

Цибрій¹ Ю.О., к.т.н, Грабовський² Г.Г., д. т. н., проф.

¹Національний авіаційний університет, Київ, Україна

²ДНВК «Київський інститут автоматики», Київ, Україна

ПОРІВНЯННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР РОЗПЛАВЛЕНОГО ТИТАНУ ПРИ РОБОТІ РІЗНИХ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМИ ГАРМАТАМИ

Анотація. Проведено математичне моделювання обігріву розплавленого титану в проміжній ємності електронно-променевої установки у випадку наявності нерозплавлених шматків шихти із використанням чисельних методів в програмному пакеті MATLAB. При моделюванні були використанні три алгоритми керування обігрівом: стандартний із зигзагоподібною траєкторією; зі зворотним зв'язком по температурі; комбінований. Порівняна зміна в часі рівномірності прогріву розплавленого титану, розподіл температур та відносний об'єм розплавленого титану в проміжній ємності для зазначених алгоритмів. Показано, що комбінований алгоритм забезпечує кращий прогрів розплавленого титану та раціональний розподіл потужності обігріву по всій поверхні проміжної ємності.

Ключові слова: Електронно-променева плавка титану, алгоритм керування, мехатронна система, розподіл температур, проміжна ємність

Сучасне зростання виробництва високоякісного титану як в Україні так і закордоном пов'язане з його активним використанням в загальному та хімічному машинобудуванні, газо- та нафтовидобувній промисловості, харчовій промисловості, медицині, суднобудуванні, а також, особливо, авіа- та ракетобудуванні.

Електронно-променева плавка є сучасною технологією отримання титану та сплавів на його основі [1], яка у порівнянні з вакуумно-дуговою, плазмовою та електрошлаковою має як ряд своїх переваг, так і недоліків. Одним з найсуттєвіших недоліків полягає у високому енергоспоживанні на виплавку однієї одиниці маси готової продукції, що є результатом відсутності автоматичних систем вимірювання температури розплавленого титану та значного впливу людського фактору на перебіг плавки (вибір оператором установки траєкторій руху променів електронно-променевих гармат на основі власної суб'єктивної оцінки теплового стану розплаву в проміжній ємності).

На сьогодні є велика кількість якісних вітчизняних та зарубіжних досліджень, присвячених вирішенню задачі моделювання тепло- та масообміну при електронно-променевої плавці та прогнозуванню хімічного складу та структури отриманих титанових зливків. Однак відчувається суттєвий дефіцит досліджень, пов'язаних із вирішенням задач автоматизації технологічного процесу плавки титану та керування усією електронно-променевою установкою із врахуванням різних збурюючих сигналів.

Саме цій задачі було присвячене попереднє дослідження авторів результатом якої була запропонована мехатронна система керування виправкою титану при електронно-променевої плавці зі зворотним зв'язком по температурі розплавленого титану в проміжній ємності та динаміці зміни його рівня в кристалізаторі [2, 3]. Під час її розробки було запропоновано два нові алгоритми керування траєкторією руху променів електронно-променевих гармат: зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності та комбінований (поєднує стандартний алгоритм із зигзагоподібною траєкторією та алгоритм із зворотним зв'язком по температурі).

Метою даної роботи є дослідження ефективності запропонованої раніше мехатронної системи, а саме порівняння ефективності обігріву розплавленого титану в проміжній ємності згідно стандартного зигзагоподібного алгоритму (далі «алгоритм А»), алгоритму зі зворотним зв'язком по температурі (далі «алгоритм В») та комбінованого алгоритму (далі «алгоритм С»).

Під час попередніх чисельних моделювань роботи вищевказаних алгоритмів розглядалася ситуація потрапляння нерозплавлених шматків шихти в проміжну ємність [3, 4] і після якісного аналізу було попередньо встановлено, що алгоритм С прогріває рівномірніше титановий розплав

у порівнянні з алгоритмом В, і на відміну від алгоритму А повністю розплавляє нерозплавлені шматки шихти.

Під час даного дослідження отримані раніше тривимірні температурні масиви були порівняні по наступним параметрам:

- відхилення від середньої температури масиву (рис. 1):

$$\Delta T_{\text{сер}} = \left(\sum_1^n (T_i - \left(\sum_1^n T_i \right) / n) \right) / n, \quad (1)$$

де T_i – температура i -го вузла масиву температур; n – загальна кількість вузлів в масиві температур;

- відносний об'єм розплавленого титану в проміжній ємності (рис. 2):

$$v_{\text{розп}} = (k / n) \cdot 100\%, \quad (2)$$

де k – кількість вузлів в масиві температур, з температурою вищою за температуру плавлення титану (1950 К).

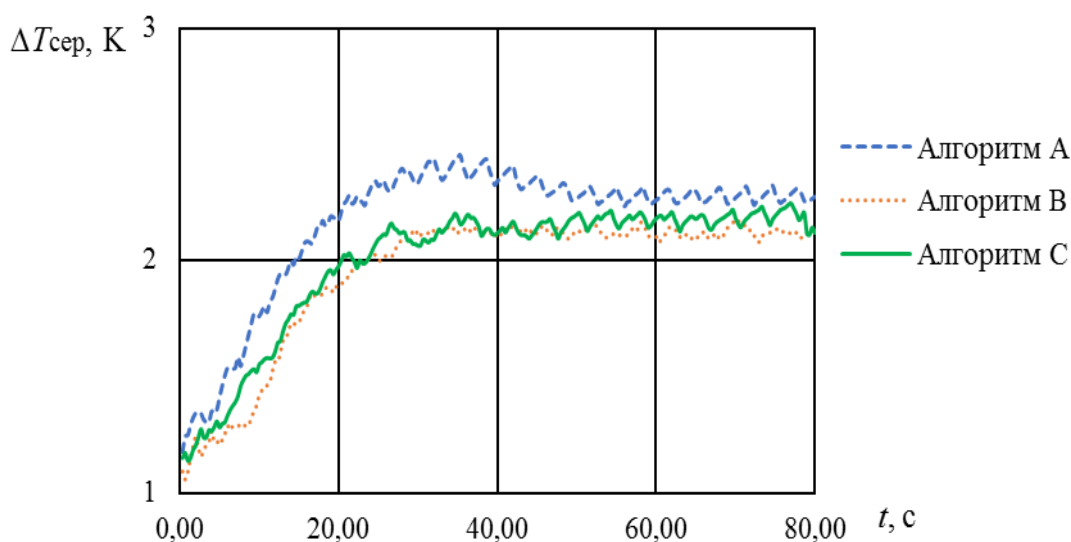


Рис. 1 – Зміна відхилення від середньої температури масиву в часі

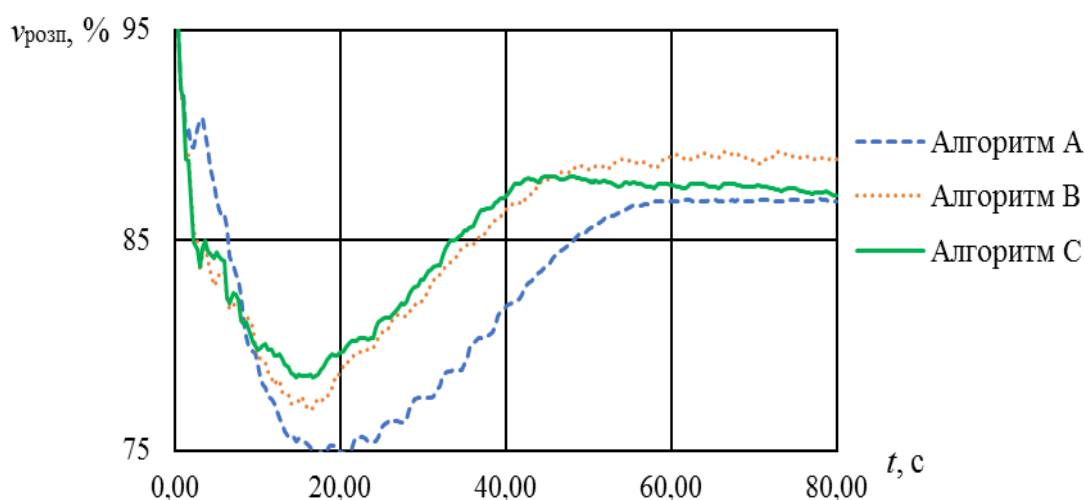


Рис. 2 – Зміна відносного об'єму розплавленого титану в проміжній ємності в часі

З Рис. 1 та 2 видно, що алгоритми В та С більш рівномірно прогрівають розплав металу у порівнянні із алгоритмом без зворотного зв'язку А, а перехідний процес триває близько 40

секунд, саме за цей час плавиться шматок шихти (у випадку алгоритмів В і С він повністю розплавляється). Також аналіз графіку на Рис. 2 показує, що комбінований алгоритм С краще прогріває розплав титану саме під час перехідного процесу.

На Рис. 3 наведено відносний розподіл температури $T_{відн}$ з інтервалом в 50 К у вузлах температурного масиву, згідно якого алгоритм С прогріває більшу частину розплаву в температурному діапазоні 1950 – 2050 К в порівнянні з алгоритмами А та В, у яких є незначне зміщення в бік більших температур (1950 – 2100 К). А оскільки згідно досліджень в роботі [1], у випадку виплавки сплаву із додаванням алюмінію, збільшення температури розплаву призводить до збільшення випаровування алюмінію з розплаву, то використання алгоритму С є більш доцільним.

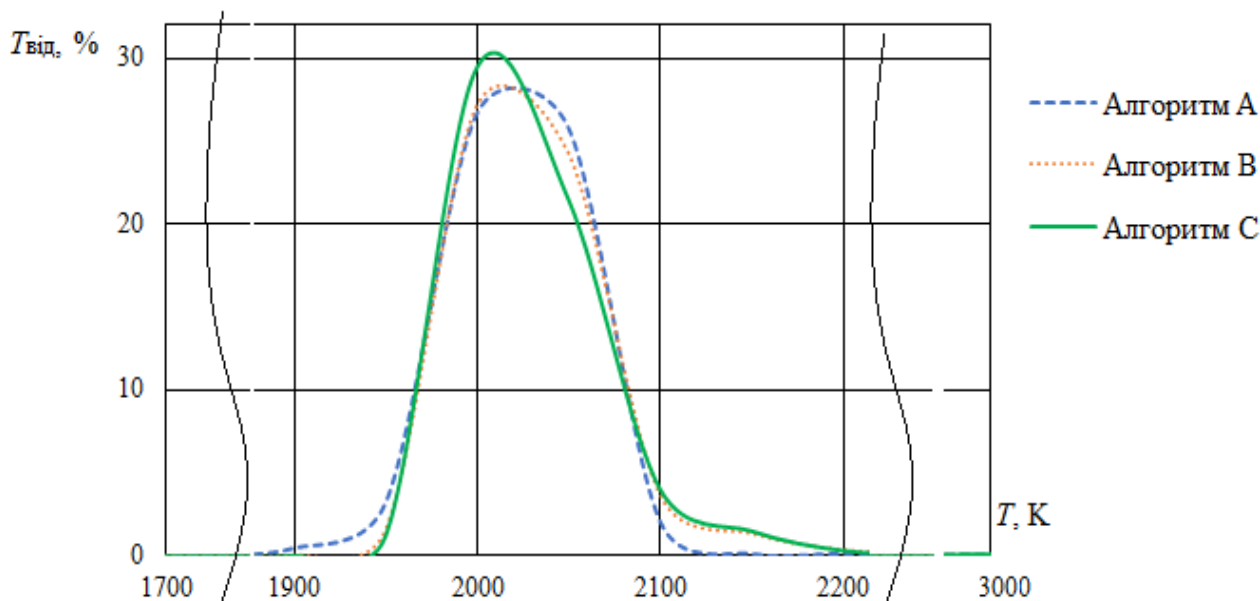


Рис. 3 – Зміна відносного об'єму розплавленого титану в проміжній ємності в часі

В якості висновків проведеного дослідження слід відзначити, що використання запропонованого комбінованого алгоритму керування траєкторію руху електронно-променевої гармат (алгоритм С) забезпечить більш раціональний розподіл потужності обігріву розплавленого титану, що в свою чергу знизить питомі енерговитрати та підвищить продуктивність технологічного процесу та якість титанових сплавів із алюмінієм.

Список використаних джерел

1. Патон, Б.Е. *Електронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекрационных металлов* / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин. – К.: Наукова думка, 2008. – 312 с.
2. Грабовський, Г.Г. *Керування температурою титанового розплаву в проміжній ємності при електронно-променевій плавці*. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // *Автоматика: Матеріали доповідей XX міжнародної конференції з автоматичного управління, присвяченої 100-чю з дня народження академіка НАНУ О.Г. Івахненка*. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування, 2013. – С.181.
3. Цибрій, Ю.О. *Алгоритм керування траєкторією електронного променя при плавці титану* / Ю.О. Цибрій // *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції*. – К., 2016. – С.121–123.
4. Цибрій, Ю.О. *Мехатронна система керування плавкою титану зі зворотним зв'язком по температурі та по рівню розплаву в кристалізаторі* / Ю.О. Цибрій // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – 2017. – №5 (235). – С. 100 – 105.