



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ ПРИ ВЫПЛАВКЕ СЛИТКОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ УСТАНОВКЕ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТЬЮ

С.В. Ахонин, А.Ю. Северин, В.А. Березос, А.Г. Ерохин

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Построена математическая модель, устанавливающая зависимость концентрации алюминия и других легирующих элементов в слитке многокомпонентного титанового сплава, получаемого способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью, от технологических параметров плавки, химического состава исходной шихты и физико-химических констант титанового сплава. Проверена адекватность построенной математической модели и проанализировано влияние технологических параметров плавки и химического состава исходной шихты на химический состав выплавляемых слитков на примере процесса получения слитка сплава алюминид титана Ti-29Al-12Nb-3Cr-3Zr способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Показано, что построенная математическая модель с достаточной степенью точности описывает реальный процесс испарения при электронно-лучевой плавке алюминид титана. Относительная погрешность расчетных результатов в сравнении с экспериментальными данными составляет от 3,2 для алюминия до 7,3 % для циркония. Созданная математическая модель испарения позволяет прогнозировать химический состав выплавляемых слитков многокомпонентных титановых сплавов и может быть использована в производстве для получения слитков способом электронно-лучевой плавки с гарантированным химическим составом. Библиогр. 12, табл. 1, ил. 7.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; слиток; испарение; математическое моделирование; скорость плавки; титановые сплавы; алюминид титана; легирующие элементы

Последние достижения на пути к увеличению производительности электронно-лучевых установок (ЭЛУ) с промежуточной емкостью и повышению надежности их работы [1] позволили снизить себестоимость выплавки титановых слитков до уровня себестоимости получения титановых слитков способом вакуумно-дугового переплава (ВДП) [2]. Это способствует все большему применению технологии электронно-лучевой плавки (ЭЛП) с промежуточной емкостью при выплавке слитков титана и его сплавов [3].

Однако при выплавке слитков титановых сплавов способом ЭЛП возникает проблема в обеспечении заданного химического состава металла. Это вызвано тем, что плавка в ЭЛУ осуществляется в более высоком вакууме, чем при ВДП, и легирующие элементы с упругостью пара, превышающей упругость пара титана, испаряются интенсивнее. К таким элементам относятся алюминий, хром, марганец и др. Но прежде всего эта проблема касается алюминия, поскольку он является легирующим элементом практически во всех титановых сплавах.

Цель настоящей работы заключается в оценке влияния технологических параметров ЭЛП на со-

держание алюминия и других легирующих компонентов титановых сплавов в слитке на основе методов математического моделирования. Разработанная математическая модель позволит определять параметры ЭЛП многокомпонентных титановых сплавов, которые обеспечат получение слитков гарантированного химического состава.

Математическая модель процесса испарения при ЭЛП. В процессе ЭЛП с промежуточной емкостью (рис. 1) испарение алюминия и других компонентов сплава из расплава происходит с оплаваемого торца расходоуемой заготовки, а также из промежуточной емкости и кристаллизатора. При этом длительность переноса жидкого металла с оплаваемого торца расходоуемой заготовки в промежуточную емкость и из промежуточной емкости в кристаллизатор незначительна и на процессы испарения влияния практически не оказывает.

Для построения математической модели процессов испарения легирующих элементов при ЭЛП многокомпонентных титановых сплавов запишем уравнения материального баланса легирующих элементов и титана для каждой зоны, где металл находится в расплавленном состоянии, а связи между



зонами представим в виде массопотоков. Рассмотрим электронно-лучевую плавку расходуемой заготовки из титанового сплава $Ti-X_1-X_2-\dots-X_n$ с площадью поперечного сечения S_0 через промежуточную емкость в кристаллизатор. При этом будем полагать, что жидкий металл поступает в промежуточную емкость и кристаллизатор непрерывным потоком. Пусть массовая доля легирующих элементов в расходуемой заготовке составляет $[X_i]_0$, а титана — $[Ti]_0$.

Уравнения материального баланса легирующих элементов и титана будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_j} \rho [X_i]_j dV &= m_{j-1} [X_i]_{j-1} - S_j \pi_j^i - m_j [X_i]_j; \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_j} \rho [Ti]_j dV &= m_{j-1} [Ti]_{j-1} - S_j \pi_j^{Ti} - m_j [Ti]_j, \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ — легирующие элементы; $j = 1, 2, 3$ — зоны плавки (пленка жидкого металла на торце расходуемой заготовки, ванны жидкого металла в промежуточной емкости и в кристаллизаторе); V_j — объем жидкого металла в j -той зоне плавки; ρ — плотность расплава; $[X_i]_j$ — массовая доля i -того легирующего элемента в j -той зоне плавки; $[Ti]_j$ — массовая доля титана в j -той зоне плавки; S_j — площадь свободной поверхности жидкого металла в j -той зоне плавки; π_j^i и π_j^{Ti} — удельные потоки легирующих элементов и титана через межфазную поверхность в паровую фазу в j -той зоне плавки; m_{j-1} — массовая скорость поступления расплава в j -тую зону плавки; m_3 — массовая скорость затвердевания расплава в кристаллизаторе.

Согласно работе [4], время выхода процесса плавки на стационарный режим, при котором количество расплава в трех зонах плавки и его состав остаются неизменными, составляет от одной до трех десятков минут в зависимости от объема расплава. При стационарных условиях плавки должны выполняться следующие равенства:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_j} \rho [X_i]_j dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_j} \rho [Ti]_j dV = 0. \quad (2)$$

Поскольку для каждой зоны плавки выполняется условие

$$\sum_{i=1}^n [X_i]_j + [Ti]_j = 1, \quad (3)$$

где $j = 1, 2, 3$ — зоны плавки, то при установившихся режимах, согласно уравнениям (1) и (2), массовые потоки металла между зонами плавки будут связаны следующими соотношениями:

$$m_j = m_{j-1} - S_j \left(\sum_{i=1}^n \pi_j^i + \pi_j^{Ti} \right). \quad (4)$$

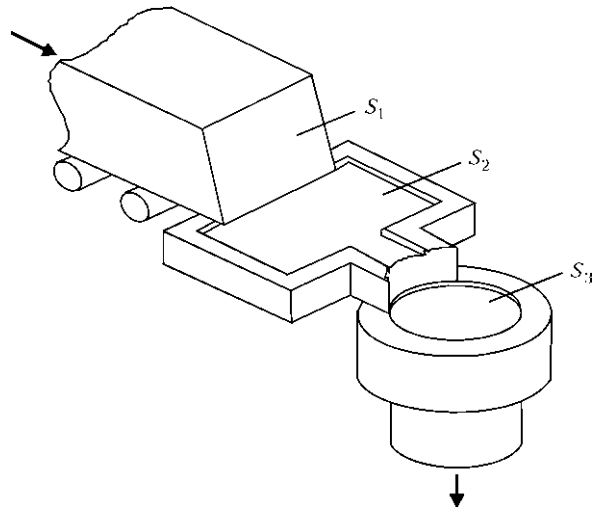


Рис. 1. Схема электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью

Определение скоростей испарения компонентов сплава из расплава в условиях его нагрева концентрированным источником нагрева является достаточно сложной задачей для математического описания и требует учета градиентов давлений и температур в паровой фазе, а также степени ионизации металлического пара [5]. Однако в камере плавки ЭЛУ давление остаточных газов составляет 0,01... 0,1 Па. При таком давлении длина свободного пробега атомов λ больше характерного размера вакуумной камеры, поэтому столкновением атомов в паровой фазе можно пренебречь и, как показано в работах [6, 7], в этом случае удельная массовая скорость испарения легирующих элементов и титана с поверхности расплава J_{ev} с хорошей степенью точности будет определяться уравнением Ленгмюра [8, 9]:

$$J_{ev} = \alpha_c p_i^0 \gamma_i N_i \sqrt{M_i / 2\pi RT}, \quad (5)$$

где α_c — коэффициент конденсации; N_i — мольная доля i -того элемента в расплаве; p_i^0 — равновесная упругость пара i -того элемента; γ_i — коэффициент активности i -того элемента; M_i — атомная масса i -того элемента; R — универсальная газовая постоянная; T — температура расплава.

Мольная доля i -того элемента в расплаве титанового сплава связана с его массовой концентрацией $[X_i]$ следующим соотношением:

$$N_i = \frac{[X_i] / M_i}{[Ti] / M_{Ti} + \sum_{i=1}^n [X_i] / M_i}. \quad (6)$$

С учетом выражения (3) уравнение (6) можно записать в виде

$$N_i = k_c \frac{M_{Ti}}{M_i} [X_i], \quad (7)$$

где k_c — коэффициент, значение которого зависит от химического состава расплава и определяется следующим выражением:



$$k_c = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n [X_i] \left(\frac{M_{Ti}}{M_i} - 1 \right)} \quad (8)$$

Например, для титанового сплава ВТ6 численное значение коэффициента k_c можно принять равным 0,958, а для титанового сплава ВТЗ-1 — $k_c \approx 0,964$.

Исходя из уравнений (5) и (7) и принимая значение коэффициента конденсации α_c равным единице, удельные потоки i -того компонента сплава (за исключением алюминия) и титана через межфазную поверхность в паровую фазу в j -той зоне плавки можно выразить следующим образом:

$$\pi_j^i = k_j^i [X_i]_j; \quad (9)$$

$$\pi_j^{Ti} = k_j^{Ti} [Ti]_j, \quad (10)$$

где $k_j^i = k_i^0 p_i^0(T_j) \gamma_j^i \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R M_i T_j}}$, $k_j^{Ti} = k_{Ti}^0 p_{Ti}^0(T_j) \gamma_j^{Ti} \times \sqrt{\frac{M_{Ti}}{2\pi R T_j}}$ — являются константами скорости испарения i -того компонента сплава и титана в j -той зоне плавки; T_j — температура расплава в j -той зоне плавки.

Упругость пара алюминия гораздо выше упругости паров титана и других легирующих компонентов сплава. Например, для температуры 2000 К упругость пара ниобия составляет $1 \cdot 10^{-6}$, пара циркония — $3,5 \cdot 10^{-4}$, титана — 1, хрома — 114, алюминия — 642 Па. Поэтому алюминий испаряется намного интенсивнее, чем титан и другие легирующие компоненты сплава. Вследствие этого концентрация алюминия на поверхности расплава становится гораздо меньше концентрации алюминия в объеме расплава и возникает градиент концентрации алюминия в приповерхностном слое расплава. В работе [10] получено кинетическое уравнение процесса испарения легирующих элементов, которое одновременно учитывает массоперенос в расплаве и физико-химические реакции десорбции с поверхности расплава. Для расплава титана удельный поток алюминия из жидкого металла определяется следующим выражением:

$$\pi_j^{Al} = p_{Ti} \beta_j [Al]_j, \quad (11)$$

где $\beta_j = \left(\frac{1}{\beta_{Al}} + \frac{p_{Ti}}{k_j^{Al}} \right)^{-1}$ — суммарный коэффициент массопереноса алюминия в жидком металле в j -той зоне плавки; β_{Al} — коэффициент массопереноса алюминия в расплаве титана; $k_j^{Al} = \frac{p_{Al}^0 \gamma_j^{Al} M_{Ti}}{\sqrt{2\pi M_{Al} R T_j}}$ — константа скорости испарения алюминия в j -той зоне плавки; $[Al]_j$ — массовая доля алюминия в j -той зоне плавки; p_{Al}^0 — упругость пара чистого алюми-

ния; γ_j^{Al} — коэффициент активности алюминия в растворе в j -той зоне плавки.

С учетом формул (2), (4), (9) (11) уравнения материального баланса легирующих элементов и титана для стационарных условий плавки будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} m_{j-1} [X_i]_{j-1} &= S_j k_j^i [X_i]_j + m_j [X_i]_j; \\ m_{j-1} [Ti]_{j-1} &= S_j k_j^{Ti} [Ti]_j + m_j [Ti]_j; \\ m_{j-1} [Al]_{j-1} &= S_j \beta_j [Al]_j + m_j [Al]_j; \end{aligned} \quad (12)$$

$$m_j = m_{j-1} - S_j \left(\sum_{i=2}^n k_j^i [X_i]_j + k_j^{Ti} [Ti]_j + \beta_j [Al]_j \right),$$

где $i = 2, \dots, n$ — легирующие элементы (кроме алюминия); $j = 1, 2, 3$ — зоны плавки.

Построенная математическая модель (12) устанавливает зависимость массовой доли алюминия и других компонентов титанового сплава в слитке, полученном способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью, от технологических параметров плавки, химического состава исходной шихты и физико-химических констант титанового сплава. Данная модель позволяет прогнозировать химический состав выплавляемых слитков титановых сплавов и может быть использована в производстве для получения слитков с гарантированным химическим составом.

Проверка адекватности математической модели. Для проверки адекватности построенной математической модели и анализа влияния технологических параметров плавки и химического состава исходной шихты на химический состав выплавляемых слитков рассмотрим процесс получения слитка сплава алюминида титана Ti-29Al-12Nb-3Cr-3Zr способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. В этом случае математическая модель процессов испарения при ЭЛП будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} m_{j-1} [Al]_{j-1} &= (S_j p \beta_j^{Al} + m_j) [Al]_j; \\ m_{j-1} [Cr]_{j-1} &= (S_j k_j^{Cr} + m_j) [Cr]_j; \\ m_{j-1} [Nb]_{j-1} &= (S_j k_j^{Nb} + m_j) [Nb]_j; \\ m_{j-1} [Zr]_{j-1} &= (S_j k_j^{Zr} + m_j) [Zr]_j; \\ m_{j-1} [Ti]_{j-1} &= (S_j k_j^{Ti} + m_j) [Ti]_j; \end{aligned} \quad (13)$$

$$m_{j-1} = m_j + S_j (p_{Ti} \beta_j^{Al} [Al]_j + k_j^{Cr} [Cr]_j + k_j^{Nb} [Nb]_j + k_j^{Zr} [Zr]_j + k_j^{Ti} [Ti]_j),$$

где $j = 1, 2, 3$.

Коэффициент массопереноса алюминия β_{Al} в расплаве титана в условиях электронно-лучевой плавки составляет $6,6 \cdot 10^{-6}$ м/с [11]. Оценка численных значений коэффициентов активности титана и легирующих элементов в рамках модели Редлиха-Кистера [12] показала, что коэффициенты активности титана и ниобия могут быть приняты равными единице, хрома — 0,8, а алюминия — 0,3.

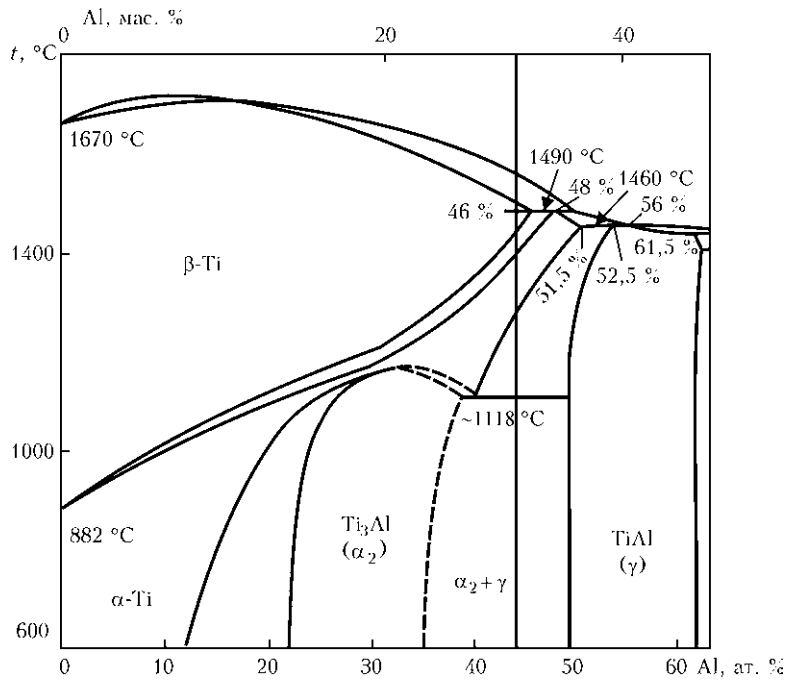


Рис. 2. Область диаграммы состояния титан-алюминий

Построенная математическая модель (13) представляет собой систему 18 нелинейных алгебраических уравнений которую решали численными методами, а именно методом секущих.

Для повышения точности математической модели испарения при ЭЛП алюминид титана необходимо учитывать влияние содержания алюминия на температуру плавления алюминид титана. При этом из-за испарения алюминия в процессе плавки его массовые доли в расплаве на оплавленном торце заготовки, в промежуточной емкости и кристаллизаторе будут разными и, как следствие, разной будет и температура плавления. Согласно диаграмме состояния титан-алюминий (рис. 2), зависимость температуры ликвидус T_L от содержания алюминия в расплаве в диапазоне концентраций алюминия от 20 до 35 мас. % (область вертикальной линии) в первом приближении можно описать следующим уравнением:

$$T_L = 1670 + 7,074[Al] - 0,3580[Al]^2.$$

С целью проверки адекватности построенной математической модели проведена опытная плавка слитка двухфазного ($\alpha_2 + \gamma$) алюминид титана на электронно-лучевой установке УЭ-208М, оснащенной промежуточной емкостью с внутренними разме-

рами 50×230×380 мм, в кристаллизатор диаметром 165 мм. Массовая скорость плавки составляла 30 кг/ч. Химический состав исходной шихты, а также расчетного и фактического составов опытного слитка представлены в табл. 1.

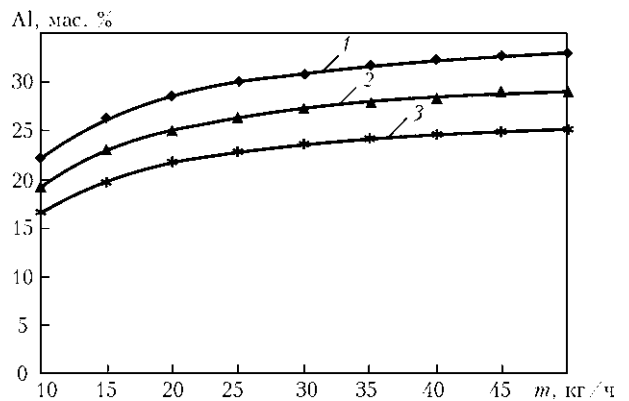


Рис. 3. Зависимость массовой доли алюминия в слитке алюминид титана от скорости плавки m при различном содержании алюминия в переплавляемой шихте $[Al]_0, \%$: 1 – 36; 2 – 32; 3 – 28

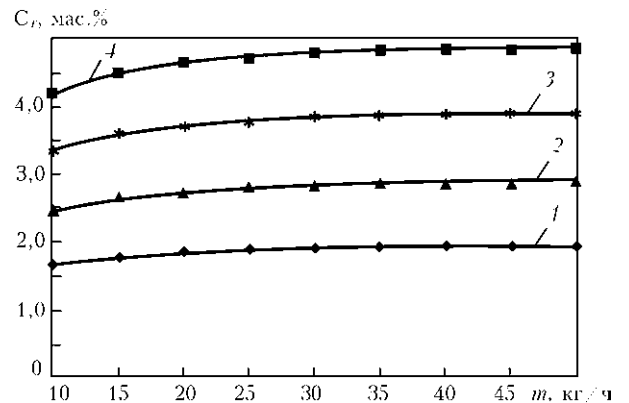


Рис. 4. Зависимость содержания хрома в слитке алюминид титана от скорости плавки m при различной массовой доле хрома в исходной шихте $[Cr]_0, \%$: 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5

Таблица 1. Фактический и расчетный химический состав интерметаллида системы TiAlNbCrZr					
Характеристика металла	Содержание элементов, мас. %				
	Al	Nb	Zr	Cr	Ti
Исходная шихта	32,76	11,42	2,74	3,60	Остальное
Слиток ЭЛП:					
эксперимент	28,82	11,72	3,16	3,51	
расчет	27,9	12,3	2,93	3,39	

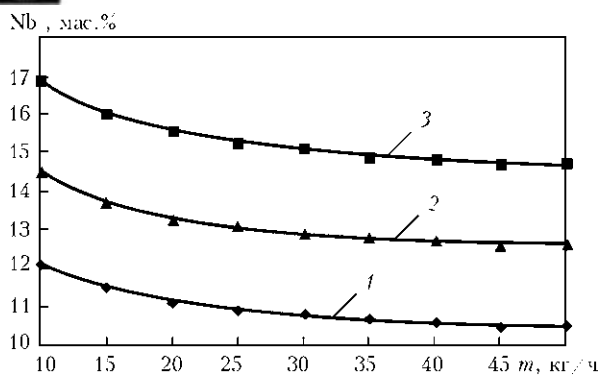


Рис. 5. Зависимость массовой доли ниобия в слитке алюминиды титана от скорости плавки m при различном содержании ниобия в исходной шихте $[Nb]_0$, %: 1 – 10; 2 – 12; 3 – 14

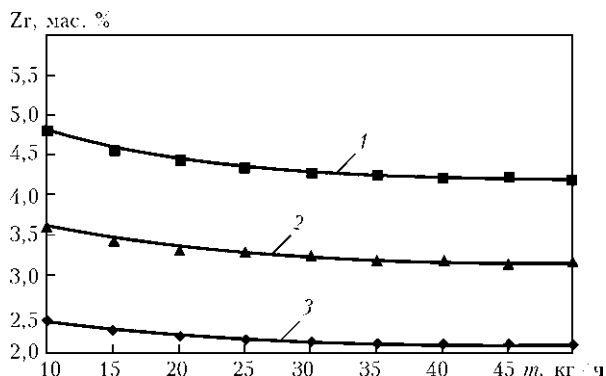


Рис. 6. Зависимость содержания циркония в слитке алюминиды титана от скорости плавки m при различной массовой доле циркония в исходной шихте $[Zr]_0$, %: 1 – 4; 2 – 3; 3 – 2

Анализ полученных результатов показал, что построенная математическая модель достаточно хорошо описывает реальный процесс испарения при электронно-лучевой плавке алюминиды титана: относительная погрешность расчетных результатов по сравнению с экспериментальными данными составляет, отн. %: 3,2 для алюминия; 4,9 для ниобия; 7,3 для циркония; 3,4 для хрома.

Анализ процессов испарения при ЭЛП алюминиды титана. С использованием математической модели процессов испарения в условиях ЭЛП для сплава Ti–29Al–12Nb–3Cr–3Zr построим зависимости содержания алюминия, хрома, ниобия и циркония в слитке диаметром 165 мм от скорости плавки

m при различных массовых долях легирующих элементов в исходной шихте (рис. 3–6).

Характер полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что при фиксированном составе исходной шихты увеличение скорости плавки приводит к уменьшению потерь алюминия (рис. 3) и хрома (рис. 4), т. е., к увеличению их содержания в слитке. При этом следует отметить, что при скоростях плавки свыше 40...50 кг/ч потери алюминия и хрома из-за испарения практически не меняются.

Массовые доли ниобия и циркония в слитке с увеличением скорости плавки монотонно уменьшаются (рис. 5, 6), что обусловлено меньшей скоростью испарения ниобия и циркония из расплава, по

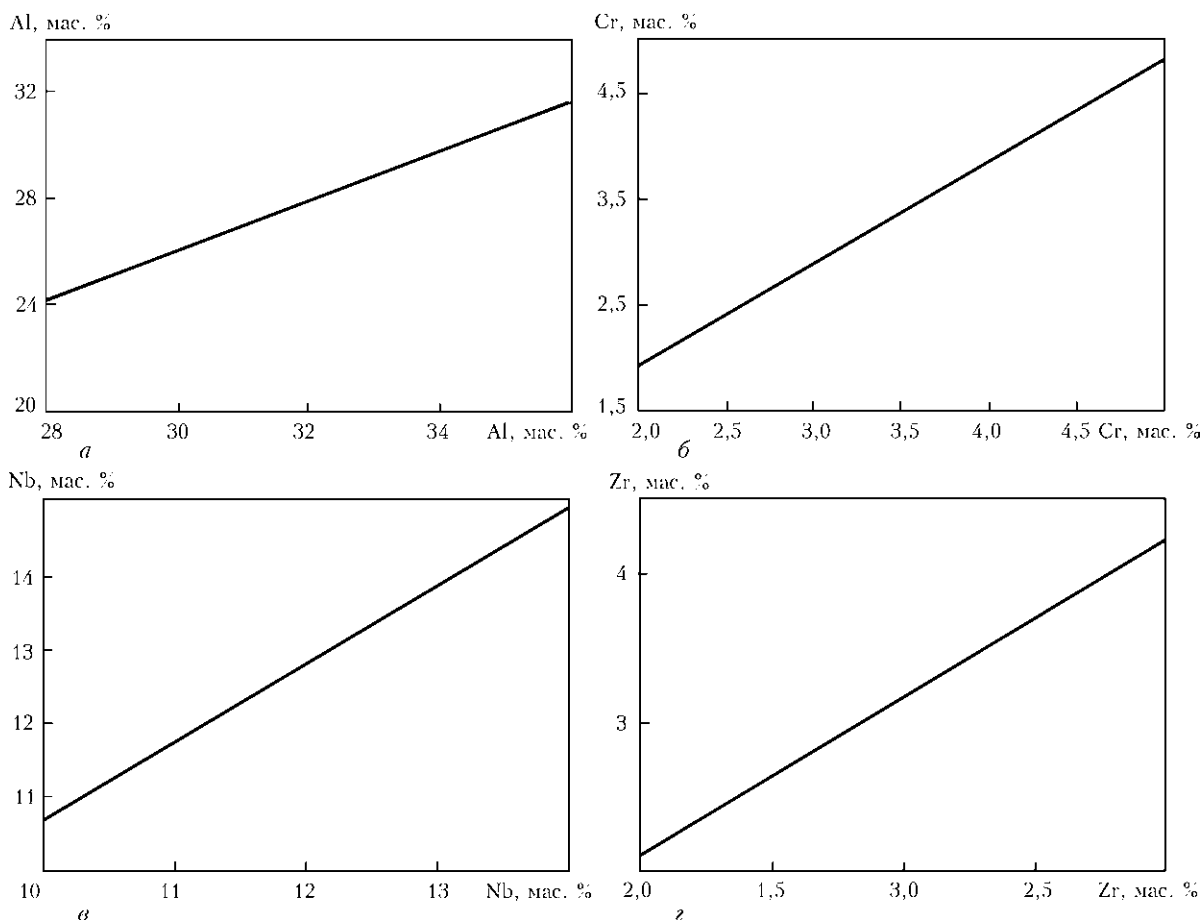


Рис. 7. Зависимость массовых долей алюминия (а), хрома (б), ниобия (в) и циркония (г) в слитке алюминиды титана от их содержания в исходной шихте при скорости плавки $m = 30$ кг/ч



сравнению с остальными компонентами сплава. При низких скоростях плавки суммарные потери алюминия и хрома превышают 10 абс. %, что вызывает повышение содержания ниобия и циркония на 2...3 абс. %. С увеличением скорости плавки потери алюминия и хрома уменьшаются, в результате чего снижаются массовые доли ниобия и циркония в слитке.

Следует отметить, что при скоростях плавки 40...50 кг/ч содержание ниобия и циркония в слитке лишь незначительно увеличивается, по сравнению с их массовой долей в исходной шихте, что связано с минимальными потерями алюминия, хрома и основы сплава (титана) при этих скоростях плавки.

На основании построенных зависимостей можно сделать вывод о том, что оптимальной скоростью плавки слитков двухфазного алюминид титана диаметром 165 мм является скорость 40...50 кг/ч. Применение этого режима плавки обеспечивает минимальное испарение легирующих компонентов сплава с высокой упругостью пара и предотвращает повышение содержания элементов с низкой упругостью пара.

Наиболее значимым фактором, влияющим на концентрацию легирующих элементов в слитке, является их исходное содержание в расходуемой заготовке.

На основе расчетов по математической модели были также построены зависимости массовых долей легирующих компонентов алюминид титана — алюминия (рис. 7), хрома, ниобия и циркония — в выплавленном слитке ЭЛП от их содержания в исходной шихте при различных скоростях плавки. Полученные графики позволяют определить необходимое содержание легирующего элемента сплава в исходной шихте для достижения требуемой концентрации этого элемента в слитке при заданной скорости плавки.

Выводы

1. Разработана математическая модель процессов испарения легирующих элементов из титановых сплавов при ЭЛП с промежуточной емкостью, которая устанавливает зависимость массовых долей

легирующих элементов в слитке от технологических параметров плавки и содержания легирующих элементов в исходной шихте.

2. На примере ЭЛП двухфазного алюминид титана показана высокая сходимость расчетных данных с результатами экспериментальных плавков.

3. Построены зависимости содержания алюминия, хрома, ниобия и циркония в слитке двухфазного алюминид титана Ti-29Al-12Nb-3Cr-3Zr от скорости плавки и массовых долей этих элементов в исходной шихте, которые позволяют прогнозировать химический состав выплавляемых слитков алюминид титана и могут быть использованы для получения слитков с требуемым химическим составом.

1. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекристаллических металлов. — Киев: Наук. думка, 2008. — 306 с.
2. *Technological aspects of designing of electron beam unit for melting of titanium* // A.I. Amelin, V.I. Kostenko, M.P. Kondratii, P.A. Pap // Proc. of the 12th World conf. on Titanium (Beijing, China, June 19-24 2011). — Beijing: Science Press, 2011. — P. 91-95.
3. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 246 с.
4. Мовчан Б.А., Ахонин С.В. Математическое моделирование процессов электронно-лучевого испарения многокомпонентного сплава на основе никеля из расплава ниобия // Пробл. спец. электротехнологии. — 1996. — № 3. — С. 20-24.
5. *Modeling of binary alloy (Al-Mg) anode evaporation in arc welding* // I. Semenov, I. Krivtsun, V. Demchenko et. al. // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. — 2012. — 20. — P. 1-12.
6. *Bellot J.P., Duval H., Ablitzer D. Validity of the Kinetic Langmuir's law for the volatilization of metallic elements in vacuum metallurgy* // Proc. symp. of gas interactions in nonferrous metals processing (Anaheim, USA, May 1996). — Anaheim, 1996. — P. 109-124.
7. *The use of mathematical models to determine parameters minimizing the volatilization losses in the electron beam melting process* // J.P. Bellot, H. Duval, M. Ritchie, D. Ablitzer // Proc. of the 9th World conf. on Titanium (Saint-Petersburg, Russia, 07-11 June 1999). — V. 1. — Saint-Petersburg: CSICM «Prometej», 1999. — P. 1442-1449.
8. *Жуковский А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия*. — М.: Металлургия, 1976. — 543 с.
9. *Шиллер З., Гайзинг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология*. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.
10. *Тихоновский А.Л., Ахонин С.В. Кинетика процессов массообмена в системе реальный раствор-паровая фаза* // Пробл. спец. электротехнологии. — 1992. — № 2. — С. 61-64.
11. *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 // Metallurgy and Materials Transactions B. — 2003. — 34B, August. — P. 447-454.
12. *Иванченко Н.В., Устинов А.И., Мохорт В.А. Термодинамический анализ испарения в вакууме титана и никеля из расплава Ti-Ni* // Современ. электротехнологии. — 2003. — № 3. — С. 15-18 с.

A mathematical model was constructed, which correlates concentration of aluminium and other alloying components in an ingot of multicomponent titanium alloy, produced by electron beam cold-hearth melting, with technological parameters of melting, initial charge composition and physico-chemical constants of the titanium alloy. Adequacy of the constructed mathematical model has been verified, and influence of technological parameters of melting and initial charge composition on chemical composition of the produced ingots is analyzed in the case of producing an ingot of titanium aluminide alloy Ti-29Al-12Nb-3Cr-3Zr by the process of electron beam cold-hearth melting. It is shown that the constructed mathematical model quite accurately describes the actual evaporation process in electron beam melting of titanium aluminide. Relative error of calculation results, compared to experimental data, is from 3.2 for aluminium up to 7.3 % for zirconium. Developed mathematical model of evaporation allows prediction of chemical composition of produced ingots of multicomponent titanium alloys, and can be used in production to manufacture ingots of a guaranteed composition by EBM process. Ref. 12, Table 1, Figures 7.

Keywords: electron beam melting; ingot; evaporation; mathematical simulation; melting rate; titanium alloys, titanium aluminide; alloying elements

Поступила 25.09.2013