

УДК 621.645: 519.63

МЕХАТРОННА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПЛАВКОЮ ТИТАНУ ЗІ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ТЕМПЕРАТУРІ ТА ПО РІВНЮ РОЗПЛАВУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ**Цибрій Ю.О.****MECHATRONIC CONTROL SYSTEM FOR TITANIUM MELTING WITH TEMPERATURE AND MELT LEVEL OF THE CRYSTALLIZER FEEDBACK****Tsybrii I.O.**

Порівняно ефективність алгоритмів керування траєкторією променя електронно-променевої гармати. Нестационарний тривимірний теплообмін в проміжній ємності моделювався за допомогою методу скінчених різниць. Показано, що стандартний алгоритм із зигзагоподібною траєкторією забезпечує рівномірний прогрів розплаву у випадку відсутності нерозплавленої шихти. Запропоновано алгоритм, який дозволяє ефективно прогрівати розплавлений метал незалежно від наявності чи відсутності нерозплавленої шихти. Впровадження запропонованого алгоритму в технологічний процес дозволяє суттєво підвищити ефективність плавки титану. Розроблено загальну мехатронну систему керування технологічним процесом виплавки титанових зливків для ЕППУ ТІСО-15М з використанням автоматичного керування зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності і по рівню розплаву в кристалізаторі.
Ключові слова: електронно-променева плавка, проміжна ємність, розподіл температур, титановий розплав, мехатронна система керування плавкою титану

Вступ. Розвиток сучасної техніки залежить від використання високоякісних металевих матеріалів, які володіють високими експлуатаційними фізико-хімічними властивостями, а саме високою питомою міцністю у широкому температурному діапазоні, хімічною стійкістю в агресивних середовищах та іншими спеціальними властивостями. До таких матеріалів відноситься титан та сплави на його основі [1, 2].

Постановка проблеми. На сьогодні в Україні титан отримують за допомогою вакуумно-дугової, електрошлакової, плазмової та електронно-променевої плавки (ЕПП). ЕПП вважається найбільш прогресивною технологією, оскільки титановий зливочок, отриманий таким методом, має найвищу ступінь очищення в порівнянні з іншими методами, за рахунок чого непотрібно виконувати переплав зливку багатократно, відсутні жорсткі ви-

моги до шихтового матеріалу по хімічному та фізичному складу; є можливість активного втручання в технологічний процес.

Однак в порівнянні з існуючими технологіями плавки ЕПП має недостатньо високу продуктивність та на сьогодні є однією з найбільш енергозатратних [3]. Процес ЕПП також суттєво залежить від впливу людського фактора. Так для виплавки зливку довжиною 1.5 м різними операторами розкид часу становить приблизно 50 хв (15% від тривалості процесу оплавлення шихти), що в свою чергу призводить до додаткових витрат електроенергії. Крім цього, при витягуванні зливку з кристалізатора на його поверхні утворюються різноманітні дефекти, для усунення яких зливочок додатково оброблюється з втратами до 10% маси [4].

Сучасний розвиток інформаційних технологій та комп'ютерних систем керування надає можливість підвищити ефективність виплавки титану на основі розробки мехатронної системи керування найбільш енерговитратної частини процесу ЕПП – оплавлення шихтового матеріалу в проміжній ємності (ПЄ) та витягування зливку з кристалізатора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальними проблемами технології ЕПП та моделюванням її процесів обігріву присвячені роботи вчених Б.Е. Патона, Н.П. Тригуба, С.В. Ахонина, Г.В. Жука, А.И. Сапка, С.В. Ладохіна, К. Вутової, С. Шиллера, та ін.. Проблемами автоматизації процесів обігріву розплаву в ПЄ займалися вчені В. О. Мушегян, В.А. Гутык, С. Лутцман, М.Ф. Цей.

Метою дослідження було підвищення ефективності керування процесом виготовлення титанових зливків, яке забезпечить зниження питомих енерговитрат, збільшить продуктивність виплавки, покращить якісні характеристики зливків шляхом розробки мехатронної системи управління ЕПП з використанням автоматичного керування зі зворот-

ним зв'язком по температурі розплаву в ПЄ і по рівню розплаву в кристалізаторі.

Результаті досліджень. Зроблено допущення, що досліджувана область ПЄ V являє собою паралелепіпед з гранями A, B, C, F, E (рис. 1).

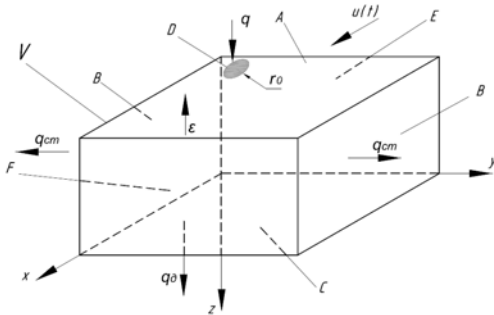


Рис. 1. Схема теплообміну в ПЄ

Виконуючи сумісне вирішення рівняння теплопровідності Фур'є та системи рівнянь гідродинаміки Нав'є-Стокса [5], приймаючи, що поле швидкостей течії однорідне, за винятком стінок та дна де течія відсутня, отримуємо рівняння тепломасообміну, враховуючи зміну швидкості течії титанового розплаву в заданому діапазоні:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + u(t) \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \\ (x, y, z) \in V, 0 < t < t_m \\ u(t) = \{u_{min} \dots u_{max}\} \\ u|_B = 0 \\ u|_C = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де x, y, z – координати точки; t – змінна часу; t_m – тривалість моделювання; $u(t)$ – швидкість течії титанового розплаву вздовж осі x , яка змінюється в часі випадковим чином в діапазоні $\{u_{min} \dots u_{max}\}$; $u|_B$ та $u|_C$ – швидкість вздовж осі x на гранях B та дні C відповідно; T – температура розплаву; λ – коефіцієнт теплопровідності розплаву титану; c_p – питома ізобарна теплоємність розплаву титану; ρ – густина розплаву титану.

В початковий момент часу температура в області V дорівнює T_0 :

$$T|_{(x,y,z) \in V; t=0} = T_0. \quad (2)$$

Під час плавки в ПЄ через грань E подається розплавлений метал з температурою T_0 . Електронно-променева гармата (ЕПГ) обігриває поверхню T в

круговій області $D \in A$ з радіусом r_0 . Потужність теплового потоку променю в області D розподіляється згідно виразу $q = q_0 \cdot \exp(-kr^2)$, а в часі за заданим законом, $q = q(t, x, y)$, де q_0 – питома потужність теплового потоку в центрі області D , k – коефіцієнт зосередженості електронного променя; $r \in [0, r_0]$ – відстань від центру області D до точки на поверхні, яка розглядається. З поверхні A/D відбувається радіаційне випромінювання в навколишнє середовище з температурою T_{cep} ; через бокові грані B і через дно C відбувається охолодження з питомою потужністю q_{cm} і q_d відповідно. Описані граничні умови в математичній формі мають вигляд:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in D} = q_0 \cdot \exp(-kr^2), \\ q = q(t_m), \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in A \setminus D} = \varepsilon \sigma \left(T^4 \Big|_{(x,y,z) \in A \setminus D} - T_{cep}^4 \right), \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in C} = q_d, \\ \pm \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{(x,y,z) \in B} = q_{cm}, \\ T_{(x,y,z) \in E} = T_0, \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{(x,y,z) \in F} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де σ – постійна Стефана-Больцмана; ε – ступінь чорноти розплаву титану.

Сформульовану теплову задачу було вирішено за допомогою програмного пакету MatLAB із застосуванням методу дробових кроків, що дозволило змінювати координати джерела нагріву та швидкість течії розплаву під час моделювання технологічного процесу [6, 7].

В подальшому для розробки алгоритму керування обігриву титанового розплаву в ПЄ ЕПУ ТІСО-15М моделювання проводилося в програмному пакеті MatLAB, оскільки даний пакет забезпечує можливість моделювання зі зміною координати джерела обігриву та течії розплаву безпосередньо в процесі розрахунку тепломасообміну, тобто він має можливість імітації зворотного зв'язку по температурі.

Аналіз чисельного розрахунку математичної моделі показав: що збільшення швидкості течії розплаву в ПЄ ЕПУ ТІСО-15М вище 0.003 м/с призводить до зниження температури в центральній області V і незначного підвищення температури розплаву в місцях його контакту зі стінками та дном ПЄ; зміна інтенсивності охолодження стінок та дна

V призводить до зниження температури розплаву в периферійній області, при цьому зміна температури в центральній області V несуттєва; для рівномірного прогріву розплаву по всьому об'єму проміжної ємності в необхідному температурному діапазоні розподіл потужності теплового потоку по поверхні першої і другої частини проміжної ємності становить 3:2.

Для перевірки достовірності чисельних результатів запропонованої математичної моделі у програмному пакеті ANSYS Fluent було змодельовано процес теплообміну для всіх точок об'єму V з урахуванням течії розплаву при різних швидкостях руху розплаву, режимах охолодження ПС, потужностях нагріву та пропорціях розподілу нагріву по поверхні ПС. Порівняльним аналізом результатів моделювання встановлено, що: температурні поля отримані за допомогою розробленої програми в MatLAB мають подібну форму до температурних полів отриманих за допомогою програмного пакету ANSYS Fluent; похибка результатів моделювання не перевищує 2%. В якості прикладу, на рис. 2 представлено температурні поля, отримані за допомогою ANSYS Fluent та MatLAB для джерела обігріву з постійною координатою $q = 1.5 \text{ МВт/м}^2$ на глибині $z = 15 \text{ мм}$ та $z = 5 \text{ мм}$, $u = 0.003 \text{ м/с}$, $q_{cm} = 0 \text{ МВт/м}^2$, $q_d = 0 \text{ МВт/м}^2$.

Для забезпечення зворотного зв'язку по температурі в якості приймача випромінювання запропоновано використовувати відеокамеру з високою роздільною здатністю чи тепловізор 6 (рис. 3а), яка встановлена поза плавильною камерою 1, що захоплює зображення поверхні ПС 4 через оглядове вікно 5, передає його в блок керування 8 промислового комп'ютера 7, де воно розбивається на квадрати, визначаються середні температури квадратів (рис. 3б) і на основі алгоритмів керування передається керуючий сигнал на ЕПГ 2 та 3.

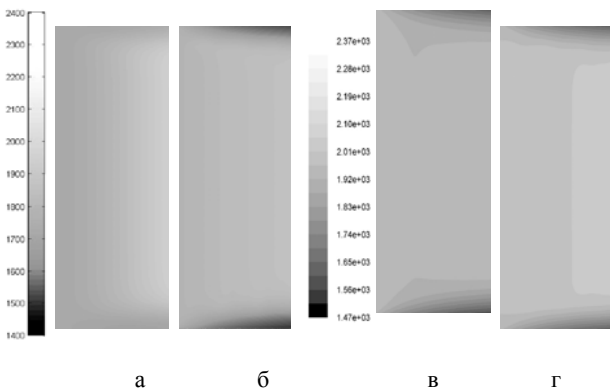


Рис. 2. Розподіл температури в розплаві:
а – MatLAB $z=5 \text{ мм}$; б – MatLAB $z=15 \text{ мм}$;
в – ANSYS Fluent $z=5 \text{ мм}$; г – ANSYS Fluent $z=15 \text{ мм}$

Запропоновано алгоритм А обігріву титанового розплаву ПС зі зворотним зв'язком по середній температурі квадратів (рис. 4) на основі існуючого

стандартного алгоритму із зигзагоподібною траєкторією руху променя В. Згідно з алгоритмом А ПС розбивається на n квадратів, і на початку технологічного процесу або коли поточний час перебігу процесу t_{nom} дорівнює часу періоду t_{nep} – система визначає k найхолодніших квадратів та у випадку, якщо мінімальна середня температура квадратів T_{min} менше допустимої температури $T_{доп}$ система почне обігрівати холодні квадрати починаючи з поточного квадрату k_{nom} та чотири прилеглі зони до нього протягом п'яти часових кроків $5\Delta t$. Після закінчення обігріву холодних квадратів система продовжить роботу в режимі алгоритму В, починаючи з квадрата h_{nom} , до моменту часу $t_{nom} = t_{nep}$. Після цього увесь цикл повториться.

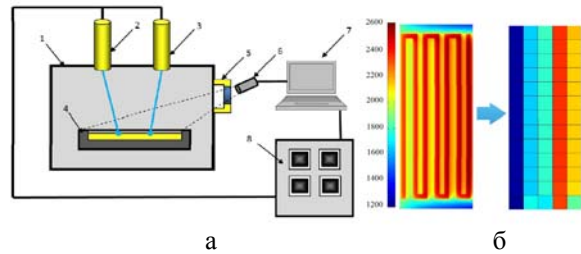


Рис. 3. а – система керування траєкторіями ЕПГ зі зворотним зв'язком по температурі; 1 – плавильна камера; 2 та 3 – ЕПГ над ПС; 4 – ПС; 5 – оглядове вікно; 6 – відеокамера; 7 – промисловий комп'ютер; 8 – блок керування ЕПГ; б – розбиття температурного поля поверхні ПС на умовні квадрати з середньою температурою

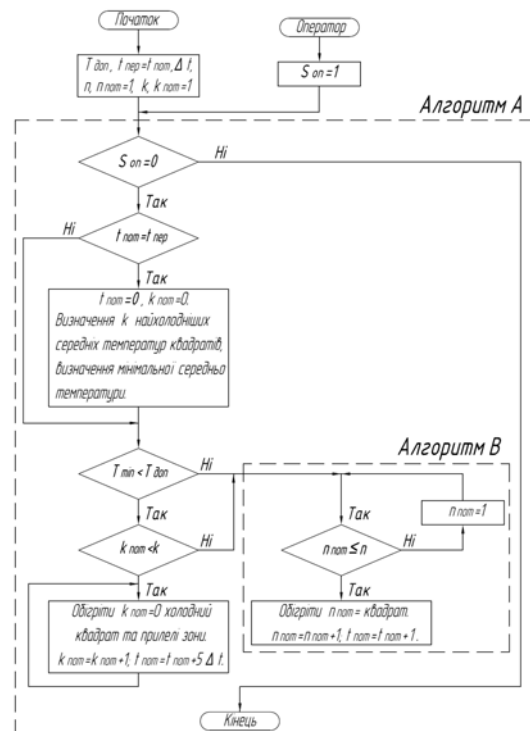


Рис. 4. Схема алгоритму обігріву титанового розплаву ПС зі зворотним зв'язком по середній температурі квадратів

У випадку якщо мінімальна середня температура T_{min} більша допустимої $T_{дон}$ система весь період $t_{пер}$ буде обігрівати розплав в ПЄ за існуючим алгоритмом В продовжуючи з квадрата h_{nom} . При необхідності в технологічний процес може втрутитись оператор і зупинити його (сигнал S_{on}).

На рис. 5 представлені результати моделювання роботи двох алгоритмів. Алгоритм В забезпечує рівномірний прогрів розплаву в необхідному інтервалі температур при відсутності нерозплавленої шихти в ПЄ (рис. 5а), але не дозволяє розплавляти шихту у випадку її потрапляння в ПЄ (рис. 5б). Алгоритм А дозволяє розплавляти шматки шихти, що потрапляють в ПЄ і прогрівати розплав в необхідному температурному інтервалі та забезпечує рівномірність розподілу температури (рис. 5 в, г).

На рис. 6 представлено розподіл температури на поверхні ПЄ в різні моменти часу для запропонованого алгоритму А. Показано, що підсистема протягом перших 16 секунд працює в режимі двох алгоритмів і шматок шихти повністю розплавлюється. На 16 секунд температура розплаву в ПЄ розподілена рівномірно і знаходиться в необхідному температурному інтервалі і середні температури квадратів перевищують температуру плавлення титану і алгоритм переходить в режим роботи алгоритму В.

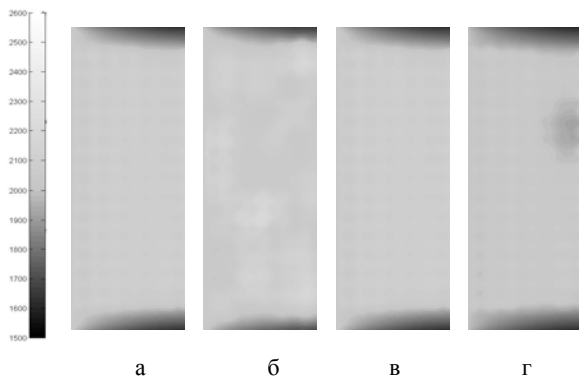


Рис. 5. Розподіл температури в ПЄ на висоті 25 мм для алгоритму А: а – при відсутності нерозплавленої шихти, б – з нерозплавленою шихтою; для алгоритму В: в – при відсутності нерозплавленої шихти, г – з нерозплавленою шихтою

Використання алгоритму А дозволяє в порівнянні з існуючим алгоритмом В зменшити час виплавки одного зливку та зменшити енерговитрати технологічного процесу, а також зменшити втрати на випаровування титану та легуючих домішок з розплаву.

При одночасній роботі декількох ЕПГ ПЄ розбивається на зони обігріву цих ЕПГ та на квадрати згідно раніше запропонованого алгоритму обігріву титанового розплаву ПЄ зі зворотним зв'язком по середній температурі квадратів. При

аналізі середніх температур в зонах ЕПГ у випадку, якщо в одній зон відсутні квадрат з температурою меншою за мінімальну середню температуру квадратів T_{min} , а в зоні прилеглий до неї їх більше ніж k і вони потрапляють в зону досяжності ЕПГ (рис. 7), то вони будуть обігріті згідно алгоритму. Таким чином підвищиться ефективність обігріву розплаву в ПЄ за рахунок перерозподілу потужності ЕПГ.

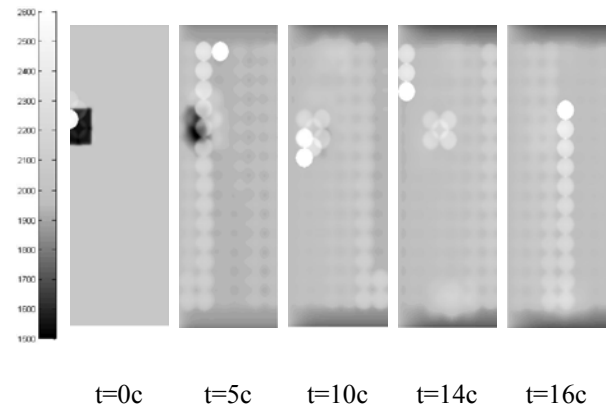


Рис. 6. Розподіл температури на поверхні ПЄ при використанні алгоритму А

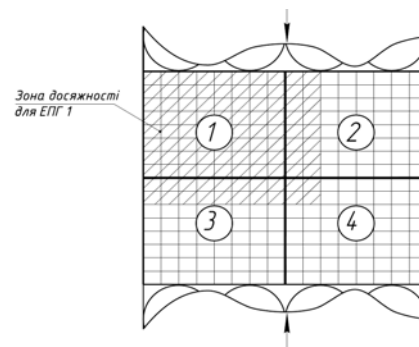


Рис. 7. Розподіл ПЄ на зони обігріву ЕПГ та зони досяжності променю ЕПГ 1

Для отримання необхідного хімічного складу сплавів на основі титану легованих алюмінієм є важливою задачею витримка розплаву в необхідному температурному діапазоні протягом певного часу, оскільки у випадку повільної подачі шихти в зону плавки з розплаву випарується більше алюмінію. Існують відомі рекомендації по швидкості витягування зливку з кристалізатора та залежності між потужністю обігріву та вмістом алюмінію в сплаві, які можна використати для забезпечення необхідних вимог.

Контроль швидкості подачі шихти в зону плавки може забезпечити розроблена мехатронна система керування технологічним процесом (рис. 8) складається з підсистеми керування обігрівом розплаву в ПЄ, підсистеми керування витягування зливку з

кристалізатора та підсистеми подачі шихти в зону плавки.



Рис. 8. Схема мехатронної системи керування ЕПП

Запропонована мехатронна система отримує через блоки керування витягуванням та ЕПП сигнали про тепловий стан розплаву в проміжній ємності та поточний рівень розплаву в кристалізаторі. На основі чого визначається динаміка зміни рівня розплаву в кристалізаторі і масова витрата розплаву за середньої температури розплаву, що зливається в кристалізатор. І з врахуванням існуючих залежностей періодично подається керуючий сигнал на подачу шихти в зону плавки по заданому закону.

Висновки

1. Запропоновано нестационарну трьохвимірну математичну модель тепломасообміну зі зміною джерела нагріву за заданим законом та течії розплаву в проміжній ємності при ЕПП та її розв'язок в програмному пакеті Matlab. Особливістю розв'язку математичної моделі в даному пакеті є можливість зміни джерела нагріву в процесі моделювання за заданим законом чи по заданим координатам.

2. Розроблено новий комбінований алгоритм керування траєкторією електронного променя по поверхні ПС ЕПУ зі зворотним зв'язком по температурі за допомогою тепловізора, який зменшує вплив людського фактору на час оплавлення шихти та енерговитрати часу виплавки одного зливку.

3. Розроблено загальну мехатронну систему керування технологічним процесом виплавки титанових зливків для ЕПУ ТІСО-15М з використанням автоматичного керування зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності і по рівню розплаву в кристалізаторі, яка дозволяє зменшити енерговитрати та підвищити продуктивність виплавки, покращити якісні характеристики зливків.

Література

1. Paton B. E. Basic trends of scientific research into the problem of titanium in the Ukraine / Paton B. E., A. P. Shpak, O. M. Ivashyshyn // Materials Science. – 2006. – Vol.42, №3. – p. 287– 298.

2. Электронно-лучевая плавка титана / [Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук]. – К.: Наукова думка, 2006. – 248 с.(ил).
3. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве: / [С. В. Ладохин, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский, Т. В. Лапшук, В. Г. Шмигидин, Л. А. Кравчук, А. С. Гладков]. – К.: Сталь, 2007. – 626 с.
4. Грабовський Г.Г. Мехатронна система керування плавкою титану / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О.// Промислова гідроліка і пневматика. – 2012. № 2. – С. 101–105.
5. Carslaw H., Jaeger J. Conduction of Heat in Solids, 2 edition. / H. Carslaw, J. Jaeger – Oxford University Press, USA, 1959. – 510 p.
6. Mathews J. H. Numerical Methods Using Matlab (4th Edition) / J. H. Mathews. – Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 0 7458. – 2004. – 696 p.
7. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. / Н.Н. Яненко – Новосибирск: Наука, 1967. – 196 с.

References

1. Paton B. E. Basic trends of scientific research into the problem of titanium in the Ukraine / Paton B. E., A. P. Shpak, O. M. Ivashyshyn // Materials Science. – 2006. – Vol.42, №3. – p. 287– 298.
2. Jelektronno-luchevaja plavka titana / [B.E. Paton, N.P. Trigub, S.V. Ahonin, G.V. Zhuk]. – K.: Naukova dumka, 2006. – 248 s.(il).
3. Jelektronno-luchevaja plavka v litejnom proizvodstve: / [S. V. Ladohin, N. I. Levickij, V. B. Chernjavskij, T. V. Lapshuk, V. G. Shmigidin, L. A. Kravchuk, A. S. Gladkov]. – K.: Stal', 2007. – 626 s.
4. Grabov'skij G.G. Mehanotronna sistema keruvannja plavkoju titanu / Grabov'skij G.G., Cibrij Ju.O.// Promislova gidravlika i pnevmatika. – 2012. № 2. – S. 101–105.
5. Carslaw H., Jaeger J. Conduction of Heat in Solids, 2 edition. / H. Carslaw, J. Jaeger – Oxford University Press, USA, 1959. – 510 p.
6. Mathews J. H. Numerical Methods Using Matlab (4th Edition) / J. H. Mathews. – Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 0 7458. – 2004. – 696 p.
7. Janenko N.N. Metod drobnih shagov reshenija mnogomernyh zadach matematicheskoi fiziki. / N.N. Janenko – Novosibirsk: Nauka, 1967. – 196 s.

Цибрій Ю.А. Мехатронная система управления плавкой титана с обратной связи по температуре и по уровню расплава в кристаллизаторе

Сравнена эффективность алгоритмов управления траекторией луча электронно-лучевой пушки. Нестационарный трехмерный теплообмен в промежуточной емкости моделировался с помощью метода конечных разностей. Показано, что стандартный алгоритм с зигзагообразной траекторией обеспечивает равномерный прогрев расплава в случае отсутствия нерасплавленной шихты. Предложен алгоритм, который позволяет эффективно прогревать расплавленный металл независимо от наличия или отсутствия нерасплавленной шихты. Внедрение предложенного алгоритма в технологический процесс позволит существенно повысить эффективность плавки титана. Разработана общая мехатронная система управления технологическим процессом выплавки титановых слитков для ЭЛУ ТІСО-15М с использованием автоматического управления с обратной связью по темпе-

ратуре расплава в промежуточной емкости и по уровню расплава в кристаллизаторе.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка, промежуточная емкость, распределение температур, титановый расплав, мехатронная система управления плавкой титана.

Tsybrii I.O. Mechatronic control system for titanium melting with temperature and melt level of the crystallizer feedback

The new mechatronic control system of electron-beam melting of titanium is presented. Three-dimensional transient heat transfer in the intermediate container was simulated using finite element method. In this study, the efficiency of different algorithms to control the electron beam trajectory was compared. It was shown that the standard algorithm with a zigzag trajectory provides uniform heating of the melt in the absence of unmolten furnace charge. A temperature feedback algorithm allows heating the melt within the required temperature range in the presence of the furnace charge but it doesn't provide temperature distribution uniformity. Based on

the mentioned algorithms, a combined algorithm was proposed which allows efficient heating of the melt regardless of the presence or absence of the furnace charge. The implementation of the combined algorithm into the technological process enables to increase substantially the efficiency of melting of titanium. Developed mechatronic control system has uniform heating of the melt in the intermediate container of the electron beam unit, an efficient distribution of the power of electron beam guns and smooth beginning of the ingot's pulling-out from the crystallizer.

Keywords: electron beam melting, intermediate container, titanium melt, temperature distribution, mechatronic control system of melting titanium

Цибрій Ю.О. – завідувач лабораторією кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, e-mail: tsybriii@ukr.net.

Рецензент: д.т.н., професор **Глікін М.А.**

Стаття подана 10.03.2017