



УДК 669.187.826

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СПЛАВА Ti-6Al-4V ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКЕ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТЬЮ И ПОРЦИОННОМ СЛИВЕ

С. В. Ахонин, А. С. Миленин, А. В. Самофалов

Разработана математическая модель испарения легирующих элементов при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью и порционном сливе металла для титанового сплава Ti-6Al-4V. В рамках предложенной модели получены зависимости химического состава выплавляемого слитка от технологических параметров процесса. Адекватность модели подтверждена экспериментальными данными, полученными в результате выплавки слитков сплава Ti-6Al-4V.

A mathematical model of evaporation of alloying elements in electron beam cold hearth melting and portion pouring of metal for titanium alloy Ti-6Al-4V has been developed. Within the scope of an offered model, the dependencies of chemical composition of ingot being melted on technological parameters of the process were obtained. Adequacy of the model was confirmed by experimental data obtained as a result of melting ingots of Ti-6Al-4V alloy.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; промежуточная емкость; порционный слив; химический состав; испарение

Введение. В настоящее время большое распространение при выплавке слитков титана и сплавов на его основе получила технологическая схема электронно-лучевой плавки (ЭЛП) с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ), позволяющая полностью разделить процессы плавления и рафинирования, протекающие в промежуточной емкости, а также затвердевания металла в кристаллизаторе [1, 2].

Для улучшения структуры слитка в ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология электронно-лучевой плавки с порционным сливом жидкого металла из промежуточной емкости в кристаллизатор [3, 4], имеющая ряд существенных преимуществ перед традиционными технологиями ЭЛП. Малый объем подаваемой порции жидкого металла из промежуточной емкости в кристаллизатор подавляет процессы конвекции в расплаве при его кристаллизации, что предотвращает развитие в слитке зональной ликвации, а также образование дефектов усачного происхождения.

Поскольку процесс плавки происходит в вакууме, то различная упругость паров легирующих

компонентов сплавов может привести к изменению химического состава слитка. Таким образом, важным аспектом оптимизации процесса ЭЛПЕ является обеспечение соответствия состава слитка установленным стандартам.

Указанную задачу оптимизации решали методом математического моделирования на примере процесса ЭЛПЕ слитков титанового сплава Ti-6Al-4V. Предложенная модель позволяет получить зависимости химического состава слитка от различных технологических параметров процесса ЭЛПЕ.

Технология ЭЛПЕ с порционным сливом. Схема ЭЛПЕ представлена на рис. 1. Сплавляемая заготовка 1 подается с постоянной скоростью в зону воздействия электронно-лучевых пушек, где происходит ее плавление. Жидкий металл с оплавленного торца заготовки поступает в промежуточную емкость (ПЕ) 2, где осуществляется его гомогенизация и рафинирование от неметаллических включений. По мере наполнения ПЕ расплавом закристаллизовавшийся металл в носике 3 проплавляют, и сливают порцию жидкого металла в кристаллизатор 4. По мере наплавления слитка поддон кристаллизатора опускается вниз. В течение всей



плавки электронно-лучевым нагревом в ПЕ и кристаллизаторе поддерживается ванна жидкого металла.

Описание процессов испарения компонентов расплава в вакуум. Испарение легирующих элементов с поверхности расплава происходит в три основных этапа: массоперенос из объема металла к поверхности раздела фаз; изменение агрегатного состояния на поверхности раздела фаз; массоперенос элемента от поверхности раздела фаз в объем газовой фазы [4].

Суммарный поток i -го элемента сплава (алюминий, ванадий, титан), испаряющегося с межфазной поверхности, вычисляется из следующего соотношения [5]:

$$J_i = \beta_i S C_i,$$

где $\beta_i = \left(\frac{1}{\rho \beta_m^i} + \frac{1}{k_i^e} \right)^{-1}$ — суммарный коэффициент массопереноса, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; ρ — плотность расплава, $\text{кг}/\text{м}^3$; β_m^i — коэффициент массопереноса элемента расплава, $\text{м}/\text{с}$; k_i^e — константа скорости испарения элемента расплава, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; S — площадь межфазной поверхности, м^2 ; C_i — массовая доля элемента в объеме жидкого металла.

Константа скорости испарения k_i^e вычисляется согласно уравнению Ленгмюра [5, 6]:

$$k_i^e = \alpha_i \gamma_i p_i^0 \frac{M_{\text{Ti}}}{\sqrt{2\pi R T M_i}},$$

где M_{Ti} — молярная масса титана (основного элемента сплава), $\text{кг}/\text{моль}$; M_i — молярная масса соответствующего легирующего элемента, $\text{кг}/\text{моль}$; α_i — коэффициент конденсации; γ_i — коэффициент активности i -го элемента в расплаве; p_i^0 — равновесное давление паров элемента над поверхностью жидкого металла, Па; $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура расплава, К.

Зависимости коэффициента активности от температуры и состава сплава исследуемой системы могут быть вычислены в рамках модели Редлиха-Кистера [7].

Температурные зависимости равновесного давления паров элементов тройной системы Ti-Al-V выражаются следующими соотношениями [8]:

$$\begin{aligned} \log(p_{\text{Ti}}^0(T)) &= -\frac{22946}{T} + 10,581 - 0,373 \log(T); \\ \log(p_{\text{Al}}^0(T)) &= -\frac{16379}{T} + 9,979 - 0,335 \log(T); \\ \log(p_{\text{V}}^0(T)) &= -\frac{24378}{T} + 10,762 - 0,325 \log(T). \end{aligned}$$

Поскольку упругость пара ванадия намного меньше упругости пара алюминия (при температуре около 2000 К на несколько порядков), и, соответственно, градиент концентрации этого элемента в по-

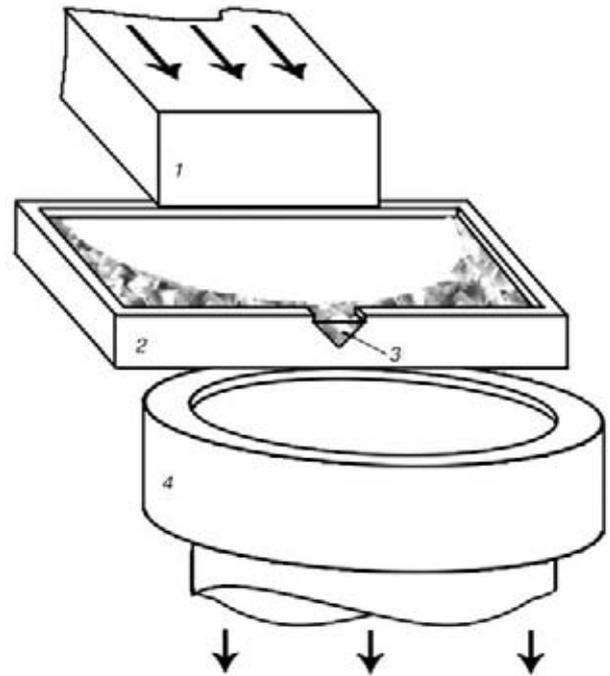


Рис. 1. Схема электронно-лучевой плавки с ПЕ

верхностном слое расплава незначителен, то можно считать, что ванадий распределен равномерно по всему объему расплава.

Коэффициент массопереноса алюминия в жидком титане приблизительно равен $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}/\text{с}$ [5].

Для титана как для основного элемента расплава коэффициент β_m^{Ti} можно считать бесконечно большим.

Моделирование процессов испарения легирующих элементов с торца сплавляемой заготовки. В процессе сплавления шихты в ПЕ на торце заготовки образуется пленка жидкого металла, с поверхности которой происходит испарение в вакуум. Плоскость плавления находится под углом около 90° , поэтому расплав удерживается на ней в основном силами поверхностного натяжения. Это означает небольшой перегрев металла, поскольку в результате повышения температуры коэффициент поверхностного натяжения снижается, и жидкий металл стекает в ПЕ. По этой причине температуру расплава в пленке на оплавленном торце заготовки можно считать постоянной и приблизительно равной температуре плавления сплава.

Для того, чтобы определить химический состав металла, попадающего в ПЕ с оплавленного торца заготовки, требуется анализ массообмена в области жидкого металла. Так, в жидкую ванну на торце с известной массовой скоростью w_0 поступает металл известного состава, массовая доля элементов (алюминий, ванадий, титан) $[Me]_0$ в котором определяется составом переплавляемой заготовки. С поверхности жидкого металла происходит испарение в вакуум, а также в ПЕ стекает металл неизвестного состава $[Me]_t$.



В предположении, что концентрация элементов сплава в основной части металла жидкой ванны на торце (за исключением тонкого приповерхностного слоя) одинакова и равна конечной $[Me]_t$, изменение массы каждого из элементов m_i в жидкой ванне от времени t вычисляется следующим образом:

$$\frac{dm_i^t}{dt} = w_0[Me]_0 - \beta_i S_t [Me]_t - w_t [Me]_t, \quad (1)$$

где S_t — площадь поверхности жидкого металла на торце сплавляемой заготовки, m^2 ; w_t — средняя массовая скорость поступления жидкого металла в ПЕ, $кг/с$.

Основную часть времени этот процесс проходит в стационарном режиме. Таким образом, производная массы по времени в выражении (1) тождественно равна нулю:

$$w_0[Me]_0 - \beta_i S_t [Me]_t - w_t [Me]_t = 0. \quad (2)$$

С учетом того, что $[Al]_t + [V]_t + [Ti]_t = 1$ из формулы (2) находят неизвестные $[Me]_t$ и w_t .

В качестве примера решения подобной системы уравнений на рис. 2 представлена зависимость массовых долей алюминия и ванадия от массовой скорости подачи шихты. Эти зависимости показывают, что при возрастании массовой скорости подачи заготовки массовая доля алюминия в металле, попадающем в ПЕ, плавно увеличивается, в то время как содержание ванадия в расплаве уменьшается.

Моделирование процессов испарения при выдержке расплава в ПЕ. По мере наполнения ПЕ металлом, стекающим с оплавленного торца заготовки, с поверхности расплава в ПЕ, обогреваемого электронными лучами, также происходит испарение легирующих элементов в вакуум. В отличие от ванны жидкого металла на торце заготовки, из ПЕ не происходит непрерывный отток металла, поэтому уравнения материального баланса для элементов расплава в ПЕ имеют следующий вид:

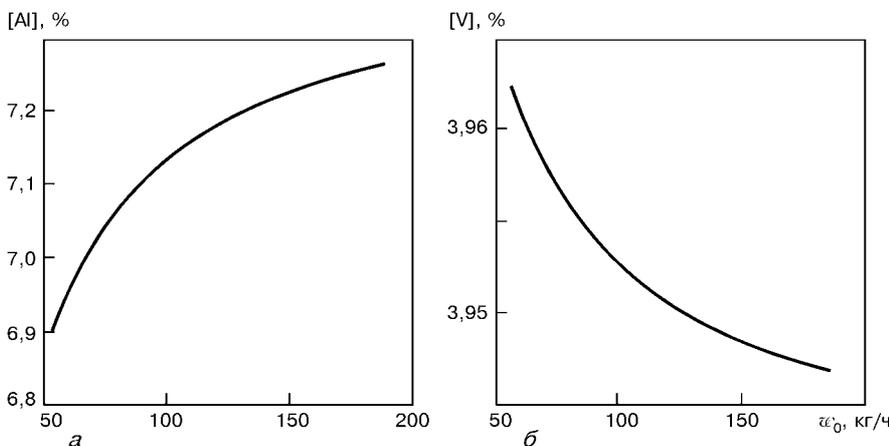


Рис. 2. Зависимость массовой доли алюминия (а) и ванадия (б) в металле, стекающем с оплавленного торца заготовки, от массовой скорости w_0 подачи шихты; $[Al]_0 = 7,4$, $[V]_0 = 4,0$ %

$$\frac{dm_i^e}{dt} = w_t [Me]_t - \beta_i S_e [Me]_e, \quad (3)$$

где S_e — площадь расплава в ПЕ, m^2 ; m_i^e — масса i -го элемента, находящегося в ПЕ в текущий момент времени, $кг$; $[Me]_e$ — массовая доля соответствующего элемента в расплаве ПЕ.

Время выдержки, т. е. время между двумя последовательными сливами металла в кристаллизатор, в свою очередь зависит от скорости подачи шихты (и, соответственно, от скорости поступления металла в ПЕ) и количества сливаемой порции. Приблизительно длительность этого промежутка времени вычисляется согласно следующему выражению:

$$t_k = \frac{m_p}{w_t},$$

где m_p — масса сливаемой из ПЕ порции, $кг$.

Перед началом плавки в ПЕ устанавливается гарнисаж известного химического состава, в котором наводится небольшая жидкая ванна. В этот расплав затем поступает металл с оплавленного торца заготовки. Кроме того, после слива порции в ПЕ остается некоторая часть жидкого металла, которая смешивается с расплавленным металлом заготовки. Исходя из этого строятся начальные условия, необходимые для решения дифференциального уравнения (3).

Соответственно, начальные условия для выражения (3) при первом сливе из ПЕ будут следующими:

$$m_i^e|_{t=0} = m_R [Me]_g, \quad (4)$$

где $[Me]_g$ — массовая доля элементов сплава в гарнисаже; m_R — масса жидкого металла в ПЕ перед поступлением металла с оплавленного торца заготовки, $кг$.

Решение системы уравнения (3) с учетом начальных условий (4) и того факта, что $[Al]_e + [V]_e + [Ti]_e = 1$, позволяет получить массу жидкого алюминия, ванадия и титана в жидкой ванне ПЕ в момент слива, т. е. в момент времени t_k . Исходя из

этих результатов вычисляют массовую долю этих элементов в сливаемой порции.

Математическое описание следующих сливов из ПЕ отличается только начальными условиями. Так, в выражении (4) вместо массовых долей элементов в исходном гарнисаже будут фигурировать массовые доли элементов к моменту последнего слива из ПЕ.

Зависимости массовых долей алюминия и ванадия в расплаве, находящемся в ПЕ, от порядкового номера слива представлены на рис. 3. Для данных зависи-



мостей характерно, что после нескольких сливов содержание этих элементов остается постоянным, процесс выходит на стационарный режим.

Определенный интерес представляют собой зависимости стационарного содержания легирующих элементов в расплаве, находящемся в ПЕ, от времени выдержки. Следует отметить, что это время является не контролируемым технологическим параметром, а функцией массы сливаемой порции и массовой скорости подачи заготовки. Расчеты показали, что изменение химического состава сливаемого металла при вариации массы порции незначительно. В то же время изменение скорости подачи шихты дает практически линейные зависимости стационарного содержания легирующих элементов в расплаве ПЕ от времени выдержки (рис. 4).

Моделирование процессов испарения с поверхности ванны жидкого металла в кристаллизаторе. В отличие от ПЕ, в кристаллизатор металл поступает только в момент слива порции из ПЕ, сразу после чего в жидкой ванне кристаллизатора происходят следующие процессы: перемешивание расплава слитой порции и металла, находящегося в кристаллизаторе; затвердевание части металла; испарение с поверхности ванны жидкого металла. Самым медленным из трех перечисленных процессов является испарение элементов расплава в вакуум, самым быстрым — перемешивание металла. И в сравнении с характерным временем испарения (1... 2 мин), длительностью кристаллизации и перемешивания можно пренебречь.

Поэтому система уравнений материального баланса для этого этапа ЭЛПЕ будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dm_i^c}{dt} = -\beta_i S_c [Me]_c, \quad (5)$$

где m_i^c — масса i -го элемента, находящегося в кристаллизаторе в текущий момент времени, кг; S_c — площадь кристаллизатора, м²; $[Me]_c$ — массовая доля соответствующего элемента в расплаве кристаллизатора в текущий момент времени.

Начальные условия для системы (3) получаются следующим образом. После первого слива часть металла, попав на охлаждаемый поддон, сразу закристаллизовывается. Оставшаяся часть поддерживается в жидком состоянии системой электронно-лучевых пушек, обогревающих кристаллизатор. Соответственно, в начальный момент времени масса элементов расплава определяется их массовой долей в сливаемой порции $[Me]_e^1$ и общей массой

жидкого металла в кристаллизаторе m_c . Таким образом, начальные условия для системы (3) для первого слива из ПЕ в кристаллизатор приобретают следующий вид:

$$m_i^c|_{t=0} = m_c [Me]_e^1. \quad (6)$$

Таким образом, решение системы дифференциальных уравнений (5) с начальными условиями (6) с учетом того, что $[Al]_c + [V]_c + [Ti]_c = 1$, позволяет получить массовую долю элементов в жидкой ванне кристаллизатора к моменту второго слива, т. е. через промежуток времени t_k .

Начальные условия для последующих сливов получаются следующим образом. После слива j -й порции металла из ПЕ с массовой долей соответствующих элементов в ней $[Me]_e^j$ часть жидкого металла в кристаллизаторе затвердевает, жидким остается металл массы m_c , которая является функцией технологических параметров плавки. Начальные условия для промежутка времени между сливами j - и $(j + 1)$ -й порции имеют следующий вид:

$$m_i^c|_{t=0} = \frac{m_c}{m_c + m_p} (m_c [Me]_c^{j-1} + m_p [Me]_e^j). \quad (7)$$

Таким образом, система (5) с начальными условиями (6), (7) позволяет рассчитать содержание элементов сплава в закристаллизовавшемся металле слитка по всей его высоте. Эти зависимости для

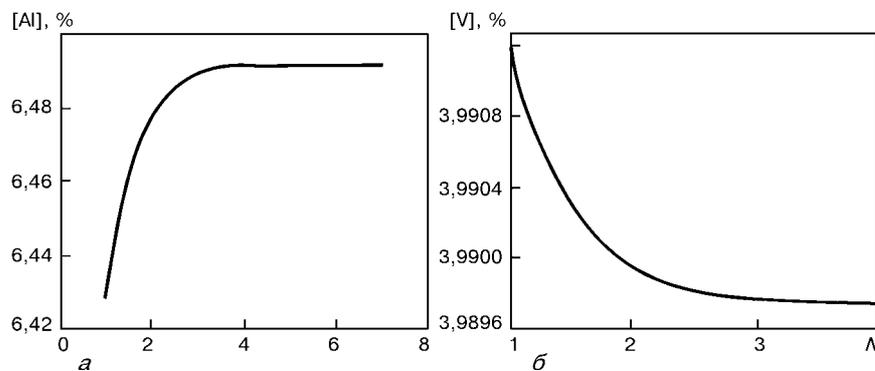


Рис. 3. Зависимости массовых долей алюминия (а) и ванадия (б) в гарниже ПЕ от порядкового номера слива N ; начальное содержание легирующих элементов в гарниже следующее: $[Al] = 6$; $[V] = 4$ %

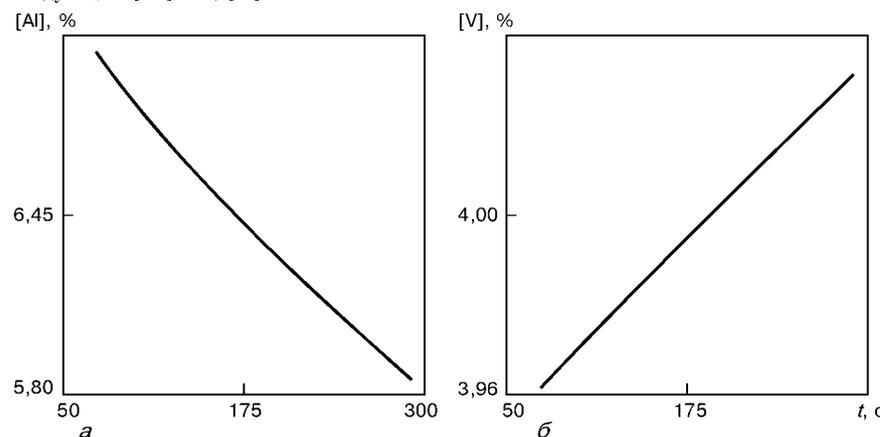


Рис. 4. Зависимости массовых долей алюминия (а) и ванадия (б) в гарниже ПЕ от времени выдержки

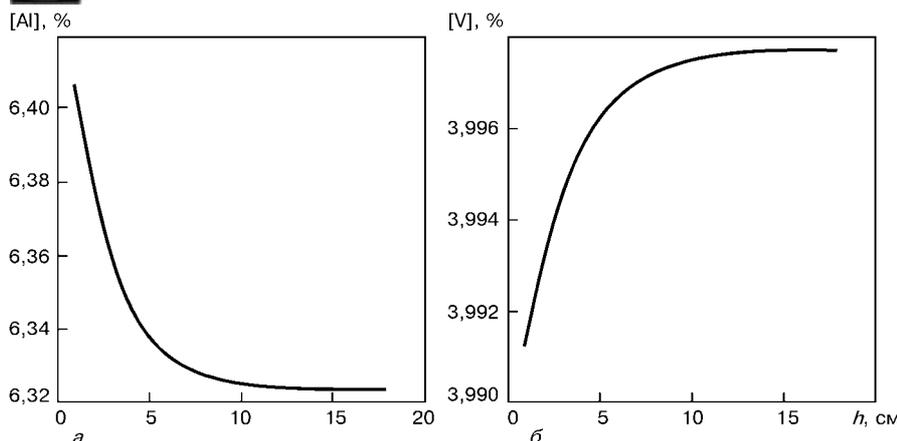


Рис. 5. Зависимость массовых долей алюминия (а) и ванадия (б) от высоты слитка h

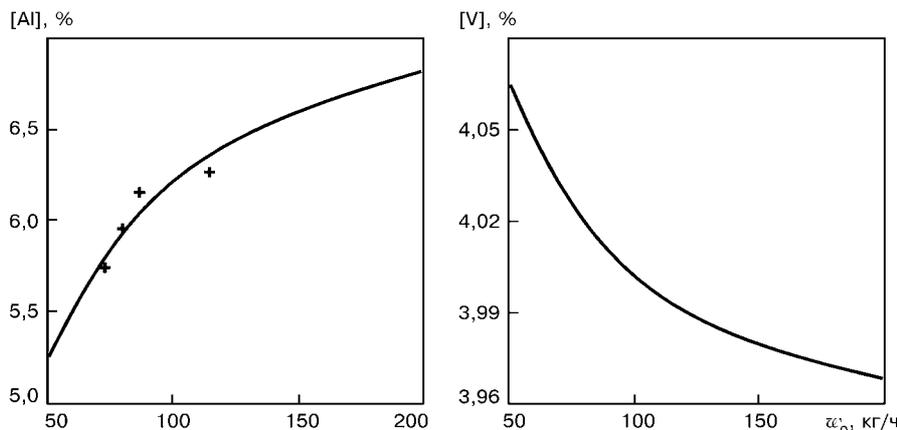


Рис. 6. Зависимости стационарных массовых долей алюминия (а) и ванадия (б) от массовой скорости w_0 подачи шихты

содержания алюминия и ванадия показаны на рис. 5. Поведение приведенных зависимостей сходно с выходом на стационарный режим химического состава в ПЕ, однако стационарное состояние в слитке наступает несколько позже (на 3–5 сливов металла из ПЕ).

На рис. 6 показаны зависимости стационарных значений массовых долей алюминия и ванадия в слитке от массовой скорости подачи заготовки. Поведение этих кривых существенно различается. Если значение стационарной массовой доли алюминия с увеличением скорости подачи заготовки возрастает, то содержание ванадия, наоборот, уменьшается.

Проверка адекватности предложенной математической модели. Для проверки полученных в рамках изложенной математической модели результатов проведена серия экспериментальных плавки цилиндрических слитков из титанового сплава Ti–6Al–4V диаметром 200 мм при следующих технологических параметрах [5]:

мощность электронно-лучевых пушек, обогревающих ПЕ, — 290 кВт;

мощность электронно-лучевых пушек, обогревающих кристаллизатор, — 24 кВт;

ширина ПЕ — 660 мм;
длина ПЕ — 330 мм;
массовая доля алюминия в сплавляемой заготовке — 7,41 %;
массовая доля ванадия в сплавляемой заготовке — 3,94 %.

Сравнение данных химического анализа проб, взятых из выплавленных слитков, с результатами расчета (рис. 6) показали достаточно высокую точность предложенной модели.

Выводы

1. Разработана математическая модель, позволяющая описать процессы испарения легирующих элементов при электронно-лучевой плавке слитков титанового сплава Ti–6Al–4V.

2. В рамках предложенной модели исследован характер влияния таких технологических параметров процесса плавки, как скорость подачи шихты, количество сливов металла в кристаллизатор, время выдержки расплава в ПЕ на химический состав металла на каждом этапе плавки.

3. Экспериментальные данные, полученные в результате

серии плавки, показали высокую точность разработанной модели.

1. *Poulsen E., Chinnis W., Mede M.* Status of titanium cold hearth melting // Proc. of the Ninth World Conf. on Titanium (Saint Petersburg, Russia, 7–11 June, 1999). — Saint-Petersburg: CRISN «Prometeу», 1999. — P. 1541–1544.
2. *Некоторые тенденции развития металлургического передела титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин и др. // Пробл. спецэлектрометаллургии. — 1996. — № 1. — С. 25–31.
3. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
4. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 246 с.
5. *Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron-beam cold-hearth melting of Ti–6Al–4V ingots* / S. V. Akhonin, N. P. Trigub, V. N. Zamkov, S. L. Semiatin // Metallurgical and Materials Transaction. — 2003. — V. 34b. — P. 447–454.
6. *А. А. Жуховицкий, Л. А. Шварцман.* Физическая химия. — М.: Металлургия, 1976. — 543 с.
7. *Иванченко Н. В., Устинов А. И., Мохорт В. А.* Термодинамический анализ испарения в вакууме титана и никеля из расплава Ti–Ni // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 3. — С. 15–18.
8. *Свойства неорганических соединений.* Справочник / А. И. Ефимов, Л. П. Белорукова, И. В. Василькова, В. П. Чечев. — Л.: Химия, 1983. — 392 с.

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

Поступила 05.03.2007