

Г.Г. Грабовський, д-р техн.наук,
ДНВК «Київський інститут автоматики», м. Київ, Україна
Ю.О. Цибрій,
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВИТЯГУВАННЯМ ТИТАНОВОГО ЗЛИВКА З КРИСТАЛІЗАТОРА ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ПЛАВЦІ

На основі аналізу існуючих способів витягування титанового зливка з кристалізатора при електронно-променевої плавці запропоновано нову автоматичну систему, що забезпечує підвищення якості поверхні зливка, надійність та зручність керування технологічним процесом, зменшення габаритів технічного устаткування. Наведено алгоритм керування запропонованою системою витягування зливка з кристалізатора з урахуванням сил тертя зливка в кристалізаторі та власної ваги зливка.

The existing ways of the ingot pulling-out from the crystallizer during the electron beam melting process are considered. Another system of the ingot pulling-out from the crystallizer, taking into account the preliminary analysis, is proposed. The control algorithm of the proposed system of the ingot pulling-out from the crystallizer with regard to the ingot friction forces against the crystallizer and ingot weight is suggested.

Вступ

На даний момент до прогресивних методів виплавки титанових зливків відносять метод електронно-променевої плавки з проміжною ємністю, яка забезпечує необхідний хімічний склад та структуру зливка, не має жорстких вимог по шихтовому матеріалу, а також надає можливість регулювати швидкість перебігу технологічного процесу в значних межах [1,2].

Разом з цим метод електронно-променевої плавки з проміжною ємністю має суттєві недоліки, які полягають у низькому рівні автоматизації процесу, великому розкиді часу наплавлення зливка однакової довжини різними операторами, відсутності систем аналізу розподілу температур розплаву в проміжній ємності електронно-променевої печі, а також у незадовільній якості поверхні зливків [2,3].

Незадовільна якість поверхні зумовлена дискретно-безперервним витягуванням зливка з кристалізатора, а також виникненням додаткових сил сухого тертя зливка по кристалізатору, які можуть призвести до тріщин зливка та розриву його бічної поверхні. У результаті тертя стінки зливка тріскаються (рисунок 1 [4]) і утворюються каверни та поперечні тріщини (гофрована поверхня).

Тому після відливки поверхня зливка потребує додаткової механічної обробки на токарному верстаті, а саме зняття зовнішнього шару дефектного металу завтовшки 20–40 мм.

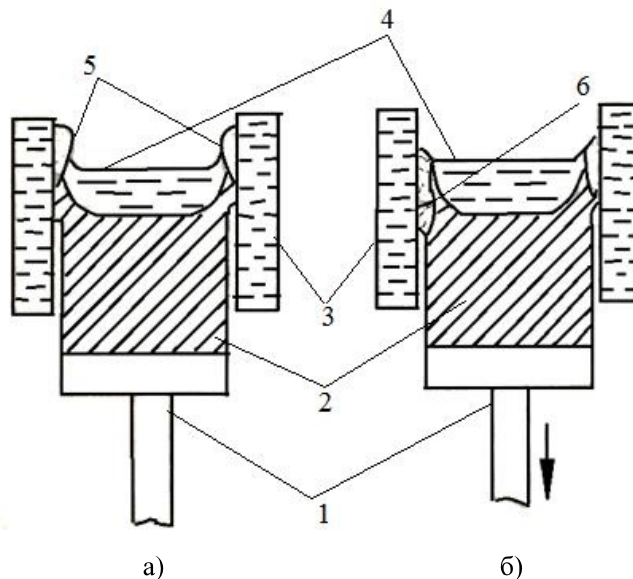


Рисунок 1 – Схема утворення поперечних тріщин при витягуванні зливка з кристалізатора електронно-променевої печі: а — утворення корони над зливком при наплавленні; б — поява тріщин на поверхні зливка при витягуванні; 1 — механізм витягування зливка; 2 — зливко; 3 — кристалізатор; 4 — розплав металу; 5 — корона; 6 — тріщина, що утворена під час витягування.

Як свідчить практика, при плавці на електронно-променевої печі ТІСО-15М з діаметром кристалізатора $d_{кр} = 640$ мм [5], втрата металу при обробці становить 6–17%, при цьому токарна обробка триває до 16 годин [2].

Метою роботи є аналіз існуючих способів витягування зливків з кристалізатора та розробка нової автоматичної системи та алгоритму керування процесом витягуванням зливка з кристалізатора.

Аналіз існуючих способів витягування зливка з кристалізатора

Способи витягування зливка з кристалізатора можна класифікувати за способом руху при витягуванні зливка; за типом привода витягування і за рівнем автоматизації систем витягування зливка з кристалізатора.

На даний час використовують наступні способи руху при витягуванні зливка з кристалізатора:

- у міру наплавлення зливок опускають донизу механізмом витягування у дискретно-безперервному режимі: після підвищення рівня рідкого металу в кристалізаторі на 10–15 мм відносно встановленого рівня зливок опускають з лінійною швидкістю $(2-3) \cdot 10^{-4}$ м/с до тих пір, поки ванна не опуститься до колишнього рівня [1];

- у міру наплавлення зливок переміщують на невелику відстань доверху, а потім опускають донизу механізмом витягування у дискретно-безперервному режимі аналогічно попередньому методу [6];

- після зливу порції розплаву з проміжної ємності в кристалізаторі припиняють дію електронних променів, які обігрівають поверхню зливка в області контакту з кристалізатором, зливок витягують на половину висоти порції, поновлюють обігрівання поверхні зливка в області контакту з кристалізатором, а перед наступним зливом зливок витягують на наступну половину висоти порції [7];

- у міру наплавлення зливок опускають донизу механізмом витягування у безперервному режимі [8];

- у міру наплавлення зливок опускають донизу механізмом витягування у безперервному режимі і додатково подають на злинок коливання, в результаті чого поверхня зливка сприймає менші сили тертя по кристалізатору [4].

Кожний з вищенаведених способів руху має свої переваги та недоліки.

Наприклад, способи з дискретно-безперервним рухом легко реалізувати за допомогою зубчастої та гвинтової передачі чи гідроциліндра. Але протягом такого типу руху зливок на значний час зупиняється, розплав починає кристалізуватися на поверхні кристалізатора, але при цьому новоутворена поверхня сприймає додаткові сили тертя і при різкому початку витягування зливка руйнується з утворенням дефектів поверхні, так званих «гофрів».

При постійному витягуванні зливка сили тертя його поверхні по кристалізатору значно менші, але такий спосіб руху досить важко забезпечити, оскільки швидкість руху залежатиме від витрати розплавленого металу в кристалізатор. Так, наприклад, для наплавлення зливка діаметром $d_{кр} = 640$ мм, довжиною $l_{зл} = 1600$ мм, на про-

мислової електронно-променевої печі ТІСО-15М необхідно часу мінімум $t_{\min} = 235$ хв [2].

Отже швидкість переміщення зливка при постійному русі дорівнює:

$$V_{\max} = l_{зл} / t_{\min} = 1600 / 235 \approx 6,8 \text{ мм/хв.} \quad (1)$$

А таку швидкість і меншу забезпечити досить важко. Тому безперервне витягування використовують тільки при плавці зливоків з невеликою площею поперечного перерізу і при великій витраті розплаву з проміжної ємності в кристалізатор.

Спосіб безперервного руху з додатковим накладанням коливань є найбільш перспективним і дієвим, оскільки поверхня зливка сприймає незначні сили тертя, але його використання має ті самі обмеження, що і для способу безперервного витягування зливка з кристалізатора.

У якості приводів витягування зливка з кристалізатора використовують редуктор, який приводить в рух два гвинти з рухомою платформою [1, 9], гідравлічний циліндр [10], а також гідравлічний циліндр з планетарною рейковою передачею [11].

Використання редуктора, який приводить в рух два гвинти з рухомою платформою є найбільш поширеним рішенням [1, 9], оскільки за допомогою такого типу привода можна виплавляти зливки значної довжини (до 4 м [12]). Але у такому випадку початок руху при витягуванні буде дуже різким і сили тертя зливка по кристалізатору в початковий момент будуть у 2–2,5 рази більше, ніж потім при стаціонарному русі [13]. Результатом різкого початку витягування будуть розриви на поверхні зливка та гофрована поверхня.

Використання гідравлічного циліндра в якості привода для витягування зливка з кристалізатора [10] забезпечує більш плавний початок руху при витягуванні, можливість регулювання швидкості витягування зливка в широкому діапазоні. Але використання гідравлічного циліндра має обмеження, що пов'язано з довжиною зливка, оскільки довжина гідравлічного циліндра у витягнутому положенні приблизно у 2 рази більша довжини зливка. Крім цього, до ущільнень гідравлічного циліндра приймаються жорсткі вимоги, оскільки він працює в середовищі з підвищеними температурами.

При використанні гідравлічного циліндра з планетарною рейковою передачею [11] обмеження по габаритам зливка зменшено, оскільки при переміщенні гідроциліндра рухомий блок зубчастих коліс перекочується у той самий бік, але з більшою швидкістю, що забезпечує підйому зі зливком більше переміщення, ніж штоку гідроциліндра. Але при такому технічному рішенні залишаються жорсткі вимоги до ущільнень гідроциліндра, а також можливість утворення люфту в планетарній передачі, що призведе до неузгодженості у роботі гідроциліндра з планетарною рейковою передачею.

У якості систем витягування зливка з кристалізатора використовують системи:

- в яких оператор самостійно подає сигнали на механізм витягування [1];

- в яких коливання та переміщення зливка надається за допомогою програмних механізмів коливального та

поступального руху з використанням найпростіших систем зі зворотнім зв'язком [14];

- в яких використовується комп'ютерна телевізійна система контролю та стабілізації рівня розплаву [9].

Найпростіший спосіб витягування зливка на електронно-променевих печах виконується безпосередньо оператором. Він подає керуючий сигнал на електродвигун, який передає крутний момент на редуктор, а потім на гвинтову передачу, що у свою чергу переміщує зливков донизу. Оператор періодично, коли рівень розплавленого металу досягає деякої верхньої межі, подає сигнал на переміщення механізму витягування. Воно припиняється, коли рівень металу досягав бажаного нижнього рівня. Недоліком такого методу є те, що оператору необхідно приймати суб'єктивне рішення щодо верхнього і нижнього рівнів, причому відстань між верхнім та нижнім рівнями коливається у межах 10–20 мм.

Використання програмних механізмів коливального та поступального руху не завжди забезпечує необхідну точність через знос механізмів, які забезпечують зворотній зв'язок [14].

Електронно-променеві установки з комп'ютерною телевізійною системою контролю та стабілізації рівня рідкої металеві ванни забезпечують найкращі умови для роботи оператора [9].

Контроль рівня рідкого металу зводиться до визначення межі розділу між світлою поверхнею рідкого металу і темною стінкою кристалізатора. Спостереження

ведеться через оглядове вікно за допомогою встановленої зовні плавильної камери відеокамери. Для оберігання від запилення скла оглядового вікна застосовано стробоскопічну систему. Це диск з вузькими прорізами, який обертається з великою швидкістю. Сформований відеокамерою відеосигнал надходить на пристрій відео-захоплення промислового комп'ютера. Пристрій відео-захоплення виконує захоплення кадру, оцифровує відеосигнал і передає його на комп'ютер. Комп'ютер виділяє з кадру зону інтересу, в якій міститься корисна інформація, фільтрує зображення від перешкод, створює бінарне зображення ванни розплавленого металу, використовуючи відсікання по порозу яскравості, виділяє кордон ванни, розраховує відстань поверхні ванни від верхнього зрізу кристалізатора, відображає всю поточну інформацію на екрані монітора і записує її в сформовані пристроєм зв'язку з об'єктом сигнали, що надходять на пристрій керування, сигналізації і контролер привода витягування зливка.

Розробка нової автоматичної системи керування витягуванням

На основі аналізу існуючих способів витягування зливка з кристалізатора (за способом руху, за типом привода, за рівнем автоматизації систем) запропоновано нову автоматичну систему керування витягуванням зливка з кристалізатора при електронно-променевій плавці (рисунки 2).

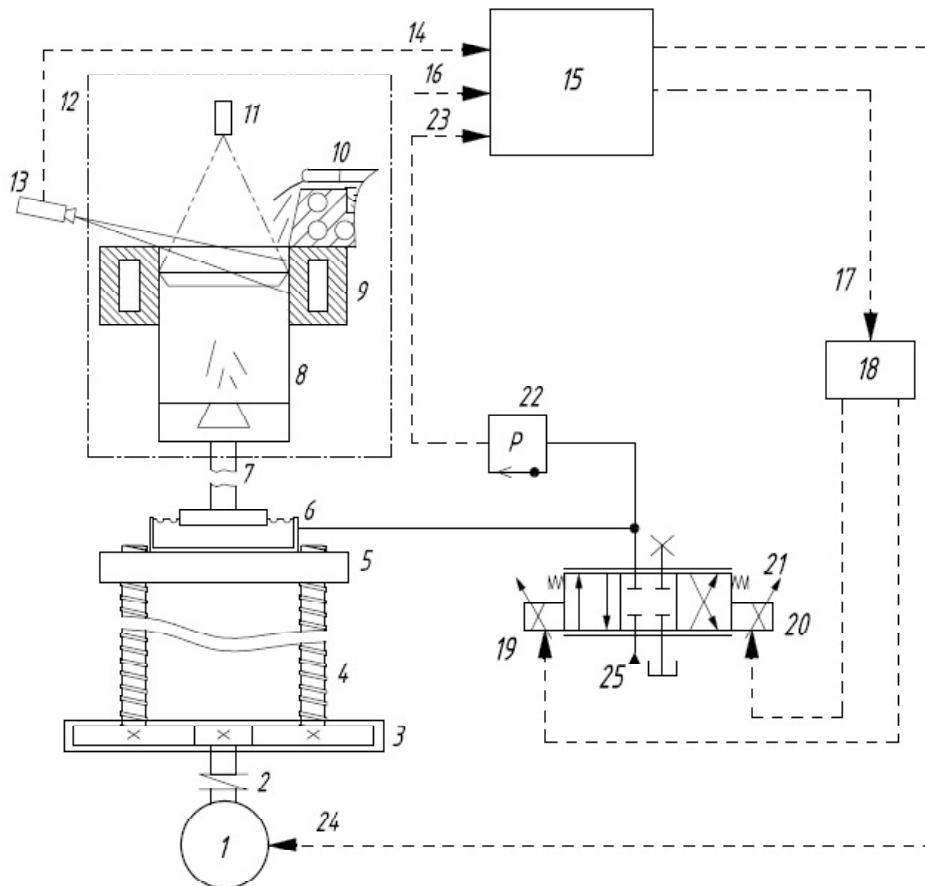


Рисунок 2 — система витягування зливка з кристалізатора при електронно-променевій плавці.

Система керування витягуванням зливка з кристалізатора при електронно-променевої плавці складається з електродвигуна 1, з'єданого через муфту 2 з редуктором 3, два вихідні вали якого є гвинтами 4, що з'єдані з рухомою платформою 5, на якій встановлено гідравлічний мембранний виконавчий механізм (ГМВМ) 6. Він передає плавні коливання через шток 7 на зливочок 8, який витягується з кристалізатора 9. Розплавлений метал зливається з проміжної ємності 10 до кристалізатора, де обігривається електронно-променевою гарматою 11. Його рівень у кристалізаторі фіксується відеокамерою 13, яка знаходиться поза плавильною камерою 12. Сигнал 14 від відеокамери та від оператора 16 надходить на керуючий обчислювальний пристрій 15 на базі промислового комп'ютера. З керуючого обчислювального пристрою надходить сигнал 17 на блок керування гідравлікою 18, з якого подаються сигнали 19 і 20 на пропорційний гідравлічний розподільник 21, який подає робочу рідину з напірної лінії 25 насосної станції на ГМВМ, і сигнал 24 на вмикання електродвигуна. До лінії, що з'єднує пропорційний гідравлічний розподільник з ГМВМ, паралельно приєднано перетворювач тиску в електричний сигнал 22, який передає сигнал 23 на керуючий обчислювальний пристрій.

Автоматична система керування витягуванням зливка з кристалізатора порівняно з існуючими має наступні переваги:

1. ГМВМ з пропорційним гідравлічним розподільником забезпечує плавні коливальні рухи та витягування зливка при практично відсутніх витках масла через з'єднання з гідравлічною лінією, має незначні розміри, а переміщення зливка узгоджується з рухом ГМВМ і циліндричного редуктора з гвинтовою передачею за допомогою алгоритму, наведеного нижче.

2. Наявність відеокамери, яка контролює рівень розплаву металу в кристалізаторі, виключає прийняття суб'єктивних рішень оператором щодо мінімального та максимального рівня розплаву.

3. Застосування керуючого обчислювального пристрою на базі промислового комп'ютера підвищує якість та зручність обслуговування електронно-променевої печі та надійність перебігу технологічного процесу в цілому.

Урахування сил тертя зливка по кристалізатору та його власної ваги

У роботі [13] при витягуванні зливка з кристалізатора розрізняють зусилля, яке виникає в початковий період витягування зливка P , і зусилля тертя зливка по стінці кристалізатора F .

Оскільки протягом роботи запропонованої системи керування витягуванням зливок увесь час виконуватиметься зворотно-поступальний рух в осьовому напрямку, то зусилля, яке виникає в початковий період витягування P не виникатиме. Зливочок тільки сприйматиме зусилля тертя зливка по стінці кристалізатора F .

У роботі [13] сила F розраховується за наступною формулою

$$F=0,5d_{кр} - 10 \tag{2}$$

де $d_{кр}$ — в сантиметрах, F — у кілоньютонах.

Вага зливка змінюватиметься протягом плавки і визначиться як

$$G_{зл} = \frac{\pi d_{кр}^2}{4} \cdot \rho g l, \tag{3}$$

де ρ — густина розплаву, $кг/м^3$; g — прискорення вільного падіння, $м/с^2$; l — висота наплавленого зливка, яка змінюється під час плавки $l=f(t)$, $м$, $G_{зл}$ — вага зливка, $Н$.

Для системи керування більш доцільним є використання параметра необхідного тиску p_n для подолання сил тертя по кристалізатору, ваги зливка та зусилля, що забезпечує потрібну деформацію мембрани, а отже, і переміщення зливка.

Необхідний тиск розраховуватиметься як

$$p_n = \frac{4 \cdot (F + G_{зл} + G_{рух})}{\pi d_{шт}^2} + p_{деф} \tag{4}$$

де $G_{рух}$ — вага рухомих частин системи (штока, затравки), $Н$, $d_{шт}$ — діаметр штока 7 (рисунок 2), $м$, $p_{деф}$ — тиск, що забезпечує потрібну деформацію мембрани, $Па$, F і $G_{зл}$ — сили тертя, $Н$; p_n — необхідний тиск, $Н$.

Алгоритм системи керування витягуванням зливка з кристалізатора

Алгоритм роботи системи показано на рисунку 3. У початковий момент плавки тиск у ГМВМ 6 є мінімальним, мембрана має нульову деформацію і знаходиться у початковому положенні. Датчик тиску 22 фіксує тиск у гідравлічній системі, і якщо він менше необхідного тиску p_n , керуючий обчислювальний пристрій 15 подає сигнали 19 і 20 на перемикач електромагнітів ($u_{19} = u_3$, $u_{20} = 0$ відповідно для сигналів 19 і 20; u_3 — задана напруга на електромагніті) на електромагніти пропорційного гідравлічного розподільника 21 і одночасно подається сигнал 24 (напруга на вмикання електродвигуна 1 $U_e = U$). У результаті подачі сигналів робоча рідина з насосної станції (на рисунку не показана) по напірній лінії 25 почне надходити до камери ГМВМ, і мембрана деформується, переміщуючи шток 7 зі зливком 8 доверху, поки тиск у камері не досягне значення p_n . Водночас електродвигун через муфту 2 передасть крутний момент на редуктор 3 з гвинтовою передачею 4, і рухома платформа 5 почне рухатися з ГМВМ і зливком донизу. Сигнал 14 з камери контролю рівня розплаву в кристалізаторі 13 весь час передається на керуючий обчислювальний пристрій. При досягненні розплавом максимального допустимого рівня в кристалізаторі $h=h_{max}$ напруга з електродвигуна знімається ($U_e = 0$).

Після зупинки електродвигуна подаються сигнали на електромагніти пропорційного розподільника ($u_{19} = 0$, $u_{20} = u_3$), камера ГМВМ з'єднується зі зливком, і робоча рідина під дією ваги зливка та елементів системи на мембрану спливатиме до зливочної лінії. Шток зі зливком переміщуються донизу. Коли рівень розплаву знизиться до мінімального допустимого $h = h_{min}$, сигнал 14 надходить з камери контролю рівня розплаву в кристалізаторі на

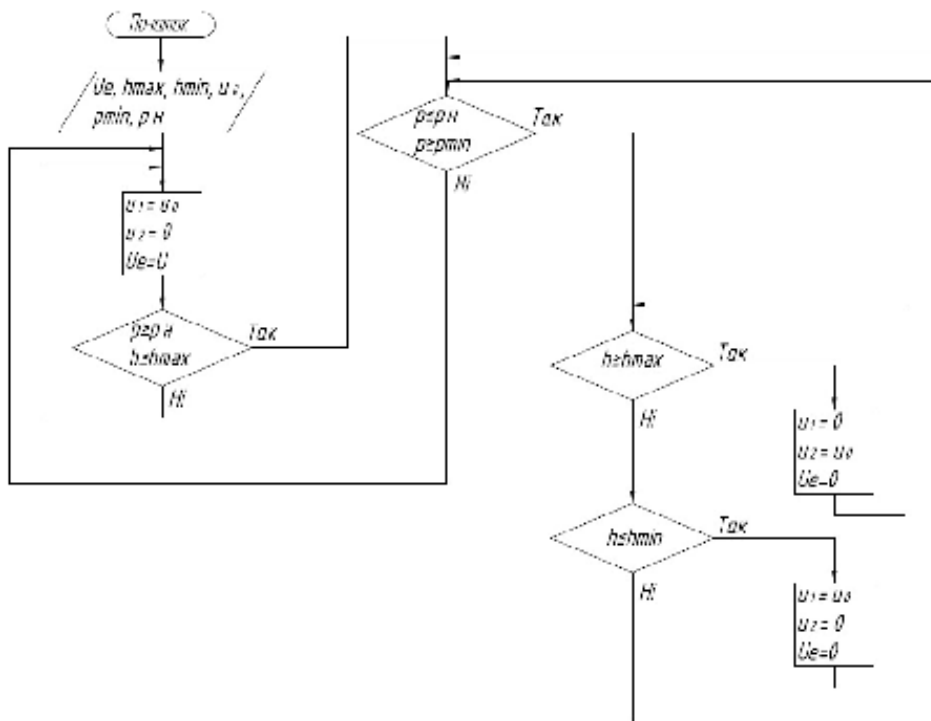


Рисунок 3 — Схема алгоритму роботи системи керування витягуванням зливку з кристалізатора

керуючий обчислювальний пристрій, а з керуючого обчислювального пристрою на пропорційний гідравлічний розподільник подаються сигнали 19 і 20 на підйом зливка ($u_{19} = u_3, u_{20} = 0$). Робоча рідина надходить до камери ГМВМ і мембрана знову деформується, переміщуючи шток зі зливком доверху до рівня $h = h_{max}$, після чого весь цикл коливання повторюється, поки $p_{min} \leq p \leq p_n$.

Коли тиск знизиться до p_{min} і нижче при $h > h_{min}$, то це означатиме, що деформація мембрани відсутня і вона знаходиться у початковому положенні. Після цього весь процес повторюється. Для стабільної роботи системи витягування зливка з кристалізатора необхідно, щоб хід мембрани S_m був більшим амплітуди коливань A , тобто $S_m > A = h > h_{min}$.

Запропонована система керування витягуванням зливка з кристалізатора забезпечує кращу якість поверхні отримуваних зливків за рахунок зменшення сил тертя між зливком та кристалізатором і зменшення руйнування тонкої поверхні зливка при русі протягом кристалізації за рахунок постійного зворотно-поступального руху зливка в осьовому напрямку в кристалізаторі. Також система зменшує габарити технічного устаткування для витягування зливка з кристалізатора.

Висновки

1. Проведено аналіз існуючих способів витягування зливка з кристалізатора при електронно-променевої плавці за способом руху, за типом привода, за рівнем автоматизації систем витягування зливка.
2. Запропоновано нову автоматичну систему керування витягуванням зливка з кристалізатора, в якій спосіб витягування зливка з кристалізатора є коливальним, тип

привода — поєднання редуктора, гвинтової передачі з гідравлічним мембранним виконавчим механізмом, в якості елементів автоматизації використано керуючий обчислювальний пристрій на базі промислового комп'ютера та комп'ютерна телевізійна система контролю та стабілізації рівня рідкої металеві ванни.

Застосування автоматичної системи дозволить підвищити якість поверхні зливка, надійність та зручність керування технологічним процесом, зменшити габарити технічного устаткування.

Література

1. Електронно-лучевая плавка титана / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук. — К.: Наукова думка, 2006. — 248 с.
2. Грабовський, Г.Г. Механотронна система керування плавкою титану / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка і пневматика. — 2013. — № 2. — С. 101—105.
3. Грабовський, Г.Г. Механотронна система керування плавкою титану. Постановка задачі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці". — Черкаси. — 2012. — С.114—116.
4. Петров, А.К. Получение слитков электроннолучевого перепада с качественной поверхностью / А.К. Петров, Б.А. Мовчан, О.Ф. Антропов, А.И. Сапко // Проблемы специальной металлургии (Сборник статей) — К.: Наукова думка, 1975. — С. 66—69.
5. Костенко, В.И. Реконструкция электронно-лучевой установки ТИСО-15М / В.И. Костенко, П.А. Пап, А.Н. Кали-

нюк, Д.В. Ковальчук, Н.П. Кондратий, В.Б. Чернявский// Современная электрометаллургия. — 2007. — №3. — С.24—25.

6. Добаткин, В.И. Слитки титановых сплавов / В.И. Добаткин, Н.Ф. Аношкин, Л.Л. Андреев. — М.: Metallurgia, 1966. — 286 с.

7. Пат. 75790 України, МПК С 21 С 56. Спосіб одержання зливків титанових сплавів з застосуванням дво-стадійного витягування / Березос В.О., Жук Г.В., Тригуб М.П., Северин А.Ю., Варич І.Ю.; заявник та правовласник Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України. — №20040706322; заявл. 29.07.2004; опубл. 15.05.2006, Бюл. №5, 2006.

8. Андреев, А.Л. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов / А.Л. Андреев, Н.Ф. Аношкин и др. — М.: Metallurgia, 1994. — 367 с.

9. Соловьев, В.Г. Контроль и стабилизация уровня жидкого металла в кристаллизаторе при электронно-лучевой плавке / В.Г. Соловьев, Ю.Н. Ланкин // Современная электрометаллургия. — 2009. — № 1. — С. 22—27.

10. А.с. 836126 СССР, МКл С 21 С5/56, F 27 D 3/00. Механизм вытягивания слитка из кристаллизатора / А.Т.

Кормич, В.Г. Дворник, В.Р. Бермант — 2821425/22-02; заявл. 24.09.1979.; опубл. 07.06.1981, Бюл. №21, 1981.

11. А.с. № 423561 СССР, МКл В 22 D 11/12. Устройство для вытягивания слитка из кристаллизатора / Вальце. О.А., Быков С.Г.; — 1805883/22-2; заявл. 05.07.1972; опубл. 15.04.1974, Бюл. № 14, 1974.

12. Дереча, А.Я. Производство титановых слитков и слябов способом ЭЛП на установках, разработанных в МК “Антарес” / А.Я. Дереча, О.Е. Собко-Нестерук, С.А. Сухин // Проблемы специальной электрометаллургии — 2010. — №1. — С. 15—19.

13. Римен, В.Х. Усилия вытягивания крупных слитков из кристаллизатора при электронно-лучевом переплаве / В.Х. Римен, Г.Г. Галентовский // Специальная электрометаллургия — 1982. — № 49. — С.73—76.

14. А.с. 583175 СССР, МКл С21 С56. Устройство для вытягивания слитка из кристаллизатора / Спако А.И., Жук А.Я., Расюк В.И.; заявитель Запорожский индустриальный институт. — 2155263/22-02; заявл. 15.07.1975.; опубл. 05.12.1977, Бюл. №45, 1977.

Надійшла 4.04.2013 року