

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



Цибрій Юрій Олександрович

УДК 681.521: 62-278: 621.745

МЕХАНОТРОННА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВИПЛАВКОЮ ТИТАНУ

05.02.02 – машинознавство

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Грабовський Георгій Геннадійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри прикладної
гідроаеромеханіки і механотроніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Козлов Леонід Геннадійович,
Вінницький національний технічний
університет, завідувач кафедри технології та
автоматизації машинобудування

доктор технічних наук, професор
Беляєв Юрій Борисович,
Національний університет харчових
технологій, професор кафедри інтегрованих
автоматизованих систем управління

Захист відбудеться «17» квітня 2018 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « » _____ 2018 року.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11



О.С.Ганпанцурова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасної техніки залежить від використання високоякісних металевих матеріалів, які мають високі експлуатаційні фізико-хімічні властивості, а саме високу питому міцність у широкому температурному діапазоні, хімічну стійкість в агресивних середовищах та інші спеціальні властивості. До таких матеріалів належать титан та сплави на його основі.

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 має найвищу степінь очищення, за рахунок чого непотрібно виконувати переплав зливку багатократно, відсутні жорсткі вимоги до шихтового матеріалу по хімічному та фізичному складу, є можливість активного втручання в технологічний процес.

Порівняно з існуючими технологіями плавки, ЕПП має недостатньо високу продуктивність, та на сьогодні є однією з найбільш енергозатратних. Так питоме енергоспоживання однієї плавки досягає 3 кВт·год/кг. Процес ЕПП також суттєво залежить від впливу людського фактору. Для виплавки зливку довжиною 1.6 м різними операторами розкид часу відносно середнього становить 14%, 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 обробляється з втратами до 10% маси.

Використання інформаційних технологій та комп'ютерних систем керування дозволяє підвищити ефективність виплавки титану на основі розробки механотронної системи керування найбільш енерговитратної частини процесу ЕПП – оплавлення шихтового матеріалу в проміжній ємності (ПЄ) та витягування зливку з кристалізатора. Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є підвищення ефективності ЕПП шляхом зниження питомих енерговитрат, збільшення продуктивності виплавки та покращення якісних характеристик злиwkів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки механіко-машинобудівного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт за темами: №2647-п «Пасивні теплові та комбіновані гідроприводи позиціонування енергосприймаючих елементів екологічно-чистих відновлюваних джерел енергії» (№ держреєстрації 0113U001649); №2648-п «Підвищення ефективності мехатронних систем за рахунок удосконалення гідравлічних систем та кавітаційних виконавчих пристроїв» (№ держреєстрації 0113U001548).

Мета і задачі дослідження: Метою дослідження є підвищення ефективності процесу виготовлення титанових злиwkів, а саме зниження питомих енерговитрат та збільшення продуктивності виплавки шляхом розробки механотронної системи керування виплаwкою титану при електронно-променеvій плавці.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних задач:

1. Провести аналіз резервів підвищення ефективності процесу виготовлення титанових злиwkів при електронно-променеvій плавці.

2. Теоретично обґрунтувати застосування механотронної системи керування виплавою титана зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності і по рівню розплаву в кристалізаторі.

3. Дослідити вплив швидкості течії розплаву, потужності обігріву електронно-променевої гармати, коефіцієнту розподілу потужності обігріву по поверхні проміжної ємності та алгоритмів керування рухом електронного променя на витрату розплаву з проміжної ємності в кристалізатор.

4. Науково обґрунтувати та розробити спосіб витягування титанового зливку з кристалізатора та конструкцію приводу двосторонньої дії для подачі на зливки додаткових коливань.

5. Розробити інженерну методику вибору раціональних геометричних параметрів приводу подачі додаткових коливань на основі дослідження впливу його конструктивних параметрів на довговічність.

6. Оцінити ефективність механотронної системи керування виплавою титану зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення титанових зливків при електронно-променевої плавці.

Предмет дослідження – механотронна система керування електронно-променевою виплавою титану.

Методи дослідження. Для моделювання процесів в ПЕ електронно-променевої установки (ЕПУ) та напружено-деформованого стану (НДС) мембран гідравлічного мембранного виконавчого механізму (ГМВМ) застосовано метод скінчених різниць з використанням програмного пакета ANSYS та COMSOL. При моделюванні процесів в ПЕ використано метод дробових кроків рішення багатовимірних задач в програмному пакеті MATLAB. При створенні алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя в ПЕ та витягування зливку з кристалізатора застосовані методи теорії автоматичного керування.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше на основі розробленої нестационарної тривимірної математичної моделі тепло-масообміну в проміжній ємності при електронно-променевої плавці науково обґрунтовано застосування механотронної системи керування виплавою титану, яка забезпечує вибір раціональних тепло-енергетичних характеристик процесу плавки титану з урахуванням подачі шихти та динаміки наплавлення зливку в кристалізаторі.

2. Вперше на основі дослідження процесу плавки титану розроблено метод раціонального розподілу потужності обігріву розплаву в проміжній ємності електронно-променевої установки, за рахунок керування траєкторією руху електронного променя із зворотним зв'язком по температурі розплаву та положенню нерозплавленої шихти відносно зливного носка.

3. Отримано залежності для вибору раціональних геометричних параметрів гідравлічного мембранного виконавчого механізму для подачі коливань на зливки в межах заданого ресурсу роботи, які враховують напружено-деформований стан сталевих мембран.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано механотронну систему керування виплавою титану при електронно-променевої плавці зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі, яка дозволяє, у порівнянні з ручним керуванням, підвищити на 18% ефективність роботи, у тому числі зменшити на 14% енергоспоживання, збільшити на 16% продуктивність виплавки та знизити втрати маси зливу при обробці поверхні до 7%.

2. Розроблено алгоритм керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ зі зворотним зв'язком по температурі за допомогою тепловізора, який дозволяє отримати однорідні температурні поля в діапазоні 1950-2200 К, розрахувати швидкість подачі шихти в зону плавки, і як результат – отримати зливки з необхідним хімічним складом.

3. Запропоновано спосіб витягування зливу з кристалізатора з подачею додаткових коливань на нього (патент № 91877 України), який дозволяє за допомогою гвинтової передачі та гідравлічного мембранного виконавчого механізму здійснювати грубе та точне регулювання рівня розплаву в кристалізаторі, завдяки чому зменшується вірогідність розриву поверхні та отримання гофрів на готових зливках і знижуються втрати матеріалу при подальшій обробці злиwkів.

4. Розроблено та запатентована конструкцію гідравлічного мембранного виконавчого механізму (патент № 91889 України) і запропоновано інженерну методику вибору його раціональних геометричних параметрів на основі розрахунку напружено-деформованого стану мембрани.

Результати дисертаційної роботи впровадженні на підприємствах ДП НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ), ТОВ «Стратегія БМ» (м. Київ) та ДНВК «КІА» (м. Київ); використовуються в навчальному процесі кафедри прикладної механіки та машин КНУТД, кафедри машинознавства НАУ, кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Особистий внесок здобувача

Основні положення та результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані автором особисто. У спільних роботах автору належать:

- механотронна система керування виплавою титану при ЕПП з використанням автоматичного керування зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в ПЄ і по рівню розплаву в кристалізаторі [1], [9], [20];
- нестационарна тривимірна математична модель процесу в ПЄ з врахуванням течії розплаву та зміни координат джерела нагріву в процесі моделювання [3], [4], [12], [15];
- метод та алгоритм керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ зі зворотним зв'язком по температурі з використанням тепловізора та додатковим обігрівом прилеглих зон до охолоджених [11];
- спосіб та система витягування зливу з кристалізатора з подачею додаткових коливань на зливки за допомогою ГМВМ [2], [7], [10];
- конструкція ГМВМ двосторонньої дії для подачі коливань на зливки по заданому закону незалежно від маси зливу [8], [13], [14];

- методика розрахунку на втомну міцність та вибору раціональних геометричних параметрів мембран ГМВМ для роботи їх в якості приводів подачі додаткових коливань на зливки в кристалізаторі при ЕПП [6], [17], [18].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідались та обговорювалися на міжнародній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Київ, 2012-2017), XX міжнародній конференції з автоматичного управління, присвяченої 100-чю з дня народження академіка НАНУ О.Г. Івахненка «Автоматика» (м. Миколаїв, 2013), міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування» (м. Вінниця, 2014), міжнародній науково-технічній конференції АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика» (2014, 2016), 13-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (2017). Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на розширеному засіданні кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки КПП ім. Ігоря Сікорського.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 друкованих праць, серед них 6 – статті у провідних наукових фахових виданнях (у тому числі 3 публікації у виданнях України, які включені до науко-метричних баз); 2 – патенти України на корисну модель; 12 – матеріали доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, 9 додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 209 сторінках машинописного тексту, з них: 144 сторінок основного тексту, 48 сторінок додатків, 72 рисунків, 3 таблиць, списку використаних джерел з 139 найменувань на 17 сторінках, з них 112 кирилицею та 27 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі, визначені об'єкт, предмет та методи дослідження, зазначено наукову новизну та практичне значення результатів, які виносяться на захист. Вказано особистий вклад здобувача, апробацію результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проведено аналіз відомих ЕПУ та автоматичних систем керування технологічним процесом ЕПП тугоплавких металів і титану, наведені переваги та недоліки існуючих способів витягування зливку з кристалізатора та обігріву титанового розплаву в ПЄ. Сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

Загальним проблемам технології ЕПП та моделюванню її процесів присвячені роботи С.В. Ахоніна, Г.В. Жука, С.В. Ладохіна, Б.Е. Патона, А.И. Сапка, Н.П. Тригуба, S. Schiller, K. Vutova, та ін., в яких показані переваги та недоліки способів обігріву розплаву. Зокрема, зазначено, що процес плавки потребує підвищення ефективності ЕПП шляхом зниження питомих енерговитрат, збільшення продуктивності виплавки та автоматизації процесів обігріву та витягування злиwkів.

Проблемами керування процесами ЕПП та розробкою конструкцій пристроїв обігріву розплаву в ПЄ займались В. О. Мушегян, В.А. Тутик, S. Lutzmann, M.F. Zäh. Роботи О.В. Антикуза, Ю.Б. Беляєва, Ю.Н. Ланкіна, В.Г. Соловйова та ін., присвячені системам витягування зливку з кристалізатора.

Аналіз робіт показав, що головним недоліком існуючих систем керування ЕПУ є неузгодженість процесів керування обігрівом розплаву в ПЄ, витягування зливку з кристалізатора та подачі шихти в зону плавки. Оплавлення шихти та обігрів розплавленого титану залежить від реакції оператора на зміну теплового стану в ПЄ, оскільки засоби вимірювання температури в плавильній камері ЕПУ відсутні. Суб'єктивний вибір оператором режиму подачі шихти, стандартної траєкторії чи режиму ручного керування траєкторією руху променю в процесі розплавлення шихти до моменту її стікання в кристалізатор також знижує ефективність процесу виготовлення титанових зливків. Крім того, поверхня отриманих титанових зливків має дефекти – каверни та гофри, які зумовлені дискретно-безперервним витягуванням з кристалізатора.

Усунення вищезазначених недоліків потребує нову механотронну систему керування ЕПП з автоматичним керуванням зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в ПЄ і по рівню розплаву в кристалізаторі та вдосконалення системи витягування зливку з кристалізатору для узгодження процесів керування виплавою титану.

На основі проведеного аналізу визначено задачі дослідження.

У другому розділі теоретично обґрунтовано створення механотронної системи керування виплавою титану зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в ПЄ та по рівню розплаву в кристалізаторі та розроблено математичну модель процесу плавки в ПЄ ЕПУ на прикладі ТІСО-15М. Досліджено залежність середньої температури розплаву та відносного розплавленого об'єму титану в ПЄ від технологічних параметрів плавки.

Запропоновано механотронну систему керування виплавою титану з використанням автоматичного керування зі зворотним зв'язком по розподілу температури розплаву в ПЄ та по рівню розплаву в кристалізаторі, яка складається з трьох контурів керування, що впливають на роботу кожного наступного (рис. 1): 1 – контур керування траєкторією руху електронно-променевого гармат (ЕПГ); 2 – контур витягування зливку з кристалізатора; 3 – контур керування подачею шихти в зону плавки. В контурі 1 головним елементом є ПЄ, в якій шихтовий матеріал оплавляється і поступово стікає в кристалізатор. В контурі 2 кристалізований зливкок витягується з подачею додаткових коливань, а також відслідковується динаміка наплавлення зливку і на основі заданих залежностей передається сигнал на контур 3. В контурі керування 3 шихта подається в зону дії контуру 1. Таким чином в запропонованій механотронній системі враховано функціональну залежність $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$, що забезпечує узгодженість роботи механотронної системи в цілому.

Згідно принципової схеми механотронної системи (рис. 2) шихта подається з бункеру 1 приводом подачі 2 в ПЄ 3, де оплавляється ЕПГ 4, розплав очищується від домішок і стікає в кристалізатор 5 з обігрівом від ЕПГ 6. Зливкок поступово витягується з кристалізатора механізмом витягування зливку 7. Зворотний зв'язок по

температурі розплаву в ПЄ та по рівню розплаву в кристалізаторі реалізовано за допомогою тепловізора 8 та відеокамери рівня розплаву 9 відповідно. Усі вхідні та вихідні сигнали поступають та виходять з блоку керування 10.

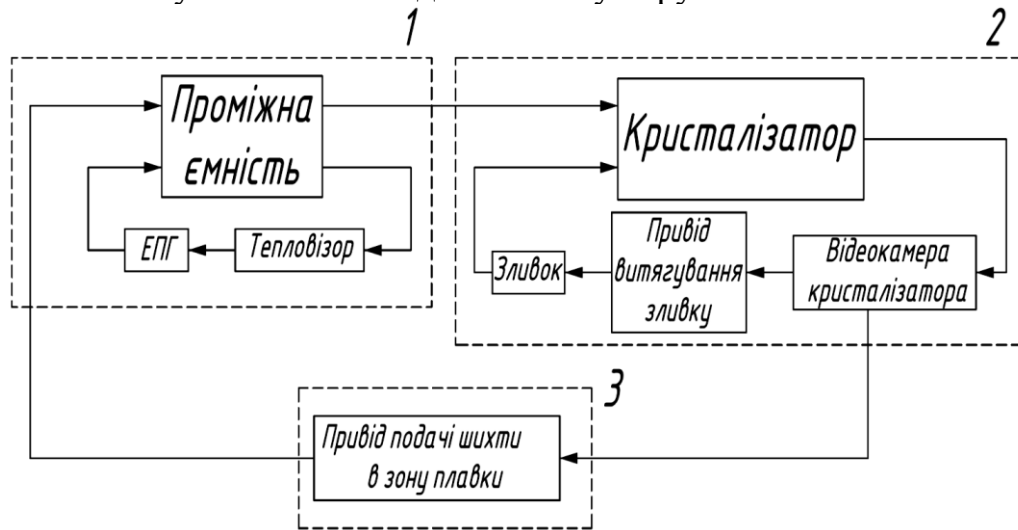


Рис. 1. Схема взаємозв'язків контурів керування технологічного обладнання

Аналіз ЕПУ показав, що найнестійкішим елементом механотронної системи є ПЄ, в якій відбуваються випадкові процеси потрапляння шихти в розплав, що впливає на витрату розплаву в кристалізатор та витягування зливку з нього. Тому визначення процесів в ПЄ дозволяє узгодити роботу всіх контурів керування.

Створена математична модель процесу в ПЄ, що враховує зміну координати джерела нагріву та швидкості течії розплаву в заданому діапазоні. Досліджувана область V ПЄ являє собою паралелепіпед з гранями A, B, C, F, E (рис. 3).

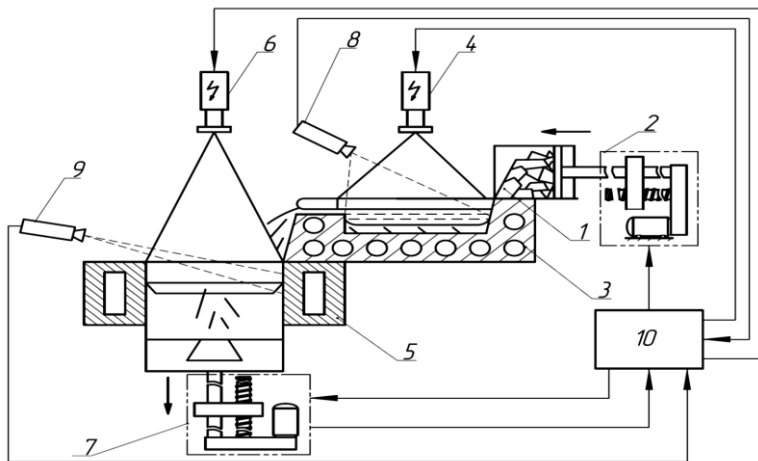


Рис. 2. Принципова схема механотронної системи керування випалкою титану: 1 – бункер з шихтою; 2 – привід подачі шихти; 3 – ПЄ; 4, 6 – ЕПГ; 5 – кристалізатор; 7 – привід витягування зливку; 8 – тепловізор; 9 – відеокамера рівня розплаву; 10 – блок керування

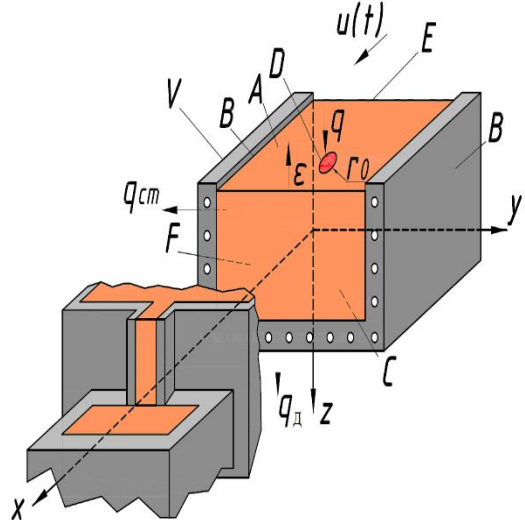


Рис. 3. Розрахункова схема процесу в ПЄ

Виконуючи сумісне вирішення рівняння теплопровідності Фур'є, системи рівнянь гідродинаміки Нав'є-Стокса та приймаючи, що течія на стінках та дні

відсутня, отримано рівняння тепло-масообміну в загальному вигляді, з врахуванням зміни швидкості течії титанового розплаву в заданому діапазоні:

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

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 течії вздовж осі x на гранях B та C відповідно; T – температура розплаву; λ – коефіцієнт теплопровідності розплаву титану; c_p – питома ізобарна теплоємність розплаву титану; ρ – густина розплаву титану.

Початкова умова: температура в області V дорівнює T_0 :

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

Граничні умови (3): під час плавки в ПС через грань E подається розплавлений метал зі швидкістю u та температурою T_0 . ЕПГ обігріває поверхню A в круговій області $D \in A$ з радіусом r_0 . Потужність теплового потоку променю в області D розподіляється згідно виразу $q = q_0 \exp(-k_{\text{ЕПГ}} r_{\text{ЕПГ}}^2)$, а в часі за заданим законом, $q = q(t, x, y)$, де q_0 – питома потужність теплового потоку в центрі області D , $k_{\text{ЕПГ}}$ – коефіцієнт зосередженості електронного променю; $r_{\text{ЕПГ}} \in [0, r_0]$ – відстань від центру області D до точки на поверхні, яка розглядається. З поверхні A , за винятком області D , відбувається радіаційне випромінювання в навколишнє середовище з температурою $T_{\text{н.с.}}$; через грані B і C відбувається охолодження з питомою потужністю $q_{\text{ст}}$ і $q_{\text{д}}$ відповідно.

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in D} = q_0 \cdot \exp(-k_{\text{ЕПГ}} r_{\text{ЕПГ}}^2), \\ q = q(t_m), \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in A \setminus D} = \varepsilon \sigma_{\text{Б}} (T^4|_{(x,y,z) \in A \setminus D} - T_{\text{н.с.}}^4), \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in C} = q_{\text{д}}, \\ \pm \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{(x,y,z) \in B} = q_{\text{ст}}, \\ T|_{(x,y,z) \in E} = T_0, \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{(x,y,z) \in F} = 0, \end{array} \right. \quad (3)$$

де $\sigma_{\text{Б}}$ – постійна Стефана-Больцмана; ε – ступінь чорноти розплаву титану.

Математична модель процесу (1) з урахуванням початкових (2) і граничних умов (3) із застосуванням методу дробових кроків представлена системою рівнянь (4), де i, j, k – одиничні вектори по осях x, y, z ; s – номер часового кроку.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\lambda}{\Delta x} \left(T_{2,j,k,s+\frac{1}{3}} - T_{1,j,k,s+\frac{1}{3}} \right) = 0, x = 0, \\ a\Delta t T_{i-1,j,k,s+\frac{1}{3}} - (\Delta x^2 + 2a\Delta t) T_{i,j,k,s+\frac{1}{3}} + a\Delta t T_{i+1,j,k,s+\frac{1}{3}} = -\Delta x^2 T_{i,j,k,s}, 0 < x < l, \\ -\lambda T_{i,j_{max},k,s+\frac{1}{3}} + \lambda T_{i,j_{max}-1,k,s+\frac{1}{3}} = 0, x = l, \\ \lambda \left(T_{i,2,k,s+\frac{2}{3}} - T_{i,1,k,s+\frac{2}{3}} \right) = q_{ст} \Delta y, y = 0, \\ a\Delta t T_{i,j-1,k,s+\frac{2}{3}} - (\Delta y^2 + 2a\Delta t) T_{i,j,k,s+\frac{2}{3}} + a\Delta t T_{i,j+1,k,s+\frac{2}{3}} = -\Delta y^2 T_{i,j,k,s+\frac{1}{3}}, 0 < y < b, \\ \lambda \left(T_{i,j_{max},k,s+\frac{2}{3}} - T_{i,j_{max}-1,k,s+\frac{2}{3}} \right) = -q_{ст}, y = b, \\ \lambda (T_{i,j,2,s+1} - T_{i,j,1,s+1}) = q_d \Delta z, z = 0, \\ a\Delta t T_{i,j,k-1,s+1} - (\Delta z^2 + 2a\Delta t) T_{i,j,k,s+1} + a\Delta t T_{i,j,k+1,s+1} = -\Delta z^2 T_{i,j,k,s+\frac{2}{3}}, 0 < z < h, \\ \lambda T_{i,j,k_{max}-1,s+1} - \lambda T_{i,j,k_{max},s+1} = -\Delta z (q + \sigma_B T_0^4) + \sigma_B T_{i,j,1,s}^4, z = h, z \in D, \\ \lambda T_{i,j,k_{max}-1,s+1} - \lambda T_{i,j,k_{max},s+1} = \sigma_B T_{i,j,1,s}^4 - \Delta z \sigma_B T_0^4, z = h, z \in \frac{A}{D}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Сформульовану задачу вирішено за допомогою програмного пакету MATLAB. В подальшому програмний пакет MATLAB використаний також для апробації розробленого алгоритму керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ ЕПУ ТІСО-15М, оскільки пакет надає можливість моделювати зміну координат джерела обігріву та швидкість течії розплаву безпосередньо в процесі розрахунку.

Для перевірки достовірності чисельних результатів математичної моделі у програмному пакеті ANSYS Fluent змодельовано процес тепло-масообміну для всіх точок об'єму V з урахуванням течії розплаву при різних швидкостях руху розплаву, режимах охолодження ПЄ та потужностях нагріву поверхні ПЄ. 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. Відхилення результатів моделювання по температурі не перевищує 2%.

На наступному етапі дослідження проведено моделювання процесу в ПЄ з використанням програмного пакету MATLAB. Вихідними змінними параметрами були прийняті швидкість течії розплаву u , потужність обігріву ЕПГ $Q_{ЕПГ}$ та коефіцієнт розподілу потужності по поверхні ПЄ n . В результаті ряду чисельних моделювань отриманні середні значення температури $T_{сер}$ розплаву в ПЄ, а також відношення розплавленого об'єму титану до загального об'єму ПЄ $v_{розп} = (V_{розп}/V) \cdot 100\%$. Встановлено діапазон вхідних параметрів, що задовольняють необхідні діапазони $T_{сер} = 1950 \dots 2200$ К та $v_{розп} = 80 \dots 100\%$. За результатами моделювання проведена апроксимація залежностей $T_{сер} = f(u, Q_{ЕПГ}, n)$ та $v_{розп} = f(u, Q_{ЕПГ}, n)$ (5, 6), яка дає можливість визначати необхідну траєкторію

руху електронного променю та подачу шихти в зону плавки для забезпечення стабільної витрати розплаву в кристалізатор.

$$T_{\text{сер}} = 1.67\text{K} - 398 \frac{\text{с} \cdot \text{K}}{\text{мм}} \cdot u + 22.4 \frac{\text{K}}{\%} \cdot n + 8350 \frac{\text{K}}{\text{кВт}} \cdot Q_{\text{ЕПГ}}; \quad (5)$$

$$v_{\text{розп}} = 0.066\% - 15.2\% \frac{\text{с}}{\text{мм}} \cdot u + 0.93\% \cdot n + 0.297\% \text{кВт}^{-1} \cdot Q_{\text{ЕПГ}}. \quad (6)$$

Аналіз чисельного розрахунку математичної моделі показав: збільшення u в ПЄ ЕПУ ТІСО-15М вище 0.003 м/с призводить до зниження T в центральній області V і незначне підвищення T в місцях контакту розплаву зі стінками B та дном C ПЄ; зміна інтенсивності охолодження стінок та дна V призводить до зниження T в периферійній області, при цьому зміна T в центральній області V несуттєва; для рівномірного прогріву розплаву в усьому об'ємі ПЄ в необхідному температурному діапазоні коефіцієнт розподілу потужності по поверхні A ПЄ становить $n = 50 \dots 60\%$.

Запропонована нестационарна тривимірна математична модель дозволяє враховувати зміни граничних умов обігріву та швидкість течії в діапазоні 0...0.006 м/с в реальному часі та була використана при розробці методу керування траєкторією руху електронного променю по поверхні ПЄ.

В третьому розділі розроблено алгоритми керування траєкторією руху електронного променю в ПЄ з урахуванням роботи однієї та декількох ЕПГ і проведено порівняльний аналіз роботи розробленого алгоритму керування траєкторією руху електронного променю зі зворотним зв'язком по середній температурі та стандартного алгоритму з зигзагоподібною траєкторією.

Для забезпечення зворотного зв'язку по температурі приймачем випромінювання запропоновано використовувати тепловізор 6 (рис. 4), встановлений поза плавильною камерою 1. Тепловізор захоплює зображення поверхні ПЄ 4 через оглядове вікно 5, передає його на промисловий комп'ютер 7 в блок керування ЕПГ 8, де зображення розбивається на квадрати, визначаються середні температури квадратів (рис. 5) і передається керуючий сигнал на ЕПГ 2 та 3.

Розроблений алгоритм керування траєкторією руху електронного променю для однієї ЕПГ містить блок стандартного алгоритму (із зигзагоподібною траєкторією руху променю) та блок алгоритму з рухом променю зі зворотним зв'язком по середній температурі квадратів. Згідно розробленого алгоритму ПЄ розбивається на n квадратів. На початку технологічного процесу або коли система відрахує період $t_{\text{пер}}$ – система визначає $k_{\text{хол}}$ найхолодніших квадратів. У випадку, якщо мінімальна середня температура квадратів T_{min} менше допустимої температури $T_{\text{доп}}$ система почне обігрівати холодні квадрати та прилеглі до нього зони. Після закінчення обігріву холодних квадратів система продовжить роботу в режимі стандартного алгоритму, починаючи з квадрата на якому вона зупинилася, до нового аналізу теплового стану в ПЄ. Після цього увесь цикл повторюється.

У випадку якщо мінімальна середня температура T_{min} більша за допустиму $T_{доп}$ система весь період $t_{пер}$ буде обігрівати розплав в ПЄ за стандартним алгоритмом.

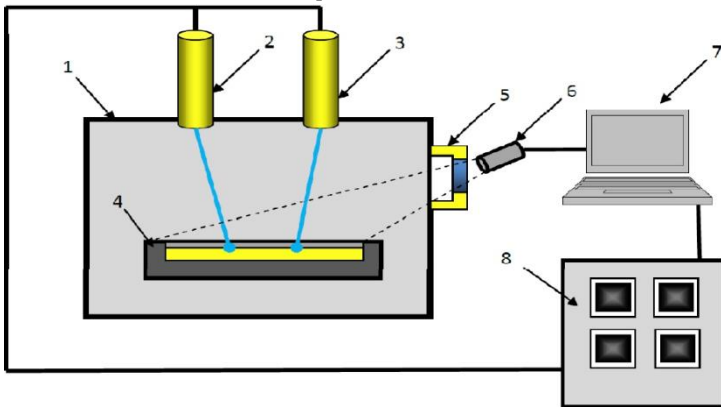


Рис. 4. Контур керування траєкторіями руху променя ЕПГ зі зворотним зв'язком по температурі: 1 – плавильна камера; 2 та 3 – ЕПГ; 4 – ПЄ; 5 – оглядове вікно; 6 – тепловізор; 7 – промисловий комп'ютер; 8 – блок керування ЕПГ

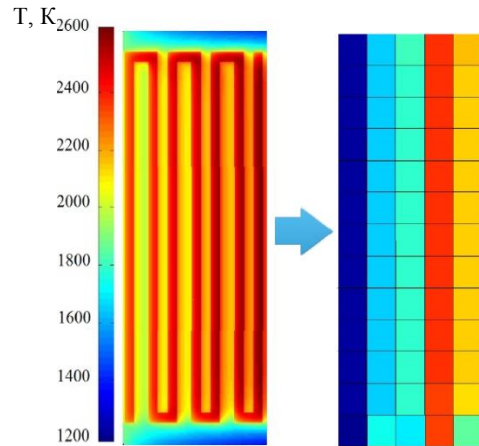


Рис. 5. Розбиття температурного поля поверхні ПЄ на умовні квадрати з середньою температурою

За результатами чисельних досліджень встановлено, що рух променя згідно стандартного алгоритму забезпечує рівномірний прогрів розплаву в необхідному діапазоні температур при відсутності нерозплавленої шихти в ПЄ (рис. 6а), але не дозволяє розплавляти шихту у випадку її потрапляння в ПЄ (рис. 6б). Рух променя, згідно розробленого алгоритму зі зворотним зв'язком по температурі, дозволяє розплавляти шматки шихти, що потрапляють в ПЄ і прогрівати розплав в необхідному температурному інтервалі та забезпечує рівномірність розподілу температури (рис. 6в, г).

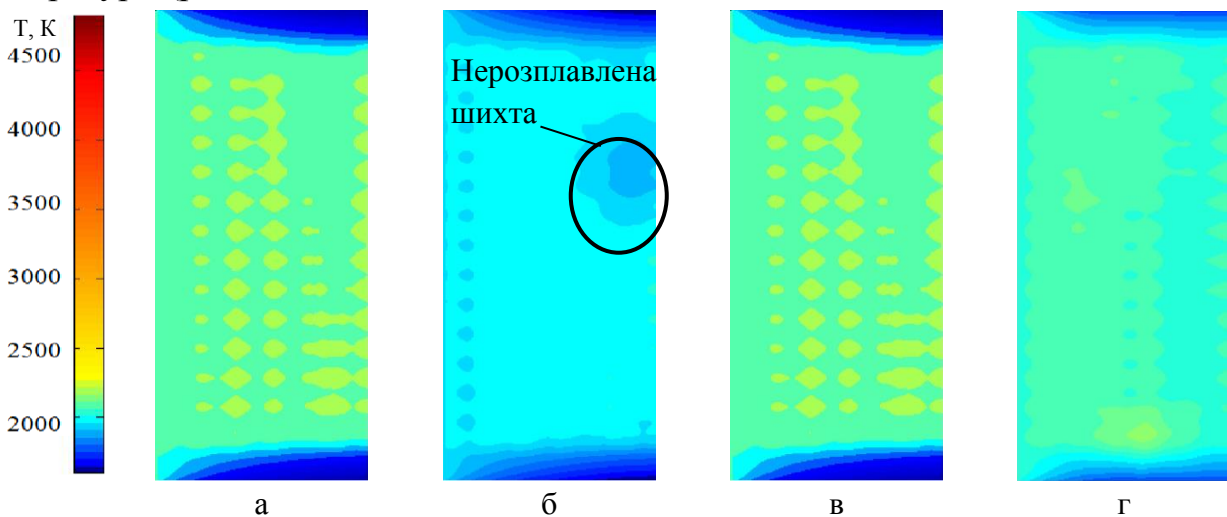


Рис. 6. Розподіл температури в ПЄ на висоті 25 мм для алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя: стандартний при відсутності нерозплавленої шихти (а) та з нерозплавленою шихтою (б); розроблений при відсутності нерозплавленої шихти (в) та з нерозплавленою шихтою (г)

При роботі променя згідно розробленого алгоритму у випадку потрапляння нерозплавленої шихти система протягом перших 14 секунд працює в режимі стандартного алгоритму та алгоритму зі зворотним зв'язком по температурі (рис. 7) і

шматок шихти повністю розплавляється (рис. 7, $t = 14\text{с}$). На 16 секунд температура розплаву в ПЄ розподілена рівномірно і знаходиться в необхідному температурному діапазоні, а рух електронного променя відбувається в режимі стандартного алгоритму.

Встановлено, що використання розробленого алгоритму при керуванні траєкторією руху електронного променя дозволяє в порівнянні з стандартним алгоритмом раціонально розподіляти потужність обігріву по поверхні ПЄ, а також зменшити втрати на випаровування титану та легуючих домішок з розплаву у результаті його перегріву.

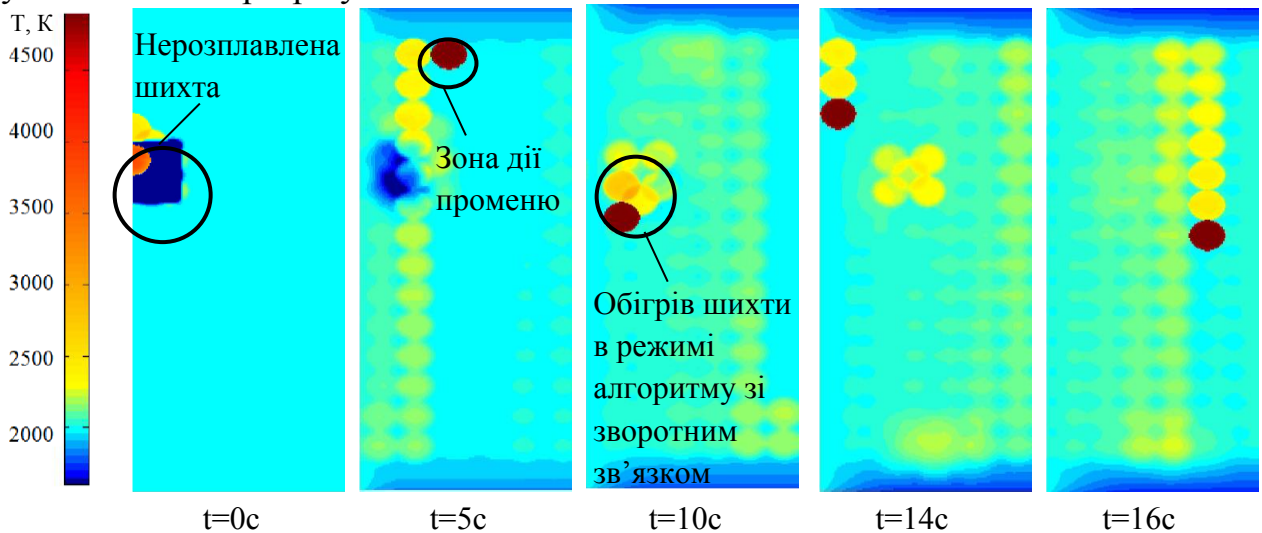


Рис. 7. Розподіл температури на поверхні ПЄ при використанні розробленого алгоритму

В ЕПУ великої продуктивності кількість ЕПГ складає від 2 до 7 штук. Тому запропоновано метод керування траєкторією променя ЕПГ, з урахуванням одночасної роботи декількох ЕПГ, з перерозподілом потужності обігріву по поверхні ПЄ. ПЄ розбивається на зони обігріву ЕПГ (рис. 8), а кожна зона на квадрати згідно раніше розробленого алгоритму керування траєкторією руху електронного променя зі зворотним зв'язком по середній температурі квадратів.

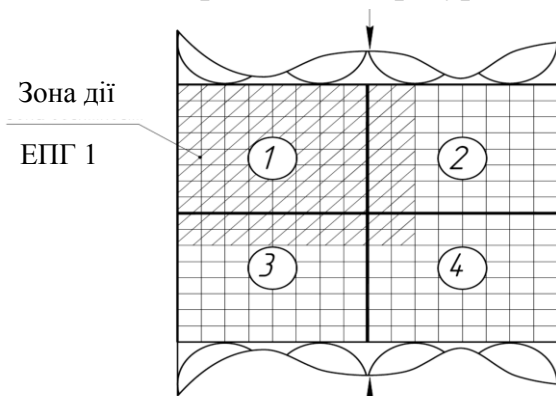


Рис. 8. Розподіл ПЄ на зони обігріву ЕПГ та зона досяжності променю ЕПГ 1

При аналізі середніх температур в зонах ЕПГ у випадку, якщо в одній зоні відсутні квадрати з температурою меншою за допустиму температуру $T_{\text{доп}}$, а в зоні прилеглий до неї їх більше ніж $k_{\text{кв}}$, і вони потрапляють в зону досяжності сусідньої ЕПГ – відбудеться перерозподіл потужності обігріву і непрогріті квадрати будуть обігріті сусідньою ЕПГ. Таким чином, за рахунок перерозподілу потужності ЕПГ, підвищиться ефективність обігріву розплаву в ПЄ.

В четвертому розділі розроблено спосіб та алгоритм витягування зливку з кристалізатора з подачею на нього додаткових коливань за заданим законом. Розроблено конструкцію ГМВМ та досліджено НДС мембран ГМВМ за

допомогою чисельних методів. Проведено аналіз отриманих результатів та запропонована інженерна методика вибору раціональних геометричних параметрів мембран ГМВМ.

Для зменшення кількості дефектів на поверхні зливків при витягуванні запропоновано новий спосіб витягування зливку з кристалізатора з подачею на нього додаткових коливань за певним законом (Патент 91877 України) (рис. 9). Новий спосіб дозволяє за рахунок зниження сил тертя в момент початку руху зливку зменшити вірогідність розриву щойно кристалізованої поверхні та отримання гофрів на готових зливках. За розрахунками таке рішення забезпечує зниження до 7% втрат матеріалу при подальшій обробці зливків.

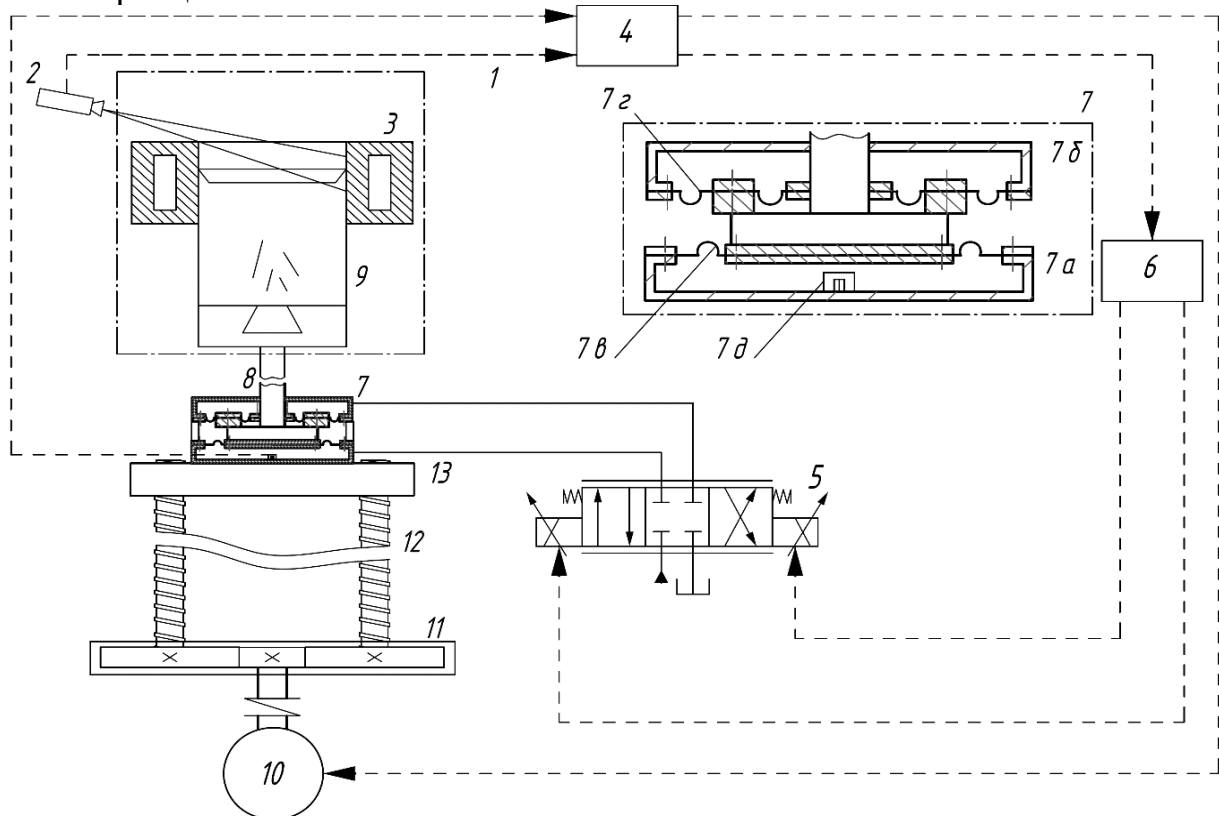


Рис. 9. Контур керування витягуванням зливку з кристалізатора. 1 – плавильна камера; 2 – відеокамера рівня розплаву; 3 – кристалізатор; 4 – блок керування; 5 – електромагніти; 6 – блок керування електромагнітами; 7 – привод подачі коливань (7а,б – мембранні приводи, 7в та 7г – одно- та двоугофрова мембрани, 7д – датчик переміщення); 8 – шток; 9 – зливков; 10 – електродвигун; 11 – редуктор; 12 – гвинтова передача; 13 – платформа

Витягування зливку 9 з кристалізатора 3 виконується приводом, в який входять електродвигун 10, з'єднаний через муфту 2 з редуктором 11 та гвинтовою передачею 12 та ГМВМ 7 (Патент № 91889 України), що складається з двох мембранних приводів 7а і 7б на платформі 13. Зворотний зв'язок по рівню розплаву в кристалізаторі реалізується за допомогою відеокамери 2, що передає сигнал на блок керування 4 і на основі алгоритму видаються керуючі сигнали на гідророзподільник 5 та електродвигун 10. Датчик переміщення 7д відслідковує хід жорсткого центру ГМВМ. Використання ГМВМ забезпечує грубе і точне регулювання рівня розплаву в кристалізаторі та подачу додаткових коливань на зливков. При цьому замість сили тертя початку руху між зливком та кристалізатором виникають сили тертя постійного руху, які в два рази менші. Таким чином зменшується вірогідність розриву щойно кристалізованої поверхні.

Попередня оцінка НДС конструкції ГМВМ показала, що найбільш навантаженими її елементами є сталеві мембрани (п. 7в та 7г на рис. 9), які виконують коливання з частотою 0.5 Гц під тиском робочої рідини $p_M = 2$ МПа і мають робочий хід до 0.002 м. Порівняльний аналіз результатів чисельних експериментів (програмні пакети ANSYS та COMSOL) показав незначне відхилення моделювання деформацій та напружень (до 2.5%) в найбільш небезпечних перерізах мембран.

З метою визначення раціональних параметрів мембран проведено дослідження впливу геометрії мембран на їх НДС. Матеріал мембран – сталь 12Х18Н10Т, заданий ресурс роботи – 10^6 циклів навантаження. Для даного матеріалу при відносній деформації $\varepsilon_0 = 2\%$ межа витривалості $\sigma_{-1} = 340$ МПа. Змінними геометричними параметрами мембрани (рис.10) прийнято: товщина мембрани s_M , радіус дуги гофра мембрани R , відстань між віссю мембрани та центром дуги гофра D_M , радіус спряження дуги гофра мембрани з площиною мембрани r_{CM} . Амплітуда коливання $A_M = 0.001$ м.

Розрахунок НДС мембрани проводився методом скінченних елементів з кроком зміни геометричних параметрів 10%. Результати розрахунків дозволили в межах заданого ресурсу роботи мембран отримати область допустимих значень їх геометричних параметрів (рис. 11).

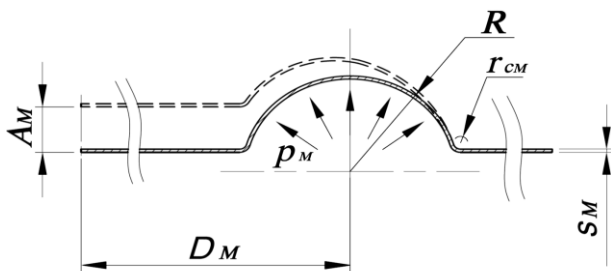


Рис. 10. Принципова схема роботи мембрани

$$\sigma_{max} = 204 \text{ МПа} - 24589 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot s_M + 2038 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot R + 283 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot D_M \leq \sigma_{-1}. \quad (7)$$

Використовуючи отримані залежності та враховуючи додаткові обмеження за геометрією мембран (за сортаментом, габаритами та приєднувальними розмірами), встановлено раціональні геометричні параметри мембран для ГМВМ, які наведені в таблиці.

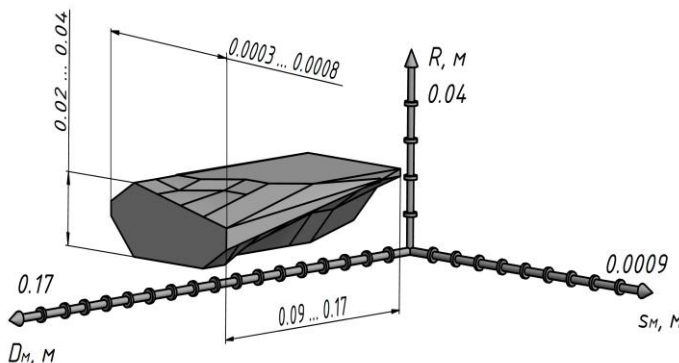


Рис. 11. Область допустимих значень геометричних параметрів мембран

Апроксимація області методом найменших квадратів дозволила аналітично описати залежність (7) між максимальним напруженням σ_{max} та геометричними параметрами мембрани і порівняти його з межею витривалості σ_{-1} . Похибка апроксимації не перевищує 10%.

Таблиця
Раціональні геометричні параметри мембран

Мембрана	s_M , м	R , м	D_M , м
Одногофрова	0.0005	0.02	0.13
Двогофрова, 1-й гофр	0.0005	0.022	0.1
Двогофрова, 2-й гофр	0.0005	0.02	0.16

У п'ятому розділі досліджена робота розробленої механотронної системи керування виплавою титану зі зворотними зв'язками по температурі розплаву в ПЄ та рівню розплаву

в кристалізаторі, яка забезпечує додатково керування механізмом подачі шихти в зону плавки.

Враховуючи, що при повільній подачі шихти в зону плавки з розплаву випаровується більше легуючих домішок алюмінію, для уникнення цього явища була вирішена задача витримки розплаву в необхідному температурному діапазоні протягом певного часу для отримання необхідного хімічного складу сплавів, на основі титану, легованих алюмінієм. Контроль швидкості подачі шихти в зону плавки з використанням відомих рекомендацій по швидкості витягування зливку з кристалізатора та залежності між потужністю обігріву та вмістом алюмінію в сплаві забезпечено механотронною системою керування виплавою титану (рис. 12), яка складається з контуру керування траєкторією руху електронних променів 1, контуру витягування зливку з кристалізатора 2, контуру подачі шихти в зону плавки 3 та вищого рівня автоматичного керування. Також є можливість ручного керування.

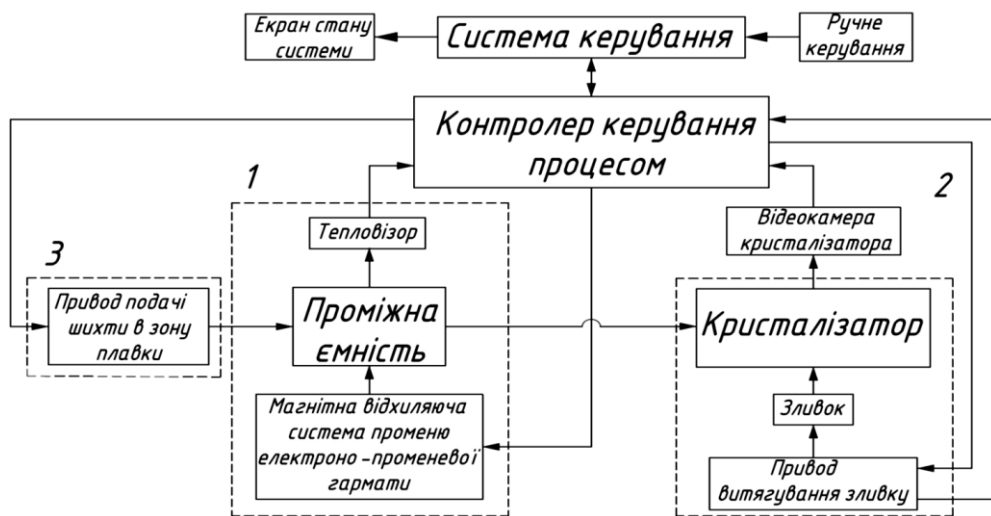


Рис. 12. Схема механотронної системи керування ЕПП

Запропонована механотронна система отримує через блоки керування витягуванням та ЕПП сигнали про тепловий стан розплаву в ПЄ та поточний рівень розплаву в кристалізаторі. Визначається зміна рівня розплаву в кристалізаторі і масова витрата розплаву за середньої температури розплаву, що зливається в кристалізатор, і на основі отриманих даних формується керуючий сигнал на подачу шихти в зону плавки.

Проведено математичне моделювання роботи розробленої механотронної системи керування виплавою титану. Отримано залежність теоретичної зміни маси зливку в часі, яка порівняна з фактичними даними роботи оператора ЕПУ (рис. 13).

Аналіз результатів дослідження показав: що при роботі механотронної системи керування плавкою титану розподіл температур по поверхні ПЄ рівномірний в необхідному діапазоні; включення в розплав з температурою нижче температури плавлення, окрім щойно потрапивших шматків шихти, відсутні; зони перегріву розплаву вище допустимих значень відсутні, за виключенням поточних зон обігріву; розроблена система порівняно з ручним керуванням підвищує на 18% ефективність роботи ЕПУ, при цьому зменшується на 14% енергоспоживання; збільшується на 16% продуктивність виплавки та знижуються втрати маси зливку при обробці поверхні до 7%.

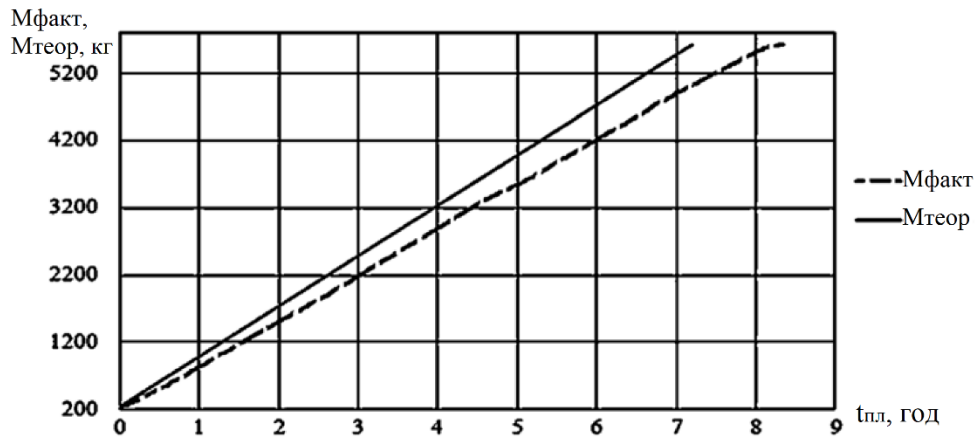


Рис. 13. Залежності зміни маси зливка в часі при роботі оператора ЕПУ ($M_{\text{факт}}$) та запропонованої механотронної системи керування плавкою титану ($M_{\text{теор}}$)

Отримані результати свідчать про ефективність розробленої механотронної системи керування виплавкою титану.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу літературних джерел сучасного стану виплавки тугоплавких металів методом електронно-променевої плавки встановлено, що існуючі технології виплавки титану мають недоліки, пов'язані з низьким рівнем автоматизації та неузгодженістю керування процесами плавки, витягуванням зливку з кристалізатора та подачі шихти в зону плавки. Застосування новітніх комп'ютерних технологій та програмних засобів дозволить розробити нову ефективну механотронну систему керування виплавкою титану, яка узгоджує керування процесами плавки, витягування зливку та подачі шихти, що забезпечить роботу електронно-променевої установки в режимі ресурсо- та енергозбереження при високій якості отримуваної продукції.

2. Запропонована і теоретично обґрунтована принципова схема механотронної системи керування виплавкою титану при електронно-променевій плавці з використанням зворотного зв'язку по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі, яка дозволяє підвищити продуктивність процесу.

3. Розроблено нестационарну тривимірну математичну модель процесу в проміжній ємності та проведено її чисельний розв'язок в програмному пакеті MATLAB із врахуванням впливу зміни джерела нагріву та швидкості течії розплаву в процесі моделювання за заданим законом, що дозволило дослідити вплив технологічних параметрів плавки на тепло-масообмін в проміжній ємності.

4. Отримані аналітичні залежності середньої температури розплаву в проміжній ємності та відношення розплавленого об'єму титану до загального об'єму проміжної ємності від швидкості течії розплаву, потужності обігріву та коефіцієнту розподілу потужності обігріву по поверхні проміжної ємності, що дозволяє оперативно визначати необхідну траєкторію руху електронного променя та швидкість подачі шихти в зону плавки.

5. Досліджена ефективність роботи механотронної системи керування виплавкою титану. Показано, що запропонована система дозволяє знизити вплив людського фактору

на перебіг процесу плавлення, зменшити на 14% енерговитрати та підвищити продуктивність виплавки на 16%, а із врахуванням зменшення втрат на обробку зливку підвищити загальну ефективність процесу на 18%.

6. Розроблено новий алгоритм керування траєкторією руху електронного променя по поверхні проміжної ємності електронно-променевої установки зі зворотним зв'язком по температурі за допомогою тепловізора, який дозволяє рівномірно прогріти титановий розплав в проміжній ємності електронно-променевої установки в температурному діапазоні 1950...2200 К при коефіцієнті розподілу потужності обігріву по поверхні проміжної ємності $n=50\ldots 60\%$, що забезпечує необхідну стабільну витрату титанового розплаву з проміжної ємності в кристалізатор.

7. Запропонована інженерна методика розрахунку мембран гідравлічного мембранного виконавчого механізму на втомну міцність, яка дозволяє здійснити вибір їх раціональних геометричних параметрів в залежності від необхідної амплітуди коливання гідравлічного мембранного виконавчого механізму для заданого ресурсу спрацювань.

8. Запропонований спосіб витягування зливку з кристалізатора з подачею на нього додаткових коливань за заданим законом, що дозволяє здійснювати грубе та точне регулювання рівня розплаву в кристалізаторі, зменшити вірогідність розриву його поверхні та утворення дефектів на готових зливках; очікувати зниження до 7% витрат матеріалу при подальшій обробці зливків.

9. Розроблена нова конструкція гідравлічного мембранного виконавчого механізму двосторонньої дії для подачі додаткових коливань на зливку незалежно від його маси, яка порівняно з гідравлічним циліндром має менші габарити та кращу герметичність.

10. Поставлена в дисертації мета підвищення ефективності процесу виготовлення титанових зливків досягнута, сформульовані задачі вирішені. Практична цінність роботи підтверджена 3 актами впровадження результатів дослідження в практику дослідно-конструкторських робіт проектування систем керування процесом електронно-променевої плавки та 3 актами впровадження результатів дослідження в навчальний процес.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИЕРТАЦІЇ

1. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавкою титану. Постановка задачі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2012. – №1 (35). – С.101–105. *(Здобувачем запропонована принципова схема механотронної системи керування виплавкою титану при електронно-променевої плавці).*

2. Грабовський Г.Г. Система керування витягуванням титанового зливку з кристалізатора при електронно-променевої плавці / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2013. – №2 (40). – С.5–10. *(Здобувачем запропоновано використовувати гідропривід для витягування титанового зливку).*

3. Цибрій Ю.О. Моделювання розподілу температур титанового розплаву з урахуванням його течії / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – №3 (72) – С.65–71. (видання входить до науко-метричних баз даних Google Scholar, РИНЦ, Open Academic Journals Index, CiteFactor). *(Здобувачем проведено моделювання процесів в проміжній ємності).*

4. Tsibriy Iuriy Heat exchange calculation in the intermediate container under electron-beam melting / Iuriy Tsibriy, Heorhiy Grabovskiy // Metallurgical and Mining Industry – 2015. –

№5 – pp. 51 – 60. (видання входить до науко-метричних баз даних Scopus, Index Copernicus, eLibrary, Scientific Indexing Services, UlrichsWEB, Academic Resource Index "ResearchBib", WorldCat, Eurasian Scientific Journal Index). *(Здобувачем розроблена математична модель процесу в проміжній ємності).*

5. 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. *(Здобувачем проведено моделювання роботи запропонованої системи керування).*

6. Цибрій Ю.О. Аналіз напружено-деформованого стану мембрани гідравлічного мембранного механізму приводу витягування з зливку кристалізатора / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський, П.Л. Носко. // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – №3. – С. 108 – 114. (видання входить до науко-метричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, WorldCat, РІНЦ). *(Здобувачем проведено розрахунок на втомну міцність мембрани приводу).*

7. Патент №91877 України. МПК В22D 29/00 F16H 43/00. Система витягування зливка з кристалізатора / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О., Пап П.А., Дереча О.Я.; заявники та правовласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О., Пап П.А., Дереча О.Я. – № 201311382, заявл. 26.09.2013, опубл.25.07.2014, бюл. Бюл. № 14, 2014 р. *(Участь співавторів у створенні корисної моделі рівноцінна).*

8. Патент №91889 України. МПК F16H 43/00. Гідравлічний мембранний виконавчий механізм двосторонньої дії / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О.; заявники та правовласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О. – № 2013 13334, заявл. 15.11.2013, опубл. 25.07.2014, бюл. Бюл.№ 14, 2014 р. *(Участь співавторів у створенні корисної моделі рівноцінна).*

9. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавки титану / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси: Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобилям МНС України, 2012. – С.114–116. *(Здобувачем запропонована механотронна система керування виплавою титану).*

10. Грабовський Г.Г. Система витягування зливку з кристалізатору / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XVIII міжнародної науково-технічної конференції. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – С.98–99. *(Здобувачем приведена класифікація способів витягування титанового зливку).*

11. Грабовський Г.Г. Керування температурою титанового розплаву в проміжній ємності при електронно-променевої 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. *(Здобувачем запропоновано використовувати тепловізор в якості датчика зворотного зв'язку).*

12. Грабовський Г.Г. Моделювання процесу обігріву розплаву титану з урахуванням його течії. Постановка задачі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XIX міжнародної науково-технічної конференції. – Кіровоград, 2014. – С.110–111. *(Здобувачем зроблена постановка задачі моделювання процесу обігріву титанового розплаву).*

13. Цибрій Ю.О. Використання гідравлічних мембранних виконавчих механізмів при витягуванні зливків з кристалізатора плавильної печі / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування. Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція. Збірник тез доповідей. – Вінниця, 2014. – С.58–59. *(Здобувачем зроблено обґрунтування використання мембранних приводів при витягуванні титанових зливків).*

14. Грабовський Г.Г. Механізм витягування зливку з кристалізатора / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка і пневматика. Матеріали конференції. – Мелітополь: Таврійський державний аграрно-технічний університет, 2014. – С.62. *(Здобувачем зроблено опис роботи механізму витягування зливку).*

15. Грабовський Г.Г. Моделювання процесу обігріву розплаву титану з урахуванням його течії. Аналіз результатів моделювання. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XX міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2015. – С.43–45. *(Здобувачем проведено аналіз результатів моделювання процесу обігріву титанового розплаву).*

16. 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. *(Здобувачем розроблені алгоритми керування траєкторією руху електронного променя).*

17. Грабовський Г.Г. Розрахунок на міцність мембрани гідравлічного мембранного механізму / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2016. – С.155–157. *(Здобувачем проведено розрахунок на міцність мембрани приводу).*

18. Грабовський Г.Г. Розрахунок мембрани гідравлічного мембранного механізму на втомну міцність / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // XVII міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». Матеріали конференції. – Харків: Український державний університет залізничного транспорту, 2016. – С.125 – 126. *(Здобувачем зроблена постановка задачі розрахунку на втомну міцність).*

19. Цибрій Ю.О. Розробка мехатронної системи керування електронно-променевою плавкою титану / Ю.О. Цибрій // 13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Матеріали симпозіум. – Львів, 2017. – С. 209–210. *(Здобувачем наведена уточнена принципова схема мехатронної системи керування).*

20. Цибрій Ю.О. Мехатронна система керування плавкою титану із використанням зворотного зв'язку по температурі та по рівню розплаву в кристалізаторі / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXII міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси, 2017. – С.114 – 115. *(Здобувачем запропоновано використовувати в системі керування два зворотні зв'язки).*

АНОТАЦІЯ

Цибрій Ю.О. Мехатронна система керування виплавкою титану. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – Машинознавство. – Національний технічний університет

України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності процесу виготовлення титанових зливків при електронно-променевої плавці, що забезпечує збільшення продуктивності виплавки, покращення якісних характеристик зливків за рахунок узгодження взаємодії виконавчих пристроїв шляхом створення механотронної системи керування виплавою титану зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі.

Розроблено нестационарну тривимірну математичну модель процесу в проміжній ємності електронно-променевої установки, в якій враховано зміну джерела нагріву та швидкості течії розплаву. Досліджено вплив швидкості течії розплаву, потужності обігріву та коефіцієнту розподілу по поверхні проміжної ємності на середню температуру розплавленого титану. За результатами моделювання запропоновано метод керування траєкторією руху електронного променя зі зворотним зв'язком по температурі розплаву, що забезпечує зменшення часу виплавки титанового зливку.

Розроблено спосіб витягування зливку з кристалізатора з подачею додаткових коливань на зливку за допомогою гідравлічного мембранного виконавчого механізму. Досліджено вплив значень геометричних параметрів сталевий мембрани виконавчого механізму на її напружено-деформований стан та ресурс спрацювання. Отримано аналітичну залежність максимального напруження в сталевій мембрані від її геометрії в процесі подачі коливань. Запропоновано інженерну методику вибору раціональних геометричних параметрів гідравлічного мембранного виконавчого механізму.

Використання запропонованої механотронної системи зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності і по рівню розплаву в кристалізаторі, у порівнянні з аналогічними показниками установки типу ВМО, дозволяє зменшити на 14% енерговитрати та підвищити продуктивність виплавки на 16%, а із врахуванням зменшення втрат на обробку титанового зливку підвищити загальну продуктивність процесу на 18%.

Ключові слова: механотронна система, виплавка титану, гідравлічний мембранний механізм, проміжна ємність, алгоритм керування.

АННОТАЦІЯ

Цибрий Ю.А. Механотронная система управления выплавкой титана. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 – Машиноведение. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена повышению эффективности процесса изготовления титановых слитков при электронно-лучевой плавке, что обеспечивает увеличение производительности выплавки, улучшение качественных характеристик слитков за счет согласования взаимодействия исполнительных устройств путем создания механотронной

системы управления выплавкой титана с обратной связью по температуре расплава в промежуточной емкости и по уровню расплава в кристаллизаторе.

Разработано нестационарную трехмерную математическую модель процесса в промежуточной емкости электронно-лучевой установки, в которой учтены изменения источника нагрева и скорости течения расплава. Исследовано влияние скорости течения расплава, мощности обогрева и коэффициента распределения по поверхности промежуточной емкости на среднюю температуру расплавленного титана. По результатам моделирования предложен метод управления траекторией движения электронного луча с обратной связью по температуре расплава, который обеспечивает уменьшение времени выплавки титанового слитка.

Разработан способ вытягивания слитка из кристаллизатора с подачей дополнительных колебаний на слиток с помощью гидравлического мембранного исполнительного механизма. Исследовано влияние значений геометрических параметров стальной мембраны исполнительного механизма на ее напряженно-деформированное состояние и ресурс срабатывания. Получена аналитическая зависимость максимального напряжения в стальной мембране от ее геометрии в процессе подачи колебаний. Предложено инженерную методику выбора рациональных геометрических параметров гидравлического мембранного исполнительного механизма.

Использование предложенной механотронной системы с обратной связью по температуре расплава в промежуточной емкости и по уровню расплава в кристаллизаторе, по сравнению с аналогичными показателями установки типа ВМО, позволяет уменьшить на 14% энергозатраты и повысить производительность выплавки на 16%, а с учетом уменьшения потерь на обработку титанового слитка повысить общую производительность процесса на 18%.

Ключевые слова: механотронная система, выплавка титана, гидравлический мембранный механизм, промежуточная емкость, алгоритм управления.

ABSTRACT

Tsibrii I.O. Mechatronic control system for melting titanium. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.02.02 – Engineering Science. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to increasing efficiency of the process of titanium ingot production, which allows increasing productivity of melting and improving quality of ingots based on a mechatronic control system for electron beam melting with feedback on the melt temperature in the intermediate capacity and the melt level in crystallizer.

Literature analysis showed that the main disadvantages of electron beam melting of titanium are high specific energy consumption for charge melting, human factor and low quality of ingot surfaces. These disadvantages are mainly caused by the inconsistency in the control of charge melting process, ingot pulling-out from the crystallizer and charge supply. The purpose of the thesis is the enhancement of these processes and increasing efficiency of the titanium ingots production by developing a mechatronic system for titanium melting control.

It was found that the most unstable element of the mechatronic system is the intermediate capacity where charge falls randomly into the titanium melt, which affects the melt flow into

the crystallizer and ingot pulling-out from it. Based on the coupled Fourier heat-conduction equation and Navier-Stokes equations, a non-stationary three-dimensional mathematical model of the process in the intermediate capacity of an electron-beam unit was developed, which takes into account changes in the heat source coordinates and the melt flow velocity. The simulations were done using the finite-element method and MATLAB software, the finite-difference method and the tridiagonal matrix algorithm. The influence of the velocity of the titanium melt flow, the heating power and its distribution over the intermediate capacity surface on the average temperature of the molten titanium and the ratio of the molten titanium volume to the total volume of the intermediate capacity was investigated. The analytical dependencies were obtained which allow setting the rational parameters of the titanium melt heating during the electron beam melting.

Based on the simulation results, a method for controlling the trajectory of the electron beam motion with feedback on the titanium melt temperature was proposed, which enables reducing the titanium ingot melting time. The simulations of the titanium melt heating in the intermediate capacity were performed due to the proposed control method. It was found that the application of the proposed control method at the coefficient of heat distribution over the intermediate capacity surface equal to $n = 50 \dots 60\%$ provides titanium melt heating within the required temperature range 1950-2200 K and the required stable flow of the titanium melt from the intermediate capacity into the crystallizer.

Heat and mass transfer in the intermediate capacity was simulated for the case of the entry of an unmolten charge piece during the heating with temperature feedback. The average melting time of the charge piece was found to be 16 seconds. On the basis of the proposed method for controlling the electron beam motion trajectory, an algorithm was developed for simultaneous control of several electron beam guns with redistribution of their influence zones on the intermediate capacity surface.

A method of the ingot pulling-out from the crystallizer by applying additional oscillation to the ingot using a hydraulic drive was developed. A design of the hydraulic membrane actuator for applying oscillation to the ingot of any mass was proposed. A mathematical model was proposed to describe stress and strain state of the actuator steel membrane. Using the finite-element method (ANSYS, COMSOL), the influence of the geometric parameters of the steel membrane on its stress and strain state and durability was investigated for a given oscillation amplitude. An analytical expression of the maximum stress in the oscillating steel membrane was derived depending on its geometric parameters. An engineering method was proposed to choose rational geometric parameters of the hydraulic membrane actuator.

As compared to similar parameters of the VMO electron-beam unit, the application of the proposed mechatronic system with feedback on the melt temperature in the intermediate capacity and the melt level in crystallizer allows to reduce the energy consumption by 14%, increase the melting productivity by 16%, and, if taking into account the reduction of losses during the mechanical treatment of titanium ingot surfaces, increase the overall process performance by 18%.

Key words: mechatronic system, titanium melting, hydraulic membrane mechanism, intermediate capacity, control algorithm.