процесса формирования цилиндрического слитка при ЭЛПЕ

Большое значение имеют численные эксперименты с применением методов математического моделирования и расчетов на ЭВМ, позволяющие при сравнительно малых затратах и минимальном количестве экспериментальных данных составить качественную и количественную картину явлений, происходящих в металлургических процессах.

Преимущество численных методов состоит в том, что они дают возможность учитывать не только средние показатели физических величин, но и задавать их распределение в пространстве и времени, максимально приближенное к реальным процессам.

Целью моделирования является отказ от дорогостоящего натурного эксперимента путем вычисления распределения требуемого параметра в любой момент времени с заданной точностью.

На практике же обычно достигают сокращения количества экспериментов путем вычисления характера распределения и тенденции изменения требуемого параметра. Однако экспериментальная проверка таких математических расчетов все же необходима, поскольку она дает реальную картину протекания процессов в слитке.

Основные принципы моделирования теплофизических процессов в слитках, получаемых способами специальной электрометаллургии, сформули-

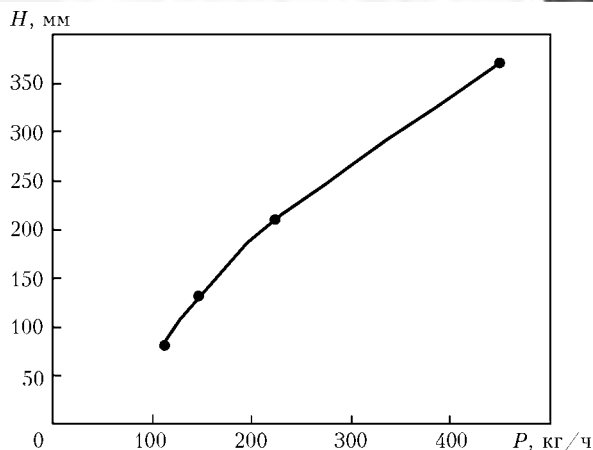


Рис. 2. Влияние производительности плавки  $P$  на глубину ванны  $H$  для слитков диаметром 600 мм

рованы в работах [1, 2]. В последние годы создано несколько математических моделей, описывающих различные стадии ЭЛПЕ: плавление исходной шихты, перемешивание и испарение металла и примесей в промежуточной емкости, формирование слитка в кристаллизаторе (в том числе выведение усадочной раковины), остывание слитка [3–6].

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана, а затем усовершенствована математическая модель кристаллизации цилиндрических слитков при ЭЛПЕ, позволяющая получать распределение температур в цилиндрическом слитке в любой момент времени, а следовательно, и конфигурацию жидкой ванны и зоны твердо-жидкого состояния металла в зависимости от технологических параметров электронно-лучевой плавки (производительности процесса, периодичности заливки расплава в кристаллизатор и мощности электронно-лучевого нагрева) [3].

Однако до настоящего времени подтверждение адекватности данной модели проводилось лишь косвенно. Так, в работе [7] показано влияние глубины жидкой ванны, зависящей от мощности электронно-лучевого нагрева и производительности плавки, на формируемую структуру слитков титана.

Задача данной работы состояла в экспериментальной проверке адекватности модели протекания теплофизических процессов в кристаллизаторе.

В данной модели жидкий металл сливали в кристаллизатор порциями, а слиток из него вытягивали периодически. Поверхность слитка обогревалась двумя электронными лучами, причем мощность  $w_1$  одного из них равномерно распределялась в центральной зоне, а другого  $w_2$  — сконцентрирована в периферийной зоне (рис. 1).

В математической модели контролируемые технологическими параметрами являются мощности лучей  $w_1, w_2$ , периодичность заливки  $t$ , высота одновременно сливаемой в кристаллизатор порции  $h$ , смещение периферийного луча от центра на стенку кристаллизатора  $d$ .

Формальным критерием глубины жидкой ванны выбран радиус слитка  $R$ , общепринятый при оценке условий кристаллизации [3]. По данным графика (рис. 2) видно, что глубина жидкой ванны не пре-

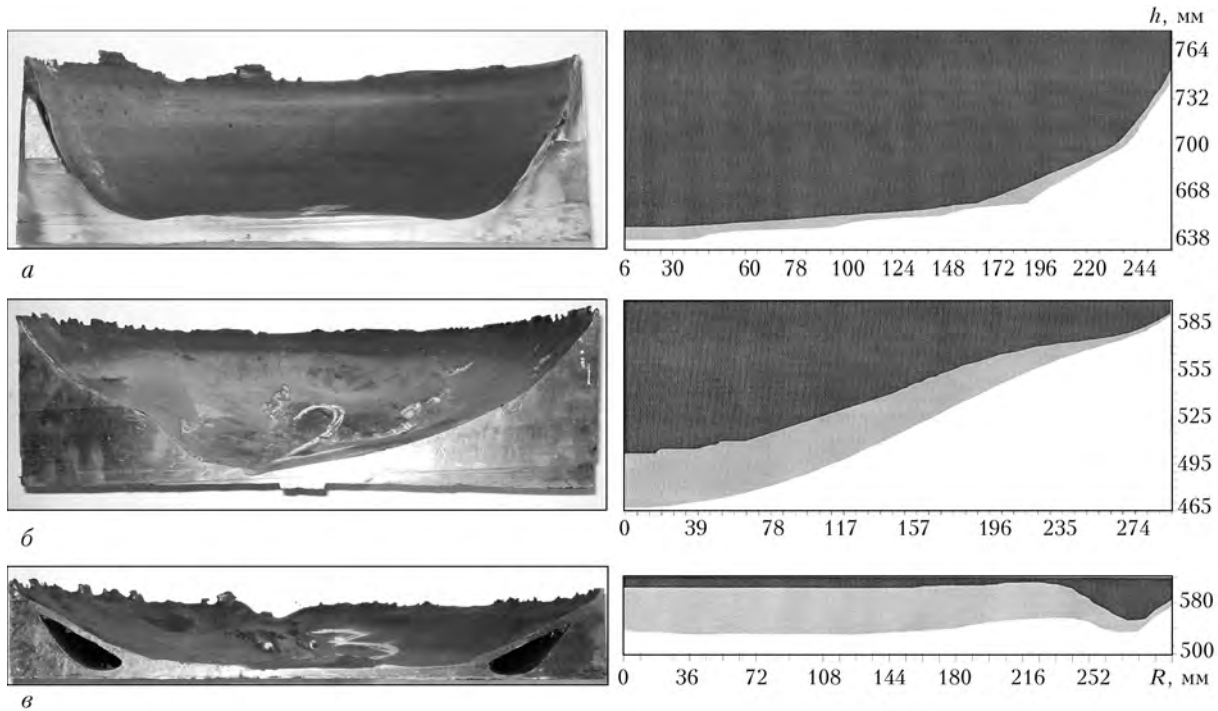


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная жидкие ванны в слитке титана VT1-0 диаметром 600 мм при различных режимах плавки: а – 1; б – 2; в – 3 (таблица)

вышает радиуса слитка (для диаметра слитка 600 мм) при значении производительности плавки 350 кг/ч [8]. Поэтому для проведения эксперимента выбрана скорость плавки 300 кг/ч.

С помощью математической модели [3] смоделированы три режима плавки слитков диаметром 600 мм титанового сплава VT1-0. Задачу решали численно с помощью метода конечных разностей. В качестве неизменяемых технологических параметров приняты следующие:  $t = 180$  с;  $h = 0,012$  м;  $d = 0,006$  м. Путем изменения значения энергии, сообщаемой электронными лучами свободной поверхности слитка, смоделированы три режима плавки (таблица).

В результате расчетов получены температурные поля слитка для различных режимов электронно-лучевого нагрева поверхности металла в кристаллизаторе при ЭЛПЕ (рис. 3).

Процессы формирования жидкой ванны в слитках титана при выплавке в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью были также исследованы экспериментально.

Режимы электронно-лучевого нагрева поверхности слитка VT1-0 диаметром 600 мм в кристаллизаторе					
№ режима	Мощность, кВт		Глубина жидкой ванны, мм		Отклонение расчета от эксперимента, %
	Центр	Периферия	расчет $H_p$	эксперимент $H_s$	
1	200	120	142	150	5,3
2	160	80	131	139	5,7
3	100	110	89	80	11,2

С использованием расчетных режимов электронно-лучевого нагрева цилиндрического слитка в кристаллизаторе на электронно-лучевой установке УЭ-5812 [9] проведены экспериментальные плавки слитков титана VT1-0 диаметром 600 мм.

Слитки выплавляли по технологии ЭЛПЕ с горизонтальной подачей расходуемой заготовки, накоплением металла в промежуточной емкости и его сливом в кристаллизатор с формированием слитка.

Обогрев верхнего торца слитка осуществлялся двумя аксиальными электронными пушками, распределение энергии которых представляло собой концентрические круги.

Мощность первого луча была равномерно распределена в центральной области, а второго – на периферии со смещением на стенки медного водоохлаждаемого кристаллизатора.

Изменялась как общая мощность  $w_1 + w_2$ , так и распределение мощности между пушками (таблица). Металл в кристаллизатор подавался порциями.

Установлено, что глубина и объем жидкой металлической ванны постоянно увеличиваются в начале плавки до достижения постоянного уровня, свидетельствующего об установлении квазистационарного режима в верхней части слитка, на который не влияет изменение теплового режима [3].

После установления квазистационарного режима для данной скорости плавки и достижения высоты слитка 1000 мм производили слив жидкого расплава со всего объема металлической ванны путем проплавления корочки металла на периферии слитка. Полученные слитки были разрезаны на две части вдоль оси симметрии (рис. 3).

Изучение полученных заготовок показало, что они с достаточной точностью повторяют форму рас-

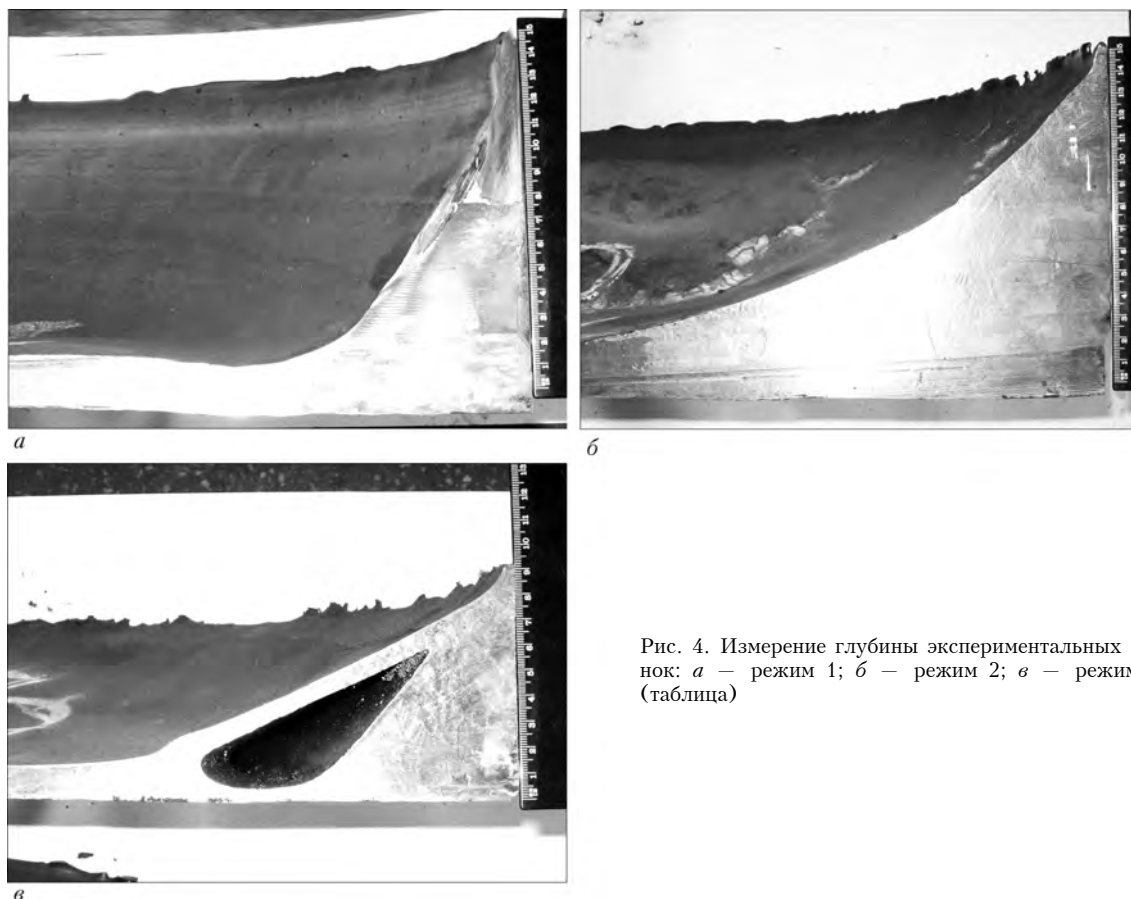


Рис. 4. Измерение глубины экспериментальных лунок: *а* – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3 (таблица)

считанных температурных полей. Глубину измеряли от крайней кромки головной части слитка до самой нижней точки образовавшейся лунки (рис. 4). Данные измерений приведены в таблице.

Отклонение расчетных данных от экспериментальных определяли по следующей формуле:

$$D = (H_э - H_p) \cdot 100 / H_p,$$

где  $D$  – отклонение данных расчета от экспериментальных, %;  $H_э$  – глубина жидкой ванны экспериментальная, мм;  $H_p$  – глубина жидкой ванны рассчитанная, мм.

Сравнение экспериментальных результатов с данными математического моделирования показало, что модель в целом реально отражает физическое явление формирования жидкой ванны в слитках. Рассчитанные значения глубины жидких ванн совпадают с экспериментально измеренными в пределах 5...12 %. Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о том, что в целом модель с достаточной точностью отражает тенденцию изменения глубины формирования жидкой ванны с изменением мощности нагрева слитка.

1. Математическое моделирование процесса электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью и его применение

для производства титана / Ж.-П. Белло, Е. Флори, Е. Эсс, Д. Аблизер // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1996. – № 4. – С. 27–37.

2. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. – Киев: Наук. думка, 1997. – 265 с.
3. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. – Киев: Наук. думка, 2006. – 250 с.
4. *Лесной А. Б., Демченко В. Ф., Жадкевич М. Л.* Моделирование гидродинамики и теплообмена при кристаллизации слитков электронно-лучевого переплава // Пробл. спец. электрометаллургии. – 2001. – № 2. – С. 17–21.
5. *Калинюк А. Н., Жук Г. В., Тригуб Н. П.* Моделирование режимов вывода усадочной раковины в цилиндрических слитках ЭЛПЕ // Там же. – 2002. – № 1. – С. 23–25.
6. *Жук Г. В., Ахонина Л. В., Тригуб Н. П.* Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ // Там же. – 1998. – № 2. – С. 21–25.
7. *Жук Г. В., Тригуб Н. П., Калинюк А. Н.* Влияние скорости охлаждения на структуру цилиндрических слитков ЭЛПЕ титанового сплава Ti-6Al-4V // Процессы литья. – 2003. – № 4. – С. 79–82.
8. *Жук Г. В.* О влиянии распределения мощности нагрева металла в кристаллизаторе в процессе ЭЛПЕ на структуру титановых слитков // Современ. электрометаллургия. – 2008. – № 2. – С. 17–20.
9. *Промышленная электронно-лучевая установка УЭ-5812* / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. Д. Корнейчук и др. // Там же. – 2007. – № 1. – С. 11–14.

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

Поступила 30.06.2010