

УДК 669.187.526.001.5

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ОПЛАВЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ СЛИТКОВ-СЛЯБОВ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

С. В. Ахонин, А. С. Миленин, А. Н. Пикулин

Разработана математическая модель испарения легирующих элементов при электронно-лучевом оплавлении слитков-слябов из сплавов на основе титана. В рамках предложенной модели получены зависимости химического состава оплавленного слоя слитка от технологических параметров процесса. Адекватность модели подтверждена экспериментальными данными, полученными в результате оплавления поверхности слитков-слябов сплава Ti-6Al-4V.

Mathematical model of evaporation of alloying elements in electron beam surface melting of ingots-slabs from titanium-base alloys has been developed. Dependencies of chemical composition of melted layer of ingot on technological parameters of the process were obtained in the scope of this offered model. Adequacy of model was confirmed by experimental data obtained as a result of surface melting of Ti-6Al-4V alloy ingots-slabs.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое оплавление; слиток-сляб; оплавляемый поверхностный слой; химический состав; испарение

**Введение.** В силу различных причин на поверхности слитков, полученных путем электронно-лучевого или вакуумно-дугового переплава, образуются дефекты, отрицательно влияющие на свойства металла. Одним из способов удаления поверхностных дефектов является электронно-лучевое оплавление (ЭЛО) поверхности слитков [1].

Отличительной особенностью этого процесса является то, что он проходит в вакууме, поэтому различная упругость паров легирующих элементов сплавов может привести к изменению химического состава поверхностного слоя. Таким образом, важным аспектом оптимизации процесса ЭЛО является обеспечение соответствия состава оплавленного слоя установленным стандартам.

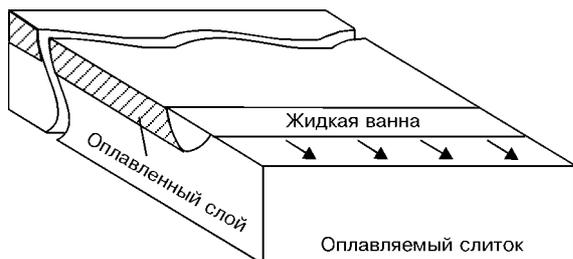


Рис. 1. Технологическая схема электронно-лучевого оплавления

Данную задачу решали методом математического моделирования на примере процесса ЭЛО слитков-слябов титанового сплава Ti-6Al-4V. Предложенная модель позволяет получить зависимости химического состава оплавленного слоя от различных технологических параметров процесса ЭЛО.

**Технология ЭЛО поверхности слитков-слябов.** Сущность технологии ЭЛО поверхности слитков-слябов заключается в расплавлении поверхностного слоя электронными лучами на глубину, достаточную для удаления всех дефектов. Путём сканирования электронного луча на поверхности слитка создают линейный источник тепла на всю ширину слитка-сляба, вследствие чего на оплавляемой поверхности формируется узкая ванна жидкого металла (рис. 1). Посредством перемещения источника вдоль слитка производят оплавление всей поверхности.

Эта схема процесса ЭЛО реализована на базе специализированной электронно-лучевой установки УЭ-185 в производственном цехе электронно-лучевой плавки ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины [2].

**Моделирование процессов испарения легирующих элементов сплава из оплавляемого слоя при ЭЛО поверхности слитка-сляба.** В основе математического моделирования испарения, происходящего при оплавлении поверхности слитка, лежат уравнения материального баланса, отражающие процессы массообмена через фазовые поверхности, ограничивающие область расплавленного металла (жидкую ванну).

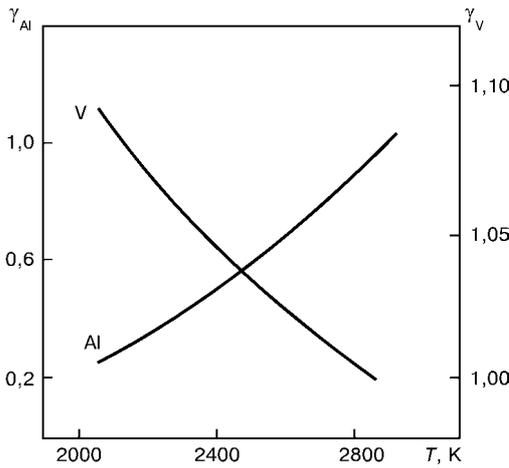


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициентов активности алюминия и ванадия в жидкой фазе сплава Ti-6Al-4V

Так, в рассматриваемом случае в жидкую ванну поступает плавящийся металл первоначального состава, в то время как из неё уходит кристаллизующийся металл конечного состава. Кроме того, с поверхности жидкой ванны происходит испарение металла. В предположении, что концентрации элементов сплава в жидкой ванне равны их конечной концентрации в оплавленном слое слитка, уравнения материального баланса для каждого элемента при ЭЛО поверхности слитка-сляба из сплава Ti-6Al-4V принимают вид

$$\begin{cases} \frac{d(\rho V_B [Ti]_l)}{dt} = m[Ti]_0 - S\pi_{Ti} - m_1[Ti]_1; \\ \frac{d(\rho V_B [Al]_l)}{dt} = m[Al]_0 - S\pi_{Al} - m_1[Al]_1; \\ \frac{d(\rho V_B [V]_l)}{dt} = m[V]_0 - S\pi_V - m_1[V]_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность сплава, кг/м<sup>3</sup>;  $V_B$  — объём ванны жидкого металла, м<sup>3</sup>;  $m$  — скорость поступления металла в жидкую ванну, кг/с;  $m_1$  — скорость перехода металла из жидкого состояния в твёрдое, кг/с;  $S$  — площадь фазовой поверхности жидкая фаза-газовая фаза, м<sup>2</sup>;  $[Ti]_0$ ,  $[Al]_0$ ,  $[V]_0$  — начальные массовые концентрации соответственно титана, алюминия и ванадия;  $[Ti]_1$ ,  $[Al]_1$ ,  $[V]_1$  — конечные массовые концентрации в оплавленном слое соответственно титана, алюминия и ванадия;  $\pi_{Ti}$ ,  $\pi_{Al}$ ,  $\pi_V$  — удельные скорости испарения соответствующих элементов с поверхности расплава, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Поскольку большую часть времени процесс ЭЛО происходит в режиме, приближенном к стационарному, то это означает равенство нулю производных по времени в выражении (1):

$$\frac{d(\rho V_B [Ti]_l)}{dt} = \frac{d(\rho V_B [Al]_l)}{dt} = \frac{d(\rho V_B [V]_l)}{dt} = 0.$$

Скорость поступления металла в жидкую ванну вычисляется из следующего соотношения:

$$m = hb\rho v,$$

где  $h$  — глубина проплавления, м;  $b$  — ширина слитка, м;  $v$  — скорость перемещения фокального пятна по поверхности расплава, м/с.

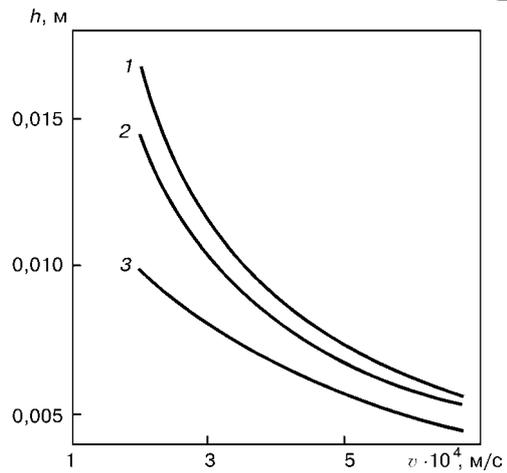


Рис. 3. Зависимость глубины проплавления  $h$  от скорости движения  $v$  фокального пятна электронного луча по поверхности слитка при различных значениях мощности электронно-лучевой пушки, Вт: 1 — 153850; 2 — 125500; 3 — 100000

Удельная скорость испарения каждого из элементов сплава с поверхности жидкой ванны вычисляется согласно уравнению Ленгмюра [3]:

$$\pi_i = k_i X_i, \quad (2)$$

где  $k_i = \gamma_i p_i^0 \frac{\sqrt{M_i}}{2\pi R T}$  — константа скорости испарения;  $\gamma_i$  — коэффициент активности  $i$ -го элемента (алюминия, ванадия, титана) в растворе;  $p_i^0$  — равновесное давление паров соответствующего элемента, Па;  $M_i$  — молярная масса элемента, кг/моль;  $X_i$  — мольная доля элемента у поверхности жидкой ванны;  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура жидкого металла, К.

Для титана, алюминия и ванадия зависимости равновесного давления паров от температуры следующие [4]:

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

В общем случае коэффициенты активности  $\gamma_i$  являются функциями температуры расплава и его состава. Соответствующие температурные зависимости вычисляли в рамках модели Редлиха-Кистера для тройной системы Ti-Al-V с учётом мольных концентраций соответствующих элементов в рассматриваемом сплаве [5]. Как видно из рис. 2, коэффициенты активности алюминия и ванадия при повышении температуры жидкого металла ведут себя по-разному. Коэффициент активности алюминия монотонно растёт, изменяясь в диапазоне значений от 0,2 и выше, тогда как коэффициент активности ванадия убывает, принимая значения, близкие к 1. Коэффициент активности титана как основного элемента раствора принят равным 1 [6].



Концентрация элементов на поверхности жидкой ванны определяется как исходным составом сплава, так и процессами массопереноса в жидкой фазе [7]. С учётом этого, а также того факта, что в большинстве реальных сплавов концентрация титана значительно превосходит концентрацию других элементов, соотношения (2) принимают вид

$$\begin{cases} \pi_{Ti} \cong k_{Ti} \left(1 - \frac{M_{Ti}}{M_{Al}} [Al] - \frac{M_{Ti}}{M_V} [V]\right); \\ \pi_{Al} \cong \left(\frac{1}{\beta_{Al}\rho} + \frac{M_{Al}}{M_{Ti}k_{Al}}\right)^{-1} [Al]; \\ \pi_V \cong \left(\frac{1}{\beta_V\rho} + \frac{M_V}{M_{Ti}k_V}\right)^{-1} [V], \end{cases}$$

где  $\beta_{Al}$ ,  $\beta_V$  — коэффициенты массопереноса соответственно алюминия и ванадия в жидком титане, м/с.

Так как упругость пара ванадия существенно меньше упругости пара алюминия (при температуре около 2000 К более чем на три порядка), и градиент концентрации этого элемента в поверхностном слое расплава незначителен, то можно принять, что ванадий распределён равномерно по глубине жидкой ванны.

Коэффициент массопереноса алюминия в жидком титане приблизительно равен  $1 \cdot 10^{-5}$  м/с [6].

Таким образом, система уравнений материального баланса (1) приобретает вид

$$\begin{cases} hb\rho v (1 - [Al]_0 - [V]_0) - Sk_{Ti} \left(1 - \frac{M_{Ti}}{M_{Al}} [Al]_1 - \frac{M_{Ti}}{M_V} [V]_1\right) - m_1 (1 - [Al]_1 - [V]_1) = 0; \\ hb\rho v [Al]_0 - S \left(\frac{1}{\beta_{Al}\rho} + \frac{M_{Al}}{M_{Ti}k_{Al}}\right)^{-1} [Al]_1 - m_1 [Al]_1 = 0; \\ hb\rho v [V]_0 - S \frac{M_{Ti}k_V}{M_V} [V]_1 - m_1 [V]_1 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для расчёта температурного поля в области воздействия электронных лучей на металл слитка был использован теоретико-экспериментальный метод,

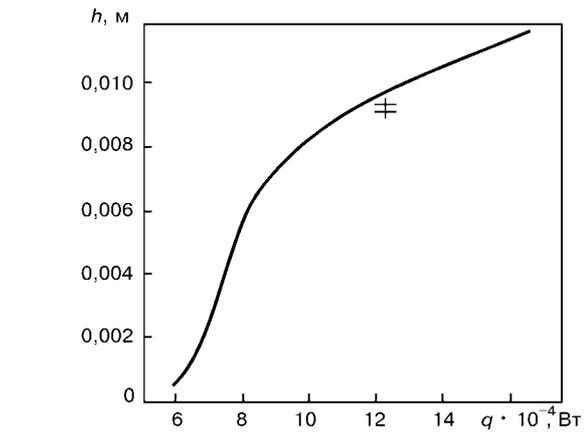


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления  $h$  от мощности электронно-лучевой пушки  $q$ ; сплошной линией обозначена теоретическая зависимость глубины проплавления от суммарной мощности электронно-лучевых пушек при скорости движения фокального пятна по поверхности слитка  $v = 0,000322$  м/с, плюсами — экспериментальные данные

разработанный Н. Н. Рыкалиным [8, 9], в соответствии с которым получены зависимости глубины проплавления  $h$  и площади поверхности ванны жидкого металла  $S$  от технологических параметров процесса ЭЛО.

На рис. 3, 4 даны примеры использования упомянутой тепловой модели, показаны зависимости глубины проплавления от мощности электронно-лучевой пушки и скорости перемещения фокального пятна по оплаиваемой поверхности слитка-сляба.

С учётом этих зависимостей система уравнений материального баланса однозначно разрешима относительно неизвестных  $[Al]_1$  и  $[V]_1$ .

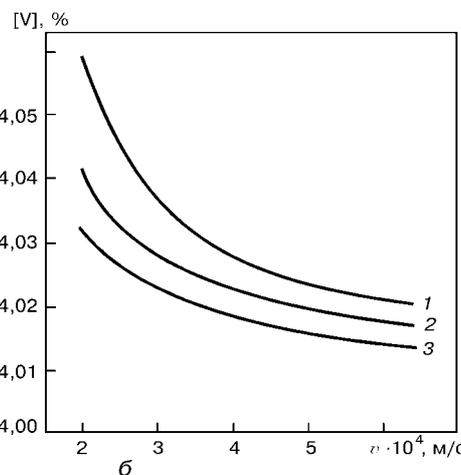
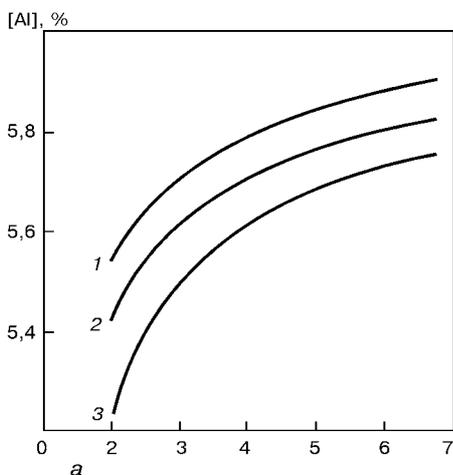


Рис. 5. Зависимость массовых долей алюминия (а) и ванадия (б) в оплавленном поверхностном слое от скорости движения фокального пятна электронного луча по поверхности слитка при различных значениях мощности электронно-лучевой пушки, Вт: 1 — 153850; 2 — 125500; 3 — 100000. Здесь и на рис. 6 ширина слитка достигает 0,94 м; начальная концентрация алюминия и ванадия в слитке составляет соответственно 6,3 и 4,0 %

Рассчитаны зависимости состава оплавленного слоя от таких технологических параметров процесса ЭЛО, как мощность электронно-лучевой пушки и скорость перемещения фокального пятна по оплаиваемой поверхности слитка-сляба (рис. 5, 6).

Первые существенно нелинейны, особенно в области больших значений мощности. Кроме того, если концентрация алюминия с возрастанием мощности уменьшается, то количество ванадия в оплавленном слое, наоборот, монотонно увеличивается. Что касается вторых зави-



симостей, то они также нелинейны и тем больше, чем выше значения приложенной мощности. Для данных зависимостей характерно и то, что с ростом скорости фокального пятна количество алюминия увеличивается, стремясь к начальной концентрации в слитке, тогда как количество ванадия монотонно уменьшается.

Такая существенная разница в характере зависимостей концентраций рассматриваемых элементов связана прежде всего с тем, что уровень упругости паров алюминия и титана больше, чем у ванадия (при температуре 2000 К давление паров алюминия, титана и ванадия составляет соответственно 635,2; 1,0 и 0,4 Па). Кроме того, имеет значение различное поведение коэффициентов активности указанных элементов при изменении температуры.

**Проверка адекватности модели экспериментальным данным.** Адекватность рассмотренной модели проверяли на основе экспериментальных данных, полученных в процессе ЭЛО поверхности слитка-сляба из сплава Ti-6Al-4V.

Процесс оплавления производили в следующем режиме:

мощность источника, кВт	120;
оплавляемая часть поверхности слитка, м:	
длина	0,87;
ширина	0,94;
толщина слитка	0,16;
скорость движения фокального пятна электронного луча по поверхности слитка, м/с	$3,22 \cdot 10^{-4}$ ;
начальная концентрация в слитке, %:	
алюминия	6,3;
ванадия	4,0.

Посредством химического анализа состава оплавленного слоя зафиксировано 5,79 % алюминия и 4,03 % ванадия в оплавленном слое.

Согласно приведенной модели, при данных технологических параметрах процесса ЭЛО поверхности слитка-сляба из сплава указанного состава содержание этих легирующих элементов составляет соответственно 5,67 и 4,0 %.

Экспериментальная оценка глубины проплавления при указанном режиме ЭЛО слитка-сляба показала, что её среднее значение составляет 9 мм. Таким образом, погрешность расчёта локального поля температур в области воздействия электронных лучей не превышает 7 % (рис. 4).

### Выводы

1. Разработана математическая модель, позволяющая описать процессы испарения легирующих элементов при оплавлении слитков-слябов из сплавов на основе титана.

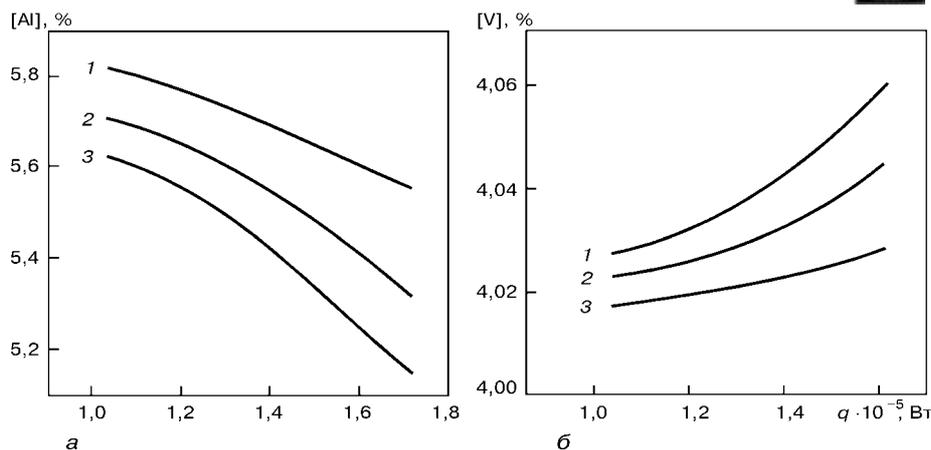


Рис. 6. Зависимость массовой доли алюминия (а) и ванадия (б) в оплавленном поверхностном слое от мощности электронно-лучевой пушки при различных скоростях движения фокального пятна электронного луча по поверхности слитка, м/с: 1 – 0,00050; 2 – 0,00032; 3 – 0,00025

2. В рамках предложенной модели рассмотрены процессы испарения элементов системы Ti-Al-V с учётом температурных зависимостей коэффициентов активности элементов в растворе и характера поведения теплового поля в области воздействия электронных лучей, также получены зависимости состава оплавленного слоя слитка-сляба от технологических параметров процесса ЭЛО.

3. Адекватность разработанной модели подтверждена данными, установленными при ЭЛО поверхности слитка-сляба титанового сплава Ti-6Al-4V. Результаты, полученные в рамках предложенной математической модели, соответствуют экспериментальным данным с высокой степенью точности.

1. *Электронно-лучевое* оплавление слитков титана / А. Н. Пикунин, Г. В. Жук, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин // *Соврем. электрометаллургия*. — 2003. — № 4. — С. 17–19.
2. *Электронно-лучевая* установка УЭ-185 для оплавления поверхностного слоя слитков / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. Н. Пикунин и др. // *Там же*. — 2003. — № 3. — С. 12–14.
3. *Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А.* Физическая химия. — М.: *Металлургия*, 1976. — 543 с.
4. *Свойства неорганических соединений: Справ.* / А. И. Ефимов, Л. П. Белорукова, И. В. Василькова, В. П. Чечев — Л.: *Химия*, 1983. — 392 с.
5. *Иванченко Н. В., Устинов А. И., Мохорт В. А.* Термодинамический анализ испарения в вакууме титана и никеля из расплава Ti-Ni // *Соврем. электрометаллургия*. — 2003. — № 3. — С. 15–18.
6. *Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron-beam cold-hearth melting of Ti-6Al-4V ingots* / S. V. Akhonor, N. P. Trigub, V. N. Zamkov, S. L. Semiatin // *Metallurgical and Materials Transaction*. — 2003. **34b**, № 8. — P. 447–454.
7. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: *Наук. думка*, 1997. — С. 181–198.
8. *Н. Н. Рыкалин*. — *Тепловые основы сварки*. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — Ч.1. — С. 150–170.
9. *Рыкалин Н. Н.* Расчёты тепловых процессов при сварке. — М.: *Машгиз*, 1951. — С. 80–89.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 20.05.2005