

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЕПП ЖАРОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si

С.В. Ахонін, А.Ю. Северин, О.Г. Єрохін, Ю.Т. Іщук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

РЕФЕРАТ

Знайдено термодинамічні та кінетичні параметри металевого розчину сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si, що дозволило вдосконалити модель процесу випаровування елементів багатокомпонентних сплавів при електронно-променевої плавці з проміжною ємністю. Продемонстровано, що математична модель доречно описує процес випаровування елементів при електронно-променевої плавці жароміцних сплавів системи легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si, що підтверджується натурним експериментом. Досліджено закономірності випаровування елементів сплаву при електронно-променевої плавці, які дають можливість передбачити кінцевий хімічний склад зливків та з'ясувати параметри ведення плавки. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 3.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електронно-променева плавка, проміжна ємність, моделювання, випаровування, жароміцний сплав, легуючі елементи, зливки

ВСТУП

Сучасна авіаційна та ракетна техніка потребують нових матеріалів, які зможуть доповнити чи частково замінити використовувані в даних галузях сплави на основі нікелю, кобальту та заліза [1, 2]. Жароміцні титанові сплави — один із шляхів вирішення цієї задачі. Традиційні жароміцні титанові сплави характеризуються обмеженою температурою експлуатації, яка, як правило, не перевищує 400...600 °С. Згідно з сучасними оглядовими дослідженнями максимальна температура тривалої роботи титанових сплавів становить близько 600 °С, причому досягнення вищих температур пов'язане зі значними труднощами забезпечення термічної стабільності та опору повзучості. При підвищенні температури понад 400...500 °С спостерігається інтенсивне зниження механічних властивостей, обумовлене розвитком процесів повзучості, ковзанням по межах зерен та зародженням мікротріщин [3]. Крім того, при температурах, наближених до 500...600 °С, відбувається активне окиснення та дифузія кисню в метал, що призводить до охрупчування поверхневого шару та додаткового зниження міцності [4]. Тому проблема підвищення робочої температури титанових сплавів вище 600 °С актуальна на даний момент та потребує вирішення. Одним із напрямків підвищення високотемпературних властивостей титанових сплавів є створення металоматричних композитів на основі системи Ti–Al–Si. Такі матеріали мають структуру, де

завдяки виділенню тугоплавкого з'єднання Ti_5Si_3 у процесі кристалізації зливка відбувається зміцнення титанової матриці [5–8]. Ці сплави є перспективними для створення матеріалів із високим рівнем жароміцних та жаростійких характеристик та відносно невисокої вартості. В складі таких жароміцних сплавів присутні як елементи з високою пружністю пари (алюміній та олово), так і нелеткі елементи (ніобій, молібден та інші). Тому вкрай важливі додаткові дослідження процесів випаровування і взаємодії легуючих елементів при електронно-променевої плавці (ЕПП) цих сплавів.

МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Для проведення досліджень використовували зразки зі зливка, отриманого на електронно-променевої установці УЕ-208М. В якості початкових шихтових матеріалів використовували технічно чисті титан марки ВТ1-0 у вигляді листів, алюміній в чушках марки А5, цирконій металевий (99,9 %), олово (99,9 %), молібден МЧ (99,9 %), технічний ніобій НБ-1 (99,8 %), технічний кремній Кр0 (98,8 %). Вміст легуючих елементів в отриманому зливку визначали методом емісійної спектроскопії на ІСР-спектрометрі ІСАР 6500 DUO. Кількісний склад шихтової заготовки розраховували з урахуванням втрат алюмінію та олова на випаровування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України були розроблені математичні моделі для розрахунку випаровування легуючих еле-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ментів при електронно-променевої плавці з проміжною ємністю для сплавів на основі алюмініду титану системи легування Ti–Al–Nb–Cr–Mo [9]. Однак застосування цих підходів до складнолегованих жароміцних сплавів системи Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si потребує врахування присутності цирконію, олова та кремнію, що мають принципово різні легкості та термодинамічну активність.

Електронно-променева плавка з проміжною ємністю має три зони випаровування — торець шихтової заготівлі, ванна металу у проміжній ємності та ванна рідкого металу у кристалізаторі. Модель випаровування елементів при ЕПП будується на основі рівнянь матеріального балансу для кожного легуючого елемента сплаву для кожної стадії плавлення, а зв'язок між стадіями плавлення представлено масопотоками [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_j} \rho [M_i]_j dV = \\ = m_j [M_i]_{j-1} - S_{j-1} \pi_{j-1}^i - m_{j-1} [M_i]_{j-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

де i — легуючий елемент сплаву; $[M_i]$ — масова частка кожного хімічного елемента в складі сплаву; j — стадія плавки; V_j — об'єм рідкого металу для кожної стадії плавлення, м³; S_j — площа вільної поверхні рідкого металу для кожної стадії плавлення, м²; π_j^i — питомі потоки кожного елемента з кожної стадії плавлення в парову фазу, кг/(с·м²); m_j — масова швидкість надходження розплаву з кожної стадії плавлення в наступну, кг/с.

Для сталих умов плавлення концентрації всіх легуючих компонентів сплаву на кожній стадії плавлення залишається незмінним в часі, тому мають місце наступні рівності:

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

Для практичних розрахунків математичної моделі необхідно використовувати термодинамічні та кінетичні параметри металевого розчину для системи Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si, які і слід обчислити чи визначити.

За умов робочого вакууму в камері плавлення 0,01...0,1 Па довжина вільного пробігу атомів перевищує характерний розмір камери, що відповідає молекулярному режиму випаровування [10, 11]. У цьому випадку щільність масового потоку компонентів сплаву з поверхні розплаву J_{ev} (кг/(с·м²)) визначається рівнянням Ленгмюра [12–14]:

$$J_{ev} = \alpha_c p_i^0 \gamma_i [N_i] \sqrt{M_i / 2\pi RT}, \quad (3)$$

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

Для кожного хімічного елемента сплаву його мольна доля в розплаві сплаву пов'язана з масовою часткою $[M_i]$ наступним співвідношенням:

$$\begin{aligned} [N_i] = \frac{[M_i]}{M_i} \left[\frac{[Ti]}{M_{Ti}} + \frac{[Al]}{M_{Al}} + \frac{[Sn]}{M_{Sn}} + \frac{[Zr]}{M_{Zr}} + \right. \\ \left. + \frac{[Mo]}{M_{Mo}} + \frac{[Nb]}{M_{Nb}} + \frac{[Si]}{M_{Si}} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

де M_{Ti} , M_{Al} , M_{Sn} , M_{Zr} , M_{Mo} , M_{Nb} , M_{Si} — атомні маси титану, алюмінію, олова, цирконію, молібдену, ніобію та кремнію, відповідно, кг/моль. Таким чином мольна частка кожного легуючого елемента в складі сплаву може бути записана у вигляді:

$$[N_i] = k_c \frac{M_{Ti}}{M_i} [M_i], \quad (5)$$

де k_c — коефіцієнт, значення якого залежить від хімічного складу розплаву і для дослідного сплаву визначається рівнянням:

$$\begin{aligned} k_c = \left[1 + [Al] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Al}} - 1 \right) + [Sn] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Sn}} - 1 \right) + \right. \\ \left. + [Zr] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Zr}} - 1 \right) + [Mo] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Mo}} - 1 \right) + \right. \\ \left. + [Nb] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Nb}} - 1 \right) + [Si] \left(\frac{M_{Ti}}{M_{Si}} - 1 \right) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Розрахунок коефіцієнта сплаву наступного складу Ti–6,5Al–5,5Zr–1,5Sn–0,5Mo–0,1Nb–0,8Si за отриманою формулою встановлює, що його чисельне значення складає $k_c = 1,03$.

Таким чином, приймаючи значення коефіцієнта конденсації α_c рівним одиниці, питомі потоки цирконію, олова, молібдену, ніобію, кремнію і титану через міжфазну поверхню в парову фазу в j -тій зоні плавки можна виразити наступним чином:

$$\begin{aligned} \pi_j^{Zr} = k_j^{Zr} [Zr]_j, \quad \pi_j^{Sn} = k_j^{Sn} [Sn]_j, \\ \pi_j^{Mo} = k_j^{Mo} [Mo]_j, \quad \pi_j^{Nb} = k_j^{Nb} [Nb]_j, \\ \pi_j^{Si} = k_j^{Si} [Si]_j, \quad \pi_j^{Ti} = k_j^{Ti} [Ti]_j, \end{aligned} \quad (7)$$

де

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

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

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

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

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

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

є константами швидкості випаровування цирконію, олова, молібдену, ніобію, кремнію та титану в j -тій зоні плавки відповідно, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; $p_{Zr}^0, p_{Sn}^0, p_{Mo}^0, p_{Nb}^0, p_{Si}^0, p_{Ti}^0$ — пружності парів цирконію, олова, молібдену, ніобію, кремнію та титану в j -тій зоні плавки відповідно; $\gamma_j^{Zr}, \gamma_j^{Sn}, \gamma_j^{Mo}, \gamma_j^{Nb}, \gamma_j^{Si}, \gamma_j^{Ti}$ — коефіцієнти активності цирконію, олова, молібдену, ніобію, кремнію та титану в j -тій зоні плавки відповідно; T_j — температура розплаву в j -тій зоні плавки, К.

Для процесу випаровування алюмінію з титанових сплавів в роботі [15] було отримано рівняння, що визначає питомий потік алюмінію з поверхні розплаву:

$$\pi_j^{Al} = \rho_{Ti} \beta_j^{Al} [Al]_j, \quad (8)$$

де $\beta_j^{Al} = \left(\frac{1}{\beta_{Al}} + \frac{\rho_{Ti}}{k_j^{Al}} \right)$ — сумарний коефіцієнт масопереносу алюмінію в рідкому металі в j -тій зоні плавки, м/с; $\beta_{Al} = 6,6 \cdot 10^{-6}$ м/с — коефіцієнт масопереносу алюмінію в розплаві титану, м/с; ρ_{Ti} — густина розплаву титанового сплаву, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k_j^{Al} = k_C \frac{p_{Al}^0 \gamma_j^{Al} M_{Ti}}{\sqrt{2\pi M_{Al} R T_j}}$ — константа швидкості випаровування алюмінію в j -тій зоні плавки, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; $[Al]_j$ — концентрація алюмінію в j -тій зоні плавки, масова частка; p_{Al}^0 — пружність пари алюмінію, Па; γ_j^{Al} — коефіцієнт активності алюмінію в j -тій зоні плавки.

Рівноважний тиск насиченої пари для кожного легуючого елемента сплаву були розраховані за рівняннями [16, 17]:

$$\lg p_{Al}^0 = -\frac{16379}{T} + 9,979 - 0,335 \lg T,$$

$$\lg p_{Sn}^0 = -\frac{15339}{T} + 7,689 + 0,141 \lg T,$$

$$\lg p_{Zr}^0 = -\frac{32541}{T} + 13,966 - 0,847 \lg T - \frac{0,243}{1000} T,$$

$$\lg p_{Mo}^0 = -\frac{35904}{T} + 12,370 - 0,107 \lg T - \frac{0,363}{1000} T,$$

$$\lg p_{Nb}^0 = -\frac{39568}{T} + 13,205 - 0,288 \lg T - \frac{0,3}{1000} T,$$

$$\lg p_{Si}^0 = -\frac{20542}{T} + 8,783 - 0,019 \lg T,$$

$$\lg p_{Ti}^0 = -\frac{25860}{T} + 12,392 - 0,142 \lg T - \frac{0,551}{1000} T.$$

Таким чином, з урахуванням рівнянь (1), (2), (7) та (8) було отримано математичну модель процесів випаровування легуючих елементів жароміцного титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si під час ЕПП: для алюмінію —

$$m_{j-1}[Al]_{j-1} = (S_j \rho_{Ti} \beta_j^{Al} + m_j)[Al]_j,$$

для інших елементів сплаву —

$$m_{j-1}[M_i]_{j-1} = (S_j k_j^i + m_j)[M_i]_j,$$

де

$$m_{j-1} = m_j + S_j (\rho_{Ti} \beta_j^{Al} [Al]_j + k_j^{Sn} [Sn]_j + k_j^{Zr} [Zr]_j [Mo]_j + k_j^{Nb} [Si]_j + k_j^{Ti} [Ti]_j).$$

Модель дозволяє встановити залежності вмісту легуючих компонентів в зливку титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si від технологічних параметрів плавки та початковому вмісту легуючих елементів в шихтовій заготівлі. В цілому, математична модель являє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, яку вирішували чисельними методами.

Особливістю багатокомпонентної системи є необхідність врахування коефіцієнтів активності елементів у розплаві. Як показали попередні оцінки, коефіцієнти активності цирконію, молібдену, ніобію, кремнію і титану можна прийняти рівними одиниці, а алюмінію — 0,3 [8, 18, 19].

Приймаючи до уваги відсутність літературних даних щодо чисельних значень коефіцієнта активності олова в рідкому розчині складнолегуюваних титанових сплавів, нами для визначення коефіцієнта активності олова в сплаві системи Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si та перевірки адекватно-

Таблиця 1. Фактичний хімічний склад вихідної шихти і зливка титанового сплаву Ti–6,5Al–5,5Zr–1,5Sn–0,6Mo–0,1Nb–0,8Si

Характеристика металу	Вміст елементів, мас. %						
	Al	Zr	Sn	Mo	Nb	Si	Ti
Вихідна шихта	8,0	4,7	3,5	0,6	0,1	0,8	Залишок
Зливок ЕПП (експеримент)	6,64	4,99	1,40	0,59	0,1	0,68	—»—

сті побудованої математичної моделі на електронно-променевої установці УЕ208М за наведеною в роботі [20] методикою було проведено виплавку дослідного зливка жароміцного титанового сплаву Ti–6,5Al–5,5Zr–1,5Sn–0,6Mo–0,1Nb–0,8Si в кристалізатор діаметром 110 мм та проведено порівняння отриманих експериментальних даних з результатами розрахунків за побудованою математичною моделлю. Кількісний склад шихтової заготовки розраховували з урахуванням втрат алюмінію та олова на випаровування (табл. 1).

Масова швидкість плавки складала 30 кг/г, потужність електронно-променевого нагріву поверхні розплаву в кристалізаторі дорівнювала 14 кВт, потужність електронно-променевого нагріву поверхні розплаву в проміжній ємності та на торці вихідної заготовки — 54 кВт. Розміри проміжної ємності дорівнювали 100×200 мм. Поперечний переріз витратної шихтової заготовки складав 200×200 мм.

З метою визначення чисельного значення коефіцієнта активності олова в металевому розчині системи Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si для проведеної експериментальної плавки за побудованою математичною моделлю було проведено розрахунок хімічного складу отриманого зливка при різних значеннях коефіцієнта активності олова (табл. 2).

Аналіз отриманих результатів (див. табл. 1, 2) показав, що найкраща збіжність експериментальних та розрахункових даних забезпечується за умови $\gamma_j^{Sn} = 0,7$, тобто при подальших розрахунках за побудованою математичною моделлю буде прийнято, що коефіцієнт активності олова дорівнює 0,7.

В цілому побудована математична модель процесів випаровування при електронно-променевому плавленні жароміцного титанового сплаву системи

легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si описує процес випаровування легуючих елементів з досить високим ступенем точності. Відносна похибка розрахункових результатів від експериментальних даних при електронно-променевої плавці зливка титанового сплаву Ti–6,5Al–5,5Zr–1,5Sn–0,6Mo–0,1Nb–0,8Si складала: 2 % для алюмінію; 2 % для цирконію; 4 % для олова; 6 % для молібдену 5 % для ніобію і 19 % для кремнію. Відносно велика розбіжність розрахункових та експериментальних даних щодо кремнію може бути пояснена тим, що при концентраціях кремнію в титані більше 0,4 % в титановій матриці відбувається виділення окремої фази у вигляді силіцидів типу Ti_5Si_3 , що утруднює визначення вмісту кремнію в сплаві та не було враховано при розробці математичної моделі.

З метою визначення аналізу впливу технологічних параметрів електронно-променевої плавки і хімічного складу початкової шихти на хімічний склад злиwkів, що виплавляються, за допомоги наведеної математичної моделі були визначені залежності вмісту легуючих елементів в зливку жароміцного титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si діаметром 110 мм від швидкості плавки при різному хімічному складі вихідної шихти $[Al]_0$, $[Zr]_0$, $[Sn]_0$, $[Mo]_0$, $[Nb]_0$, $[Si]_0$ (рис. 1).

Аналіз отриманих залежностей показав, що вміст в зливку елементів з високою пружністю пари (алюміній та олово) за рахунок випаровування нижче за вміст цих елементів в вихідній шихті, причому при збільшенні швидкості плавки різниця в концентраціях між початковою шихтою та зливком стає меншою (рис. 1, а, б). В той же час вміст в зливку легуючих елементів з пружністю пари нижчою за пружність пари титану (Zr, Mo, Nb) вище за вміст цих елементів в вихідній

Таблиця 2. Розрахунковий хімічний склад зливка титанового сплаву Ti–6,5Al–5,5Zr–1,5Sn–0,6Mo–0,1Nb–0,8Si

Коефіцієнт активності олова, γ_j^{Sn}	Вміст елементів, мас. %						
	Al	Zr	Sn	Mo	Nb	Si	Ti
0,5	6,74	4,89	1,72	0,625	0,104	0,805	Залишок
0,6	6,76	4,90	1,51	0,626	—»—	0,807	—»—
0,7	6,77	4,91	1,34	0,627	0,105	0,808	—»—
0,8	—»—	4,92	1,19	0,628	—»—	0,809	—»—
0,9	6,78	4,93	1,06	0,629	—»—	0,810	—»—
1,0	6,79	—»—	0,95	0,630	—»—	0,811	—»—

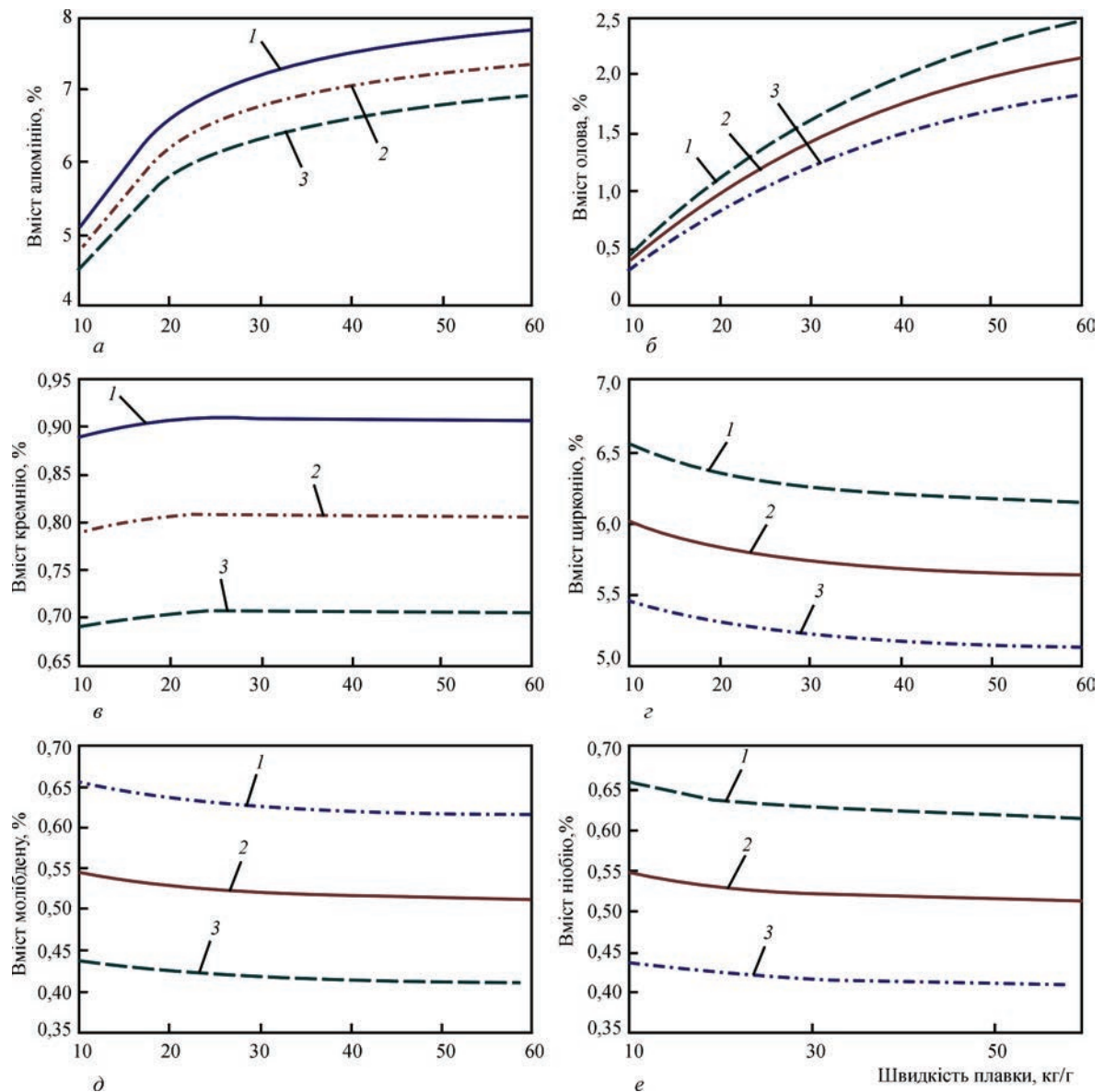


Рис. 1. Залежності вмісту Al (а), Sn (б), Si (в), Zr (г), Mo (д), Nb (е) в зливку титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si від швидкості плавки при незмінній потужності електронного нагрівання та різному вмісту цих елементів у вихідній шихті, %: а — 1 — 8,5; 2 — 8,0; 3 — 7,5; б — 1 — 4,0; 2 — 3,5; 3 — 3,0; в — 1 — 0,9; 2 — 0,8; 3 — 0,7; г — 1 — 5,0; 2 — 5,5; 3 — 5,0; д — 1 — 0,6; 2 — 0,5; 3 — 0,4; е — 1 — 0,6; 2 — 0,5; 3 — 0,4

шихті, причому при збільшенні швидкості плавки концентрація цих елементів в зливку наближається до їх концентрації у вихідній шихті (рис. 1, г, д, е). Окрему позицію займає кремній, вміст якого в процесі плавки практично не змінюється і дуже слабо залежить від швидкості плавки (рис. 1, в). Це пояснюється тим, що крива залежності пружності насиченої пари кремнію від тиску та температури знаходиться дуже близько від кривої для основного компоненту сплаву — титану [16].

Встановлено, що зміна вмісту елементів з низькою пружністю пари Ti, Nb, Mo, Zr відносно малі і для зливка діаметром 110 мм при швидкостях плавки більше 30 кг/г їх можливо не приймати до уваги при розрахунках вихідної шихти. Розраховано, що при низьких швидкостях плавки (менше

10 кг/г) втрати алюмінію та олова випаровуванням може досягати 3 %, тоді як збільшення швидкості плавки до 40 кг/г забезпечує зменшення втрати алюмінію та олова випаровуванням до 0,9 % та 1,75 % відповідно, що забезпечує збереження їх вмісту в зливку. Незважаючи на відносно слабку залежність втрат алюмінію випаровуванням від концентрації алюмінію в початковій шихті, аналіз залежності цих втрат від вмісту алюмінію в початковій шихті показав, що чим більше вміст алюмінію в початковій шихті, тим більші втрати алюмінію на випаровування (рис. 2, а). У порівнянні з втратами алюмінію, втрати олова випаровуванням більш суттєво залежать від концентрації олова в початковій шихті (рис. 2, б). Так, наприклад, при швидкості плавки 20 кг/г збільшення концентрації

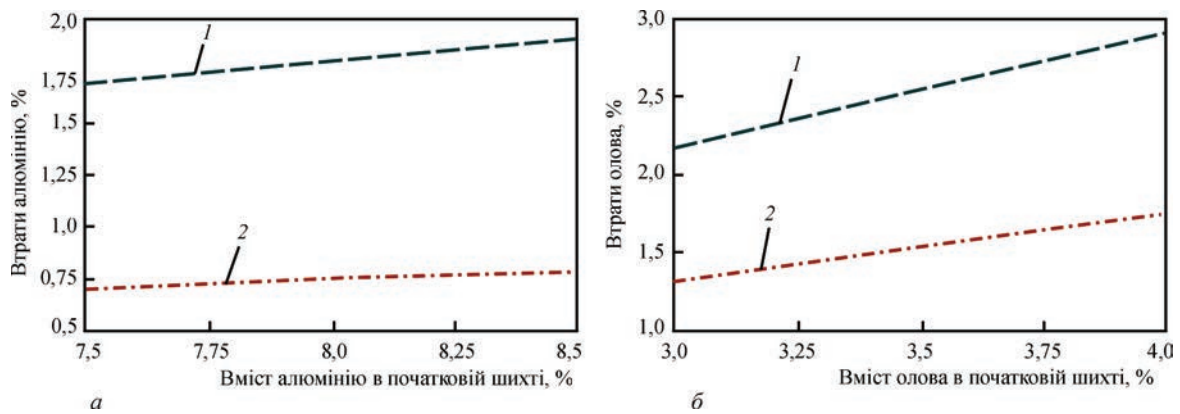


Рис. 2. Втрати алюмінію та олова випаровуванням в залежності від їх вмісту в початковій шихті: 1 — швидкість плавки 20 кг/г; 2 — швидкість плавки 50 кг/г

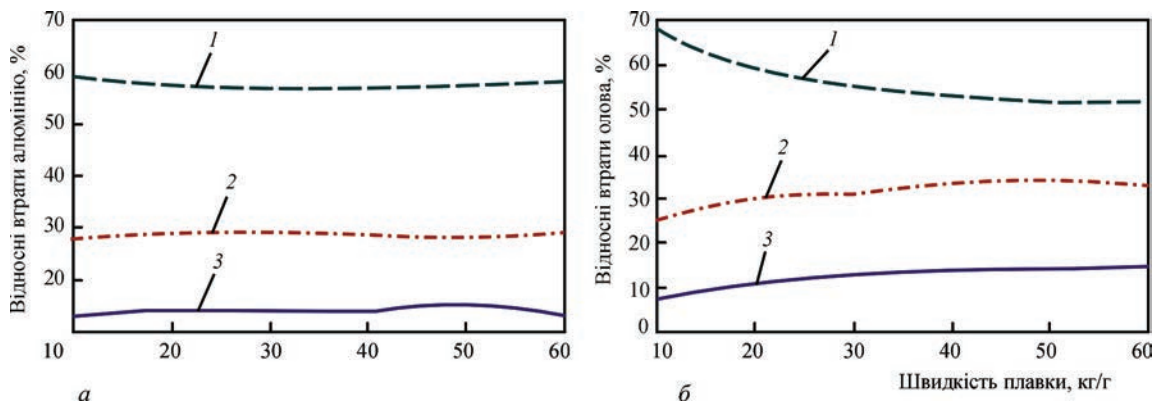


Рис. 3. Відносні втрати алюмінію (а) та олова (б) випаровуванням на торці витратної заготівлі в проміжній ємності (2) та кристалізаторі (3) в залежності від швидкості плавки при незмінній потужності електронного нагрівання

олова в початковій шихті з 3 до 4 % призводить до збільшення втрат олова випаровуванням з 2,2 до 2,9 , тоді як збільшення концентрації алюмінію в початковій шихті з 7,5 до 8,5 % призводить до збільшення втрат алюмінію випаровуванням тільки з 1,7 до 1,85 %.

Аналіз взаємного впливу алюмінію та олова на їх кінцевий вміст в зливку показав, що зміна початкового вмісту кожного з цих елементів у вихідній шихті дуже слабо позначається на їх кінцевій концентрації в зливку. Аналіз випаровування алюмінію на кожній стадії ЕПП (рис. 3, а) демонструє, що в залежності від швидкості ведення плавки втрати алюмінію на торці витратної заготівлі складають $\approx 57...59\%$, в проміжній ємності $\approx 28...29\%$, а в кристалізаторі $\approx 13...15\%$ від загальних втрат алюмінію. Аналіз втрат Sn випаровуванням на кожній стадії ЕПП (рис. 3, б) показує, що відносні втрати олова випаровуванням на торці витратної заготівлі зменшуються з 68 % для швидкості 10 до 52 % для швидкості 60 кг/г, тоді як відносні втрати олова випаровуванням в проміжній ємності навпаки збільшуються з 25 % при швидкості плавки 10 кг/г до 33 % від загальних втрат олова в процесі ЕПП при швидкості плавки 60 кг/г. І навпаки, втрати олова випаровуванням в кристалізаторі збільшуються з 8 % при швидкості плавки 10 кг/г до 15 % при

швидкості 60 кг/г. Такий розподіл втрат цих елементів між стадіями плавки слабо залежить від швидкості плавки і першочергово обумовлюється площею поверхні розплаву на кожній стадії плавлення металу. Отримані закономірності мають практичне значення при проектуванні електронно-променевих установок і виборі геометрії проміжної ємності.

За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що основним чинником, який впливає на концентрацію алюмінію та олова в зливку ЕПП, є їх вміст в початковій шихті та швидкість плавки.

Таким чином, побудована математична модель процесів випаровування при електронно-променевому плавленні жароміцного титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si адекватно встановлює залежність вмісту легуючих елементів в зливку від технологічних параметрів плавки та може бути використана для розрахунку хімічного складу вихідної шихти, що забезпечить відповідність отриманого зливка ЕПП за хімічним складом вимогам стандартів та технічних умов.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено адаптовану математичну модель випаровування елементів для складнолегуючого

жароміцного титанового сплаву системи Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si при ЕПП з проміжною ємністю.

2. Практично встановлено чисельне значення коефіцієнта активності Sn у розплаві ($\gamma_{\text{Sn}} = 0,7$), що забезпечує мінімальну розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними.

3. Показано, що швидкість плавки при незмінних енергетичних вкладаннях є визначальним технологічним параметром керування втратами алюмінію та олова на випаровування.

4. Визначено розподіл втрат летких компонентів між зонами ЕПП, що дозволяє оптимізувати конструкцію обладнання та режим плавки.

5. Модель може бути використана для технологічного розрахунку складу витратної заготовки з метою забезпечення заданого хімічного складу зливка.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

- Cormier, J. (2018) Ni- and Co-based superalloys and their coatings. *Metals*, **8**, 1055. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8121055>
- Tajne, A., Gupta, T.V.K., Ramani, H., Joshi, Y. (2024) A critical review on the machinability aspects of nickel and cobalt based superalloys in turning operation used for aerospace applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*, **10(2)**, 833–866. DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2185850>.
- Liu, Z., Xin, S., Zhao, Y. (2023) Research progress on the creep resistance of high-temperature titanium alloys: A review. *Metals*, **13**, 1975. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13121975>
- Casadebaigt, A., Hugues, J., Monceau, D. (2020) High temperature oxidation and embrittlement at 500..600 °C of Ti–6Al–4V alloy fabricated by laser and electron beam melting. *Corrosion Sci.*, **175**, 108875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108875>
- Firstov, S.A., Tkachenko, S.V., Kuz'menko, N.N. (2009) Titanium «irons» and titanium «steels». *Met. Sci. Heat Treat.*, **51**, 12–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-009-9119-7>
- Firstov, S.O., Lugovskiy, Y.F., Kuzmenko, M.M. et al. (2023) Temperature dependencies of the mechanical properties of heat-resistant titanium alloys of the Ti–Si–X system under cyclic loading. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45(3)**, 311–327. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.45.03.0311>
- Shevchenko, O.M., Kulak, L.D., Kuzmenko, M.M. et al. (2023) The influence of the deformation and heat treatment on the structure and heat-resistance of Ti–Al–Zr–Si alloys. *Materials Sci.*, **59(1)**, 40–48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00741-y>
- Akhonin, S. V., Sevryn, A. Yu., Berezos, V. O. et al. (2024) Influence of deformation processing modes on the structure and mechanical properties of a high-temperature titanium alloy of the Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46(7)**, 705–715. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.46.07.0705>
- Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O., et al. (2022) Mathematical modeling of evaporation processes during the EBM of titanium aluminide-based alloys of the Ti–Al–Nb–Cr–Mo alloying system. *Suchasna Elektrometallurhiya*, **2**, 10–16 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.02>
- Bellot, J.P., Duval, H., Ablitzer, D. (1996) Validity of the Kinetic Langmuir's law for the volatilization of metallic element in vacuum metallurgy. In: *Proc. of Symp. of Gas Interaction in Nonferrous Metals Processing, Anaheim, USA*, Vol. 1, 109–124.
- 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. In: *Proc. of the 9th World Conf. on Titanium, St-Petersburg, Russia*, Vol. 1, 1442–1449.
- Schiller, Z., Geising, U., Panzer, Z. (1980) *Electron beam technology*. Moscow, Energiya [in Russian].
- Nakao, R., Fukumoto, S., Fujii, M. (1992) Evaporation of alloying elements and behavior of degassing reactions of high chromium steel in electron beam melting. *ISIJ Inter.*, **32(5)**, 685–692. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.685>
- Jiahao Zhang, Tangqing Cao, Haoyue Ge et al. (2025) Investigation of element volatilization and impurity removal behavior in electron beam melting of VNbTaTi refractory high-entropy alloys. *J. of Manufacturing Processes*, **155**, 185–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.10.020>.
- Akhonin, S.V., Trigub, N.P., Zamkov, V.N., Semiatin, S.L. (2003) Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron-beam cold-hearth melting of Ti–6Al–4V ingots. *Metallurgy and Materials Transact.*, **4B**, 447–454. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-003-0071-4>.
- Honig, R.E. (1957) Vapor pressure data for the more common elements. *RCA Review*, **18**, 195–204.
- Mondal, B., Mukherjee, T., Finch, N.W. et al. (2023) Vapor pressure versus temperature relations of common elements. *Materials*, **16(1)**. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16010050>
- Kostov, A., Živković, D. (2008) Thermodynamic analysis of alloys Ti–Al, Ti–V, Al–V and Ti–Al–V. *J. of Alloys and Compounds*, **460(1–2)**, 164–171, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.05.059>
- Akhonin, S.V., Berezos, V.O., Yerokhin, O.G. (2025) Production of high-strength titanium alloys by electron beam melting. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
- Akhonin, S., Pikulin, O., Berezos, V. et al. (2022) Determining the structure and properties of heat resistant titanium alloys VT3-1 and VT9 obtained by electron beam melting. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **5(12–119)**, 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265014/>

STUDY OF ALLOYING ELEMENT EVAPORATION DURING ELECTRON BEAM MELTING OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOYS OF THE Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si SYSTEM

S.V. Akhonin, A.Yu. Sevryn, O.G. Erokhin, Yu.T. Ishchuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

The thermodynamic and kinetic parameters of the metal melt of a Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si system alloy were determined, which made it possible to refine the model of element evaporation in multicomponent alloys during electron beam melting with an intermediate crucible. It was demonstrated that the developed mathematical model adequately describes the evaporation of elements during electron beam melting of heat-resistant alloys of the Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si system, as confirmed by full-scale experiments. The regularities of alloy element evaporation during electron beam melting were established, enabling prediction of the final chemical composition of the ingots and determination of optimal melting parameters. 20 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

KEYWORDS: electron beam melting, intermediate crucible, modeling, evaporation, heat-resistant alloy, alloying elements, ingot

ORCID

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,
О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>, Ю.Т. Ішук — <https://orcid.org/0009-0004-6679-6977>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

С.В. Ахонін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: akhonin.sv@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.В. Ахонін, А.Ю. Северин, О.Г. Єрохін, Ю.Т. Ішук (2026) Дослідження процесів випаровування легуючих елементів при ЕПП жароміцних титанових сплавів системи легування Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si. *Сучасна електрометалургія*, **02**, 19–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.02.03>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 12.02.2026

Отримано у переглянutoму вигляді 08.04.2026

Затверджено до друку 20.05.2026

Оприлюднено 27.05.2026

