

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ ПРИ ЕПП СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ Ti–Al–Nb–Cr–Mo

С.В. Ахонін, А.Ю. Северин, В.О. Березос, О.М. Пікулін, О.Г. Єрохін

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розроблено математичну модель процесів випаровування легуючих елементів при електронно-променевої плавці з проміжною ємністю зливків сплавів на основі алюмініду титану системи легування Ti–Al–Nb–Cr–Mo, що встановлює залежність концентрації легуючих елементів у зливку від технологічних параметрів плавки та хімічного складу вихідної шихти. Показано, що розроблена математична модель адекватно описує реальний процес випаровування при електронно-променевої плавці сплаву алюмініду титану. Встановлено закономірності випаровування легуючих елементів при електронно-променевої плавці сплавів на основі алюмініду титану системи Ti–Al–Nb–Cr–Mo, які дозволяють прогнозувати хімічний склад зливків та оптимізувати технологічні параметри плавки. Бібліогр. 21, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: електронно-променева плавка; зливки; випаровування; математичне моделювання; алюмінід титану; легуючі елементи

Вступ. За рахунок малої щільності (3,9...4,20 г/см³), термодинамічної стабільності, жаростійкості та високої питомої міцності в інтервалі температур 600...750 °С сплави на основі алюмінідів титану розглядаються як найбільш перспективні, що відповідають сучасним вимогам авіакосмічної, авіаційної та автомобільної промисловостей [1–7]. Заміна суперсплавів на нікелевій основі сплавами на основі алюмінідів титану дозволить знизити вагу деталей в 1,5...2,0 рази разом з їх здешевленням майже на третину. Актуальним також залишається завдання підвищення температур застосування титанових сплавів, що для комерційних жароміцних титанових сплавів типу ІМІ834, ВТ18У, ВТ41 становить 550...600 °С, що є недостатнім для деталей компресора та турбін нового покоління. Незважаючи на великий обсяг робіт, присвячених розробці та дослідженню γ -TiAl сплавів, проблема досягнення оптимального балансу властивостей у литому стані для здешевлення та удосконалення процесів їх виробництва залишається актуальною, тому необхідне продовження досліджень впливу легування, насамперед Nb, у комплексі з іншими β -стабілізуючими елементами на властивості сплавів на основі алюмінідів титану [8, 9].

Від якості одержаного зливка в значній мірі залежать властивості напівфабрикатів та готових виробів, одержаних з цього зливка. Виплавка хімічно однорідних зливків інтерметалідних титанових сплавів представляє собою нетривіальну технологічну задачу, яка ускладнюється цілим ря-

дом факторів як фізичної (різні температури плавлення та щільності компонентів), так і термодинамічної природи (нонваріантні перетворення) [10].

На даний час перспективним по отриманню зливків алюмінідів титану є спосіб електронно-променевої плавки, в якій використовується поверхневе концентроване джерело нагріву — електронний промінь. Електронно-променева плавка (ЕПП) дозволяє зменшувати ліквідаційні процеси за рахунок регулювання глибини рідкої ванни. Крім того, часткове зняття напруженого стану зливків можливе за рахунок ведення процесу в умовах мілкої рідкої ванни.

Однак при виплавці зливків титанових сплавів способом ЕПП виникає проблема забезпечення заданого хімічного складу металу. Це викликано тим, що плавка в електронно-променевої установці (ЕПУ) здійснюється в більш високому вакуумі, чим вакуумно-дугова плавка (ВДП), і легуючі елементи з пружністю пари, яка перевищує пружність пари титану, випаровуються більш інтенсивно. До таких елементів відносяться алюміній, хром, марганець та ін. Але в першу чергу ця проблема стосується алюмінію, тому що він є легуючим елементом практично всіх титанових сплавів, а в сплавах на основі алюмініду титану його вміст перевищує 20 мас. %.

Метою цієї роботи є дослідження процесів випаровування при електронно-променевої плавці сплавів на основі алюмініду титану системи легування Ti–Al–Nb–Cr–Mo методами математичного моделювання. Розроблена математична модель

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>

В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, О.М. Пікулін — <https://orcid.org/0000-0001-6327-3848>,

О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>

дозволить визначити закономірності зміни концентрації алюмінію й інших легуючих компонентів в зливках сплавів на основі алюмініду титану від технологічних параметрів ЕПП та параметри технологічного процесу ЕПП сплавів на основі алюмініду титану, які забезпечать одержання злиwkів гарантованого хімічного складу.

Математична модель процесів випаровування при ЕПП. Зазначимо, що характерною рисою процесу ЕПП є наявність трьох зон плавки: торець витратної заготовки (S_1), проміжна ємність (S_2) і кристалізатор (S_3) (рис. 1) [11]. При цьому час переносу рідкого металу з торця витратної заготовки у проміжну ємність і з проміжної ємності в кристалізатор незначний та на процеси випаровування практично не впливає [12].

Математичну модель процесів випаровування при ЕПП розробляли на основі рівнянь матеріального балансу алюмінію, титану й інших легуючих елементів для кожної стадії плавлення, при цьому зв'язки між стадіями заміняли масопотоками.

Розглянемо виплавку зливка алюмініду титану системи легування Ti–Al–Nb–Cr–Mo (мас. %). Нехай в процесі електронно-променевої плавки витратна заготовка із площею поперечного перерізу S_1 (m^2) подається в зону плавки над проміжною ємністю з постійною швидкістю m_0 (кг/с) і в ній містяться (масова частка) алюміній концентрації $[Al]_0$, титан $[Ti]_0$, ніобій $[Nb]_0$, молібден $[Mo]_0$ і хром $[Cr]_0$. При цьому будемо вважати, що рідкий метал надходить у проміжну ємність і кристалізатор безперервним потоком. У процесі плавки зміст алюмінію в рідкому металі змінюється до концентрації (масова частка) $[Al]_1$ на оплавленому торці заготовки, $[Al]_2$ у проміжній ємності, $[Al]_3$ у кристалізаторі. Концентрація хрому в рідкому металі міняється (масова частка) до $[Cr]_1$ на оплавленому торці заготовки, $[Cr]_2$ у проміжній ємності, $[Cr]_3$ у кристалізаторі. Концентрація ніобію в рідкому металі міняється до $[Nb]_1$ на оплавленому торці заготовки, $[Nb]_2$ у проміжній ємності та $[Nb]_3$ у кристалізаторі. Концентрація молібдену в рідкому металі міняється до $[Mo]_1$ на оплавленому торці заготовки, $[Mo]_2$ у проміжній ємності та $[Mo]_3$ у кристалізаторі. А концентрація титану в рідкому металі міняється (масова частка) до $[Ti]_1$ на оплавленому торці заготовки, $[Ti]_2$ у проміжній ємності та $[Ti]_3$ у кристалізаторі. Тому що при кристалізації зі швидкостями, що мають місце при ЕПП, для більшості елементів коефіцієнт розподілу дорівнює одиниці, концентрацію алюмінію, хрому, ніобію, цирконію й титану в зливку позначимо як $[Al]_3$, $[Cr]_3$, $[Nb]_3$, $[Mo]_3$ і $[Ti]_3$ відповідно.

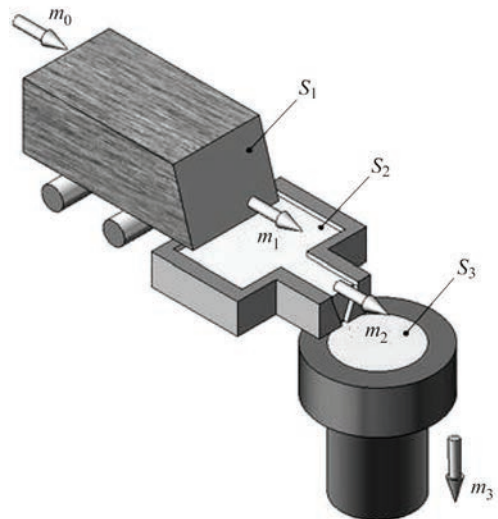


Рис. 1. Схема ЕПП з проміжною ємністю сплаву на основі алюмініду титану (пояснення в тексті)

Рівняння матеріального балансу алюмінію, хрому, ніобію, молібдену й титану для рідкого металу на торці заготовки, що витрачається, в проміжній ємності та в кристалізаторі мають наступний вигляд:

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

де $j = 1, 2, 3$ — зони рафінування, V_j — об'єм рідкого металу на торці заготовки, що витрачається, в проміжній ємності та кристалізаторі відповідно, m^3 ; ρ — щільність розплаву, $кг/м^3$; S_j — площа рідкого металу на оплавленому торці заготовки, що витрачається, в проміжній ємності та кристалізаторі відповідно, m^2 ; π_j^{Al} , π_j^{Cr} , π_j^{Nb} , π_j^{Mo} , π_j^{Ti} — питомі потоки алюмінію, хрому, ніобію, молібдену і титану через міжфазну поверхню в парову фазу відповідно, $кг/(с \cdot м^2)$; m_j — масова швидкість надходження розплаву з торця заготовки в проміжну ємність, з проміжної ємності до кристалізатора та масова швидкість кристалізації розплаву в кристалізаторі відповідно, $кг/с$.

При стаціонарних умовах плавки хімічний склад розплаву в кожній зоні рафінування залишається незмінним у часі, тобто повинні виконуватися наступні рівності [13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_j} \rho[Al]_j dV &= \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_j} \rho[Cr]_j dV = \\ &= \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_j} \rho[Nb]_j dV = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_j} \rho[Mo]_j dV &= \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_j} \rho[Ti]_j dV = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де $j = 1, 2, 3$.

Для кожної зони рафінування виконується умова:

$$[Ti]_j + [Al]_j + [Cr]_j + [Nb]_j + [Mo]_j = 1, \quad (3)$$

де $j = 1, 2, 3$. Тому при встановлених режимах плавки, згідно з рівняннями (1) та (2), масові потоки металу між зонами рафінування будуть зв'язані такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_0 - S_1 (\pi_1^{Al} + \pi_1^{Cr} + \pi_1^{Nb} + \pi_1^{Mo} + \pi_1^{Ti}); \\ m_2 &= m_1 - S_2 (\pi_2^{Al} + \pi_2^{Cr} + \pi_2^{Nb} + \pi_2^{Mo} + \pi_2^{Ti}); \\ m_3 &= m_2 - S_3 (\pi_3^{Al} + \pi_3^{Cr} + \pi_3^{Nb} + \pi_3^{Mo} + \pi_3^{Ti}). \end{aligned} \quad (4)$$

У камері плавки електронно-променевих установок тиск залишкових газів становить $10^{-3} \dots 10^{-4}$ торр. При такому тиску довжина вільного пробігу атомів (l) більше характерного розміру вакуумної камери, тому зіткненням атомів у паровій фазі можна знехтувати. Отже має місце молекулярний режим випаровування [14, 15]. У цьому випадку питома масова швидкість випаровування компонентів сплаву з поверхні в парову фазу J_{ev} (кг/(с·м²)) буде пропорційна їх концентрації в розплаві і визначатиметься рівнянням Ленгмюра [16, 17]:

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

де α_c — коефіцієнт конденсації; N_i — мольна частка i -того елемента; p_i^0 — рівноважна пружність пари, Па; γ_i — коефіцієнт активності; M_i — атомна маса легуючого елемента, кг/моль; R — універсальна газова стала, Дж/(моль·К); T — температура розплаву, К.

Мольна частка i -того елемента в розплаві алюмініду титану зв'язана з його масовою концентрацією $[X_i]$ наступним співвідношенням:

$$N_i = \frac{[X_i] / M_i}{[Ti] / M_{Ti} + [Al] / M_{Al} + [Cr] / M_{Cr} + [Nb] / M_{Nb} + [Mo] / M_{Mo}}, \quad (6)$$

де M_{Ti} , M_{Al} , M_{Cr} , M_{Nb} , M_{Mo} — молярні маси титану, алюмінію, хрому, ніобію й молібдену відповідно, кг/моль. З урахуванням виразу (3) після нескладних перетворень рівняння (6) можна записати в такому виді:

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

де k_c — коефіцієнт, значення якого залежить від хімічного складу розплаву й визначається рівнянням:

$$k_c = \frac{1}{1 + [Al] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Al}} - 1 \right) + [Cr] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Cr}} - 1 \right) + [Nb] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Nb}} - 1 \right) + [Mo] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Mo}} - 1 \right)}. \quad (8)$$

Розрахунок за представленою вище формулою показав, що для процесу виплавки сплаву алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Cr–2Mo чисельне значення коефіцієнта дорівнює $k_c = 0,86$.

Виходячи з рівнянь (5) і (7) та приймаючи значення коефіцієнта конденсації α_c рівним одиниці, питомі потоки алюмінію, хрому, ніобію, молібдену й титану через міжфазну поверхню в парову фазу в j -тій зоні плавки можна виразити в такий спосіб:

$$\begin{aligned} \pi_j^{Al} &= k_j^{Al} [Al]_j, \quad \pi_j^{Cr} = k_j^{Cr} [Cr]_j; \\ \pi_j^{Nb} &= k_j^{Nb} [Nb]_j, \quad \pi_j^{Mo} = k_j^{Mo} [Mo]_j; \\ \pi_j^{Ti} &= k_j^{Ti} [Ti]_j, \end{aligned} \quad (9)$$

де $j = 1, 2, 3$;

$$k_j^{Al} = k_c p_{Al}^0 (T_j) \gamma_j^{Al} \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R M_{Al} T_j}};$$

$$k_j^{Cr} = k_c p_{Cr}^0 (T_j) \gamma_j^{Cr} \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R M_{Cr} T_j}};$$

$$k_j^{Nb} = k_c p_{Nb}^0 (T_j) \gamma_j^{Nb} \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R M_{Nb} T_j}};$$

$$k_j^{Mo} = k_c p_{Mo}^0 (T_j) \gamma_j^{Mo} \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R M_{Mo} T_j}};$$

$$k_j^{Ti} = k_c p_{Ti}^0 (T_j) \gamma_j^{Ti} \sqrt{\frac{M_{Ti}}{2\pi R T_j}}$$

є константами швидкості випаровування алюмінію, хрому, ніобію, молібдену та титану в j -тій зоні плавки відповідно, кг/(с·м²); p_{Al}^0 , p_{Cr}^0 , p_{Nb}^0 , p_{Mo}^0 , p_{Ti}^0 — пружності пари алюмінію, хрому, ніобію, цирконію й титану в j -тій зоні плавки відповідно; γ_j^{Al} , γ_j^{Cr} , γ_j^{Nb} , γ_j^{Mo} , γ_j^{Ti} — коефіцієнти активності алюмінію, хрому, ніобію, молібдену й титану в j -тій зоні плавки відповідно; T_j — температура розплаву в j -тій зоні плавки, К.

Оцінка чисельних значень коефіцієнтів активності титану й легуючих елементів у рамках моделі Редліха–Кістера [18] показала, що коефіцієнти активності титану, ніобію та молібдену можуть бути прийняті рівними одиниці, хрому — 0,8, а алюмінію — 0,3.

Значення пружності пари алюмінію p_{Al}^0 , хрому p_{Cr}^0 , ніобію p_{Nb}^0 , молібдену p_{Mo}^0 та титану p_{Ti}^0 , які необхідні для розрахунків констант швидкості випаровування, визначали по наступних рівняннях [19]:

$$\begin{aligned}
 \lg p_{Al}^0 &= -\frac{16379}{T} + 9,979 - 0,335 \lg T; \\
 \lg p_{Cr}^0 &= -\frac{22598}{T} + 11,454 + 0,406 \lg T - \frac{0,781}{1000} T; \\
 \lg p_{Nb}^0 &= -\frac{39568}{T} + 13,205 - 0,288 \lg T - \frac{0,3}{1000} T; \\
 \lg p_{Mo}^0 &= -\frac{35904}{T} + 12,370 - 0,107 \lg T - \frac{0,363}{1000} T; \\
 \lg p_{Ti}^0 &= -\frac{25860}{T} + 12,392 - 0,142 \lg T - \frac{0,551}{1000} T.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Для підвищення точності математичної моделі випаровування при ЕПП алюмініду титану необхідно врахувати вплив вмісту алюмінію на температуру плавлення алюмініду титану [20]. При цьому, внаслідок випаровування алюмінію в процесі плавки, його концентрація в розплаві на оплавлюваному торці заготовки, у проміжній ємності та кристалізаторі буде різною, і, як наслідок, різною буде й температура плавлення. Згідно з діаграмою стану системи титан–алюміній (рис. 2) залежність температури ліквідус T_L від вмісту алюмінію в розплаві в діапазоні концентрацій алюмінію від 20 до 35 мас. % у першому наближенні можна описати наступним рівнянням:

$$T_L = 1670 + 7,074[Al] - 0,3580[Al]^2. \tag{11}$$

З урахуванням рівняння (9) із системи рівнянь (1)–(4) отримуємо математичну модель процесів випаровування компонентів сплаву на основі алюмініду титану при електронно-променевої плавці із проміжною ємністю:

$$\begin{aligned}
 m_{j-1}[Al]_{j-1} &= (S_j \rho \beta_j^{Al} + m_j)[Al]_j; \\
 m_{j-1}[Cr]_{j-1} &= (S_j k_j^{Cr} + m_j)[Cr]_j; \\
 m_{j-1}[Nb]_{j-1} &= (S_j k_j^{Nb} + m_j)[Nb]_j; \\
 m_{j-1}[Mo]_{j-1} &= (S_j k_j^{Mo} + m_j)[Mo]_j; \\
 m_{j-1}[Ti]_{j-1} &= (S_j k_j^{Ti} + m_j)[Ti]_j; \\
 m_{j-1} &= m_j + S_j (\rho \beta_j^{Al}[Al]_j + k_j^{Cr}[Cr]_j + \\
 &+ k_j^{Nb}[Nb]_j + k_j^{Mo}[Mo]_j + k_j^{Ti}[Ti]_j),
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

де $j = 1, 2, 3$.

Математична модель (12) являє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, яку вирішували чисельними методами.

Отримана математична модель (12) встановлює залежність концентрації алюмінію, хрому, ніобію, молібдену і титану в отриманому способом електронно-променевої плавки із проміжною ємністю зливку алюмініду титану від швидкості плавки, концентрації легуючих елементів у заготовці, що витрачається, і температури розплаву. Дана модель дозволяє прогнозувати хімічний склад злиwkів алюмініду титану, які виплавляються, й може

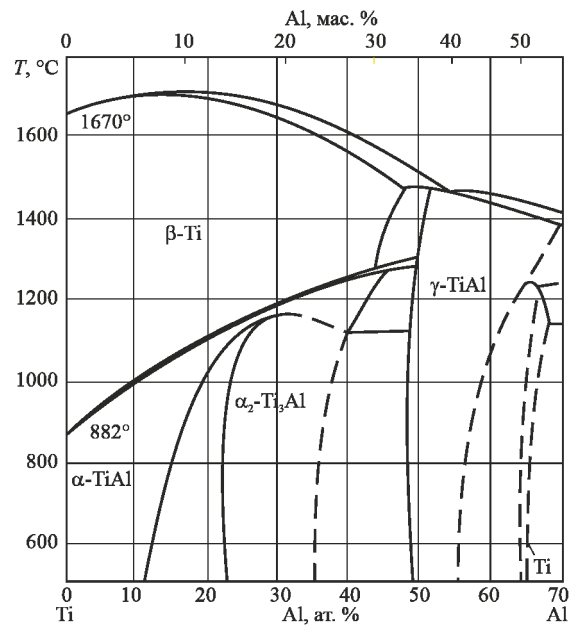


Рис. 2. Область діаграми стану системи титан–алюміній бути використана для одержання заготовок з необхідним хімічним складом.

Перевірка адекватності математичної моделі процесів випаровування при ЕПП. Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі (12) було проведено порівняння результатів розрахункового вмісту легуючих компонентів сплаву з результатами дослідної плавки зливка сплаву на основі алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo (мас. %).

Плавку зливка сплаву на основі алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo (мас. %) діаметром 200 мм здійснювали на електронно-променевої установці УЕ-208М [21]. В якості вихідних шихтових матеріалів використовували технічно чистий титан, алюміній, ніобій, молібден. Плавку вели за наступними технологічними режимами:

потужність електронно-променевого нагріву в кристалізаторі, кВт.	55
загальна потужність електронно-променевого нагріву в проміжній ємності та на заготовці, кВт	145
масова швидкість плавки, кг/год	60.

Отримано злиwkів діаметром 200 мм сплаву на основі алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo масою 106 кг (рис. 3).

Методом хімічного аналізу досліджено склад виплавленого зливка. Вміст легуючих елементів сплаву визначали методом індуктивно-зв'язаної плазми в оптично-емісійній спектроскопії (ICP-OES) на ICP-спектрометрі ICAP 6500 DUO. Результати досліджень хімічного складу металу показали рівномірний розподіл легуючих елементів по довжині виплавлених злиwkів (табл. 1).

Хімічний склад вихідної шихти, а також розрахункового й усередненого по довжині фактичного складу дослідного зливка представлено в табл. 2.



Рис. 3. Зливки на основі алюмінію титану Ti–28Al–7Nb–2Mo діаметром 200 мм

Аналіз отриманих результатів показав, що побудована математична модель описує процес випаровування легуючих елементів зі сплаву на основі алюмінію титану при ЕПП з досить високим ступенем точності. Відносна похибка розрахункових результатів від експериментальних даних не перевищує 4 % (відносних).

Залежність хімічного складу зливок сплаву на основі алюмінію титану системи легування Ti–Al–Nb–Cr–Mo від технологічних параметрів ЕПП. З використанням розробленої математичної моделі процесів випаровування в умовах ЕПП для сплаву Ti–28Al–7Nb–2Cr–2Mo (мас. %) побудовано залежності вмісту алюмінію, хрому, ніобію та молібдену в зливку сплаву алюмінію титану від швидкості плавки при різному вмісті легуючих елементів у вихідній шихті (рис. 4).

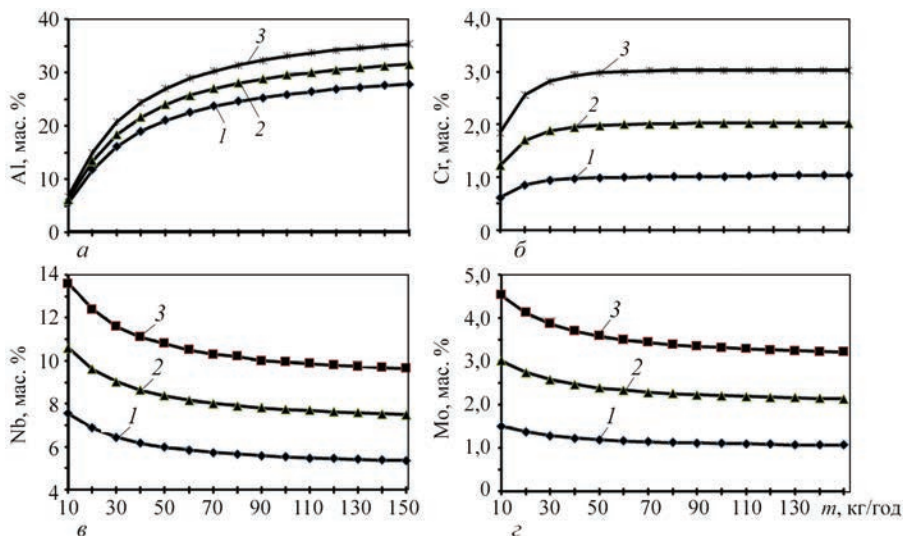


Рис. 4. Залежність вмісту Al (а), Cr (б), Nb (в) і Mo (г) у зливку сплаву на основі алюмінію титану від швидкості плавки (m) при різному вмісті в шихті, мас. %: $[Al]_0$ (1 – 32, 2 – 36, 3 – 40); $[Cr]_0$ (1 – 1, 2 – 2, 3 – 3); $[Nb]_0$ (1 – 5, 2 – 7, 3 – 9); $[Mo]_0$ (1 – 1, 2 – 2, 3 – 3)

Таблиця 1. Хімічний склад зливка ЕПП інтерметаліду системи Ti–Al–Nb–Mo діаметром 200 мм, мас. %

Місце відбору проб (по довжині)	Al	Nb	Mo	Ti
1	26,6	7,6	2,0	Основа
2	27,4	7,5	2,0	
3	27,2	7,5	2,1	
4	31,0	7,2	1,9	

Таблиця 2. Фактичний та розрахунковий хімічний склад сплаву на основі алюмінію титану Ti–28Al–7Nb–2Mo, мас. %

Метал	Al	Nb	Mo	Ti
Вихідна шихта	40	6,5	1,7	Основа
Зливок ЕПП: експеримент	28,1	7,45	2,0	
розрахунок	28,8	7,72	2,02	

Характер отриманих графіків дозволяє зробити висновок, що залежність втрат легуючих елементів сплаву при випаровуванні від швидкості плавки є нелінійною і при фіксованому складі вихідної шихти збільшення швидкості плавки до 100 кг/год приводить до зменшення втрат алюмінію (рис. 4, а) і хрому (рис. 4, б) і, отже, до збільшення їх вмісту у зливку. При цьому слід зазначити, що при збільшенні швидкості плавки понад 100 кг/год вміст алюмінію й хрому у зливку асимптотично наближається до початкового вмісту в металі шихти. При швидкостях плавки більш 100 кг/год вміст ніобію та молібдену у зливку лише незначно збільшується у порівнянні з їхньою концентрацією у вихідній шихті, що пов'язане з мінімальними втратами алюмінію, хрому й титану при цих швидкостях плавки.

На підставі побудованих залежностей можна зробити висновок, що рекомендованою швидкістю

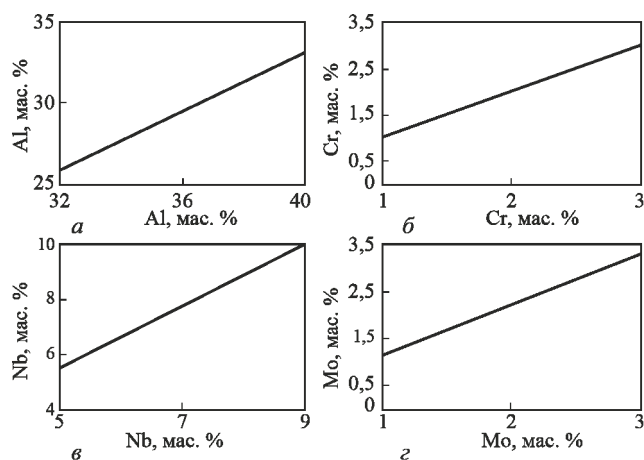


Рис. 5. Розрахункова залежність вмісту Al (а), Cr (б), Nb (е) і Мо (z) у зливку (вісь ординат) алюмініду титану від вмісту цих елементів у вихідній шихті (вісь абсцис) при швидкості плавки (m) 100 кг/год

плавки злиwkів сплавів на основі алюмініду титану діаметром 200 мм є швидкість 100...120 кг/год. Застосування цього режиму плавки забезпечує мінімальне випаровування легуючих компонентів сплаву з високою пружністю пари та, відповідно, запобігає підвищенню вмісту елементів з низькою пружністю пари.

Проведені в рамках математичної моделі розрахунки показали, що найбільш значними факторами, що впливають на концентрацію легуючих елементів у зливку, є вихідний вміст легуючих елементів у витратній заготовці і швидкість плавки.

На основі розрахунків по математичній моделі побудовані залежності вмісту легуючих компонентів алюмініду титану (алюмінію, хрому, ніобію й молібдену) в отриманому зливку ЕППІ від їхньої концентрації у вихідній шихті при оптимальних швидкостях плавки 100 кг/год (рис. 5). Отримані графіки дозволяють заздалегідь визначити необхідний вміст легуючого елемента сплаву у вихідній шихті для одержання потрібної концентрації цього елемента в зливку при заданій швидкості плавки.

Висновки

1. Побудовано математичну модель процесів випаровування легуючих елементів при електронно-променевій плавці з проміжною ємністю злиwkів алюмініду титану системи Ti–Al–Nb–Cr–Mo, яка встановлює залежність концентрації легуючих елементів у зливку від технологічних параметрів плавки.

2. Перевірка адекватності моделі показала, що розроблена математична модель із високим ступенем точності описує реальний процес випаровування при електронно-променевій плавці сплаву алюмініду титану.

3. Встановлено закономірності випаровування легуючих елементів при електронно-променевій

плавці сплавів на основі алюмініду титану системи Ti–Al–Nb–Cr–Mo. Побудовані залежності вмісту алюмінію, хрому, ніобію і молібдену у зливку алюмініду титану від вмісту легуючих елементів у вихідній шихті, які дозволяють прогнозувати хімічний склад злиwkів, що виплавляються, і використовувати їх для отримання злиwkів з необхідним хімічним складом.

Список літератури

1. Clemens H., Mayer S. (2016) Titanium aluminides in aerospace applications—processing, microstructure and properties. *Materials at High Temperatures*. DOI: [http:// dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792](http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792)
2. Bewlay B.P., Nag S., Suzuki A., Weimer M.J. (2016) TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Ibid.* DOI: [http:// dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068](http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068)
3. Tshimitsu Tetsui (2002) Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Sci. and Eng.*, **A329–331**, 582–588.
4. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. (2008) *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Москва, Машиностроение. Т. 2.
5. Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: Science and technology*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Kim Y.-W., Smarsly W., Lin J. et al. (2014) Gamma titanium aluminide alloys, 2014: A collection of research on innovation and commercialization of gamma alloy technology. *Proc. of 4th Inter. Symp. on Gamma TiAl Alloys, ISGTA 2014*. Hoboken (NJ). John Wiley & Sons, Inc.
7. Christoph Leyens, Manfred Peters (2003) *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
8. Wu X. (2006) Review of alloy and processing development of TiAl alloys. *Intermetallics*, **14**, 1114–1122.
9. Lapin J. (2009) TiAl-based alloys: Present status and future perspectives. *Hradec nad Moravici, Metal.*, **19**.
10. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. (2014) Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана. *Авиационные материалы и технологии*, **2**, 27–33.
11. Тригуб Н.П., Дереча А.Я., Калинюк А.Н. и др. (1998) Рафинирование титана в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **2**, 16–20.
12. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
13. Мовчан Б.А., Ахонин С.В. (1996) Математическое моделирование процессов электронно-лучевого испарения многокомпонентного сплава на основе никеля из расплава ниобия. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3**, 20–24.
14. Bellot J.P., Duval H., Ablitzer D. (1996) Validity of the Kinetic Langmuir’s law for the volatilization of metallic element in vacuum metallurgy. *Proc. Symp. of Gas Enterection in Nonferrous Metals Processing*. Anaheim, USA, 109–124.
15. Bellot J.P., Duval H., Ritchie M., Ablitzer D. (1999) The use of mathematical models to determine parameters minimizing the volatilization losses in the electron beam melting process. *Proc. of the 9th World Conf. on Titanium*. Sanct-Petersburg, Russia: CSIICM «Prometeу», **1**, 1442–1449.
16. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. (1976) *Физическая химия*. Москва, Металлургия.

17. Шиллер З., Гайзинг У., Панцер З. (1980) *Электронно-лучевая технология*. Москва, Энергия.
18. Иванченко Н.В., Устинов А.И., Мохорт В.А. (2003) Термодинамический анализ испарения в вакууме титана и никеля из расплава Ti–Ni. *Современная электрометаллургия*, **3**, 15–18.
19. Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. (1983) *Свойства неорганических соединений*. Справочник. Ленинград, Химия.
20. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А., Ерохин А.Г. (2013) Математическое моделирование процессов испарения при выплавке слитков многокомпонентных титановых сплавов в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **4**, 34–39.
21. Ахонин С.В., Пикулин А.Н., Березос В.А. и др. (2019) Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М. *Там же*, **3**, 15–22.
9. Lapin, J. (2009) TiAl-based alloys: Present status and future perspectives. *Hradec nad Moravicí, Metal.*, **19**.
10. Kablov, D.E., Panin, P.V., Shiryayev, A.A., Nochovnaya, N.A. (2014) Experience of using the vacuum-arc furnace ALD VAR L200 for melting of heat-resistant alloy ingots based on titanium aluminide. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, **2**, 27–33 [in Russian].
11. Trigub, N.P., Derecha, A.Ya., Kalinyuk, A.N. et al. (1998) Refinement of titanium in electron beam cold hearth furnaces. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **2**, 16–20 [in Russian].
12. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
13. Movchan, B.A., Akhonin, S.V. (1996) Mathematical modeling of electron beam evaporation processes of multicomponent alloy based on nickel from niobium melt. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 20–24 [in Russian].
14. Bellot, J.P., Duval, H., Ablitzer, D. (1996) Validity of the kinetic Langmuir's law for the volatilization of metallic element in vacuum metallurgy. *Proc. Symp. of Gas Interaction in Non-ferrous Metals Processing (Anaheim, USA)*, 109–124.
15. Bellot, J.P., Duval, H., Ritchie, M., Ablitzer, D. (1999) The use of mathematical models to determine parameters minimizing the volatilization losses in the electron beam melting process. *Proc. of the 9th World Conf. on Titanium (St.-Petersburg, Russia)*. CSIICM, Prometey, **1**, 1442–1449.
16. Zhukhovitsky, A.A., Shvartsman, L.A. (1976) *Physical chemistry*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
17. Schiller, Z., Gaizing, U., Pantser, Z. (1980) *Electron beam technology*. Moscow, Energiya [in Russian].
18. Ivanchenko, N.V., Ustinov, A.I., Mokhort, V.A. (2003) Thermodynamic analysis of evaporation of titanium and nickel from Ti–Ni melt in vacuum. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 13–16.
19. Efimov, A.I., Belorukova, L.P., Vasilkova, I.V., Chechev, V.P. (1983) *Properties of inorganic compounds*: Refer. Book. Leningrad, Khimiya [in Russian].
20. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berzos, V.A., Erokhin, A.G. (2013) Mathematical modelling of evaporation processes in melting of ingots of multicomponent titanium alloys in electron beam equipment with a cold hearth. *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 288–295.
21. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berzos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 15–22 [in Ukrainian].

References

1. Clemens, H., Mayer, S. (2016) Titanium aluminides in aerospace applications — processing, microstructure and properties. *Materials at High Temperatures*. DOI: [http:// dx.doi.org. /10.1080/09603409.2016.1163792](http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792)
2. Bewlay, B.P., Nag, S., Suzuki, A., Weimer, M.J. (2016) TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Ibid.* DOI: [http:// dx. doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068](http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068)
3. Toshiyuki Tetsui (2002) Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Sci. and Eng.*, **A329–331**, 582–588.
4. Inozemtsev, A.A., Nikhamkin, M.A., Sandratsky, V.L. (2008) *Fundamentals of design of aircraft engines and power units*. Moscow, Mashinostroenie, Vol. 2 [in Russian].
5. Appel, F., Paul, J.D.H., Oehring, M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: Science and Technology*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Kim, Y.-W., Smarsly, W., Lin J. et al. (2014) Gamma titanium aluminide alloys: A collection of research on innovation and commercialization of gamma alloy technology. In: *Proc. of 4th Intern. Symp. on Gamma TiAl Alloys, ISGTA 2014. Hoboken (NJ)*. John Wiley & Sons, Inc.
7. Leyens, C., Peters, M. (2003) *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
8. Wu, X. (2006) Review of alloy and processing development of TiAl alloys. *Intermetallics*, **14**, 1114–1122.

MATHEMATICAL MODELING OF EVAPORATION PROCESSES AT EBM OF ALLOYS BASED ON TITANIUM ALUMINIDE OF Ti–Al–Nb–Cr–Mo ALLOYING SYSTEM

S.V. Akhonin, A.Yu. Severin, V.O. Beresos, O.M. Pikulin, O.G. Erokhin
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

A mathematical model was developed of the processes of alloying element evaporation at cold-hearth electron beam melting of ingots of alloys based on titanium aluminide of Ti–Al–Nb–Cr–Mo alloying system that establishes the dependence of alloying element concentration in the ingot on technological parameters of melting and chemical composition of the initial charge. It is shown that the developed mathematical model adequately describes the real evaporation process at electron beam melting of titanium aluminide alloy. The regularities of alloying element evaporation at electron beam melting of alloys based on titanium aluminide of Ti–Al–Nb–Cr–Mo system were established, which allow predicting the chemical composition of the ingots and optimizing the technological parameters of melting. Ref. 21, Tabl. 2, Fig. 5.

Key words: electron beam melting; ingot; evaporation; mathematical modeling; titanium aluminide; alloying elements

Надійшла до редакції 17.02.2022