

Г.Г. Грабовський, д-р техн. наук
НВК «Київський інститут автоматички»,
Ю.О. Цибрій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

МЕХАТРОННА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПЛАВКОЮ ТИТАНУ

Розглянуто метод отримання злитків титану за допомогою електронно-променевої плавки (ЕПП). Виявлено та проаналізовано недоліки методу. Запропоновано функціональну схему дворівневої мехатронної системи керування, яка дозволяє значно вдосконалити технологічний процес ЕПП.

A method of producing titanium ingots on the basis of electron beam melting (EBM) is considered. The disadvantages of the method are identified and analyzed. The functional scheme of two-level mechatronic control system that allows to develop essentially the process of EBM is proposed.

Вступ

Розвиток сучасної техніки значною мірою залежить від застосування у виробі машинобудування нових металевих матеріалів, що мають високу питому міцність у широкому температурному діапазоні експлуатації, стійкість при роботі в агресивних середовищах, немагнітність і низку інших спеціальних властивостей. До таких матеріалів відносяться титан і сплави на його основі [1].

Широке застосування титан отримав у авіації, ракетобудуванні, хімічному і нафтовому машинобудуванні та інших галузях техніки, зокрема тому, що для інтервалу температур 300–600°C сплави титану мають найвище значення питомої міцності серед конструкційних матеріалів.

Крім того, широке застосування сплавів титану в майбутньому зумовлене порівняно великим його вмістом у земній корі (0,6%).

У зв'язку з високою хімічною активністю титану при підвищених температурах атмосфери (особливо у розплавленому стані до газів) плавка титану можлива тільки у вакуумі або у середовищі інертних газів.

У даний час промислове виробництво титанових сплавів здійснюється переважно дуговою плавкою у вакуумно-дугових печах (ВДП) [1]. Основною перевагою цього методу є високі економічні показники, обумовлені відносно низьким енергоспоживанням. Але такий метод має низку техніко-технологічних недоліків:

- можливість пошкодження кристалізатора у результаті нестабільності дуги;
- необхідність пресування електрода на вертикальних пресах з великим зусиллям (~100 000 кН) [2];
- необхідність у двох- чи триразових переплавках початкової заготовки для отримання титану необхідної чистоти та однорідності хімічного складу.

Останнім часом промислове застосування отримують інші методи виплавки титанових злитків, які дозволяють уникнути вказаних вище недоліків. До таких методів

належать: плазменно-дугова, електронно-променева, дугова гарнісажна плавки та ін. Причому найперспективнішим є процес електронно-променевої плавки титану (ЕПП), оскільки він забезпечує найбільш високу якість металу злитків [1].

Метою роботи є дослідження існуючих переваг та недоліків методу ЕПП і розробка функціональної схеми мехатронної системи керування плавкою титану, реалізація якої дозволить подолати недоліки методу.

Опис технології ЕПП

Фізичною основою процесу ЕПП є перетворення кінетичної енергії електронів, що їх розігнано у електричному полі до швидкостей 104–105 м/с, у теплову при їх гальмуванні у поверхневому шарі металу. В тонкому поверхневому шарі кінетична енергія електронів дисипується у коливальний рух іонів кристалічної решітки, що проявляється у підвищенні температури металу. Потік прискорених вільних електронів (електронний промінь) для реалізації цього процесу отримують через електронно-променеві гармати (ЕПГ).

У даний час найбільш поширеною є технологічна схема ЕПП з проміжною ємністю (рисунок 1), що дозволяє практично повністю розділити процеси плавлення та рафінування у проміжній ємності, а також затвердіння металу в кристалізаторі.

Процес плавки потребує вакууму $1,33 \cdot 10^{-2}$ – $6,66 \cdot 10^{-3}$ і відбувається наступним чином: шихта 1 подається механізмом подачі 2 у проміжну ємність 3, де вона плавиться електронно-променевою гарматою 4. Розплавлений метал поступово зливається з проміжної ємності до кристалізатора 5, над яким розташовано електронно-променеву гармату 6, що обігріває вільну поверхню металу у кристалізаторі для уникнення поверхневого натягу. Після кристалізації злиток 7 опускається донизу механізмом витягування 8 з певним кроком.

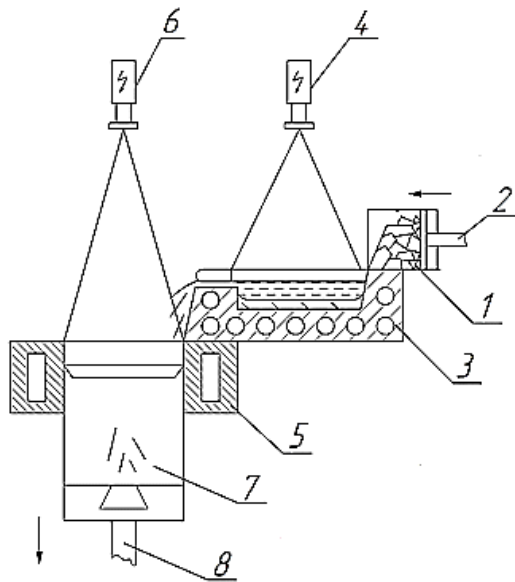


Рисунок 1 — Схема ЕПП з проміжною ємністю.

До переваг ЕПП слід віднести високу ефективність рафінування, обумовлену високим вакуумом у камері електронно-променевої установки; високу концентрацію енергії електронного променя, що забезпечує перегрів поверхні металеві ванни вище температури плавлення металу і позитивно впливає на кінетику реакцій рафінування; можливість у широких межах регулювати швидкість плавлення злитка і, відповідно, тривалість перебування металу в рідкому перегрітому стані, а це дозволяє позбавитися від більшої кількості небажаних домішок.

Крім того, при ЕПП на відміну від ВДП практично відсутні вимоги до механічної міцності витраченої заготовки, не потрібно попередньо пресувати шихту в витрачуваний електрод, і в якості вихідного шихтового матеріалу можна використовувати як суцільний електрод, так і кускові заготовки, стружку, губку і т.п., причому кількість відходів, що використовуються у шихті, може досягати 100%.

Задачі, що виникають протягом процесу ЕПП

На основі огляду літератури та проведених експериментальних дослідів було виділено три основні задачі, які потребують подальшого детального розгляду для забезпечення більшої ефективності процесу ЕПП. Вони полягають в оптимізації процесів подачі шихти, витягування злитку та керування електронно-променевими гарматами.

Задача оптимізації подачі шихти. Подача шихти до зони плавки здійснюється гідроліфтом у ручному режимі оператором у залежності від його спостережень за процесом плавки, професійного досвіду та суб'єктивної думки.

У випадку помилки оператора, що призвела до збільшення швидкості подачі шихти у зону плавки, метал не встигатиме прогрітись до температури, необхідної для виділення з розплаву шкідливих домішок, а у найгіршому випадку шихта може не повністю розплавитись і її шматки з проміжною ємністю потраплять у кристалізатор, що призведе до неоднорідності структури злитку та наявності у ньому концентраторів напруження.

У випадку зменшення швидкості подачі шихти метал у проміжній ємності перегріватиметься, що призведе до інтенсивного випаровування титану з поверхні розплаву, його місцевого кипіння, а найголовніше до не ефективного використання потужностей ЕПП.

Задача оптимізації витягування злитку з кристалізатора. У перші роки плавки на електронно-променевих печах витягування злитку з кристалізатора здійснювалося гідроліфтом у ручному режимі. Оператор періодично, при досягненні рівня розплавленого металу верхньої межі, подавав сигнал на переміщення механізму витягування. Витягування припинялось, коли рівень металу досягав бажаного нижнього рівня [3]. Недоліком такого методу було те, що оператору необхідно було приймати суб'єктивне рішення про верхній і нижній рівні, а також те, що відстань між верхнім та нижнім рівнями коливалась у межах 10–20 мм.

На даний момент використовується комп'ютерна телевізійна система контролю та стабілізації рівня рідкого металу в ванні при ЕПП. Контроль рівня рідкого металу зводиться до визначення межі розділу поверхнею рідкого металу, що світиться, і темною стінкою кристалізатора. Спостереження ведеться через оглядове вікно за допомогою встановленої зовні відеокамери. Сформований відеокамерою відеосигнал надходить на пристрій відеозахоплення промислового комп'ютера. Комп'ютер виділяє кордон ванни, розраховує відстань поверхні ванни від верхнього зрізу кристалізатора. Керуючі сигнали комп'ютера через паралельний порт надходять на контролер приводу витягування злитка.

Недоліком двох вищенаведених методів є безперервно-дискретний тип витягування злитку, через що він формується пластинами і на циліндричній поверхні утворюються нерівності — так звана «гофрована поверхня» (рисунок 2).

Тому після відливки злитку його поверхню потребує додаткової механічної обробки на токарному верстаті, а саме зняття зовнішнього шару дефектного металу завтовшки 10–30 мм. Як приклад для злитку діаметром 650 мм втрата металу при токарній обробці складатиме 6–17%, а у деяких випадках ще більше. Крім того, на поверхні злитку утворюються раковини, які підлягають подальшій обробці ручним інструментом.

Задача оптимізації керування ЕПП. У сучасних електронно-променевих печах кількість ЕПП складає від 4 до 7 у залежності від виходу металу за одиницю часу. Керування роботою ЕПП включає у себе: регулювання потужності кожної з ЕПП за рахунок зміни подачі водню в камеру ЕПП, а також завдання програми траєкторії променя з декількох стандартних програм керування для кожної ЕПП.

Тобто увесь процес керування гарматами залежить тільки від досвіду та суб'єктивного рішення оператора, який спостерігає за плавкою протягом зміни в 8 годин (на зміні працюють два оператори, які заступають одне одного через кожні 2 години). У зв'язку з довготривалістю процесу, оператор сприймає значне фізичне навантаження, в результаті чого з часом він втомлюється, концентрація уваги знижується, що може призвести до помилок у процесі плавки, та як наслідок, до погіршення якості злитку та додаткових витрат.

Нижче показано експериментальні графіки часу виплавки титанових злитків, що були отримані на промисловій установці ТІСО-15М з потужністю 1 МВт (рисунк 3). Експериментальні дані показали, що тривалість процесу виплавки злитків коливалась в межах 252–335 хв, а середня тривалість процесу складала 299 хв.

Мехатронна система керування плавкою титану для процесу ЕПП

У зв'язку з вищесказаним можна зробити висновок, що процес ЕПП необхідно максимально ефективно автоматизувати, щоб виключити людський фактор який такий, що пов'язаний з індивідуальними можливостями оператора.

Отже, необхідно створити автоматизовані системи:

- подачі шихти до камери плавки;
- безперервного витягування злитку з кристалізтора;
- ситуаційного керування ЕПП.

Крім того, необхідно забезпечити взаємозв'язок між вищеперахованими системами.



Рисунок 2 — «Гофрована поверхня» титанового злитку.

На основі вищесказаного пропонується:

- використовувати для керування подачею шихти до зони плавки гідропривод зі зворотним зв'язком (гідроциліндр з електропропорційним керуванням);
- організувати відеоспостереження за процесом плавки на лінії подачі шихти (над проміжною ємністю) з

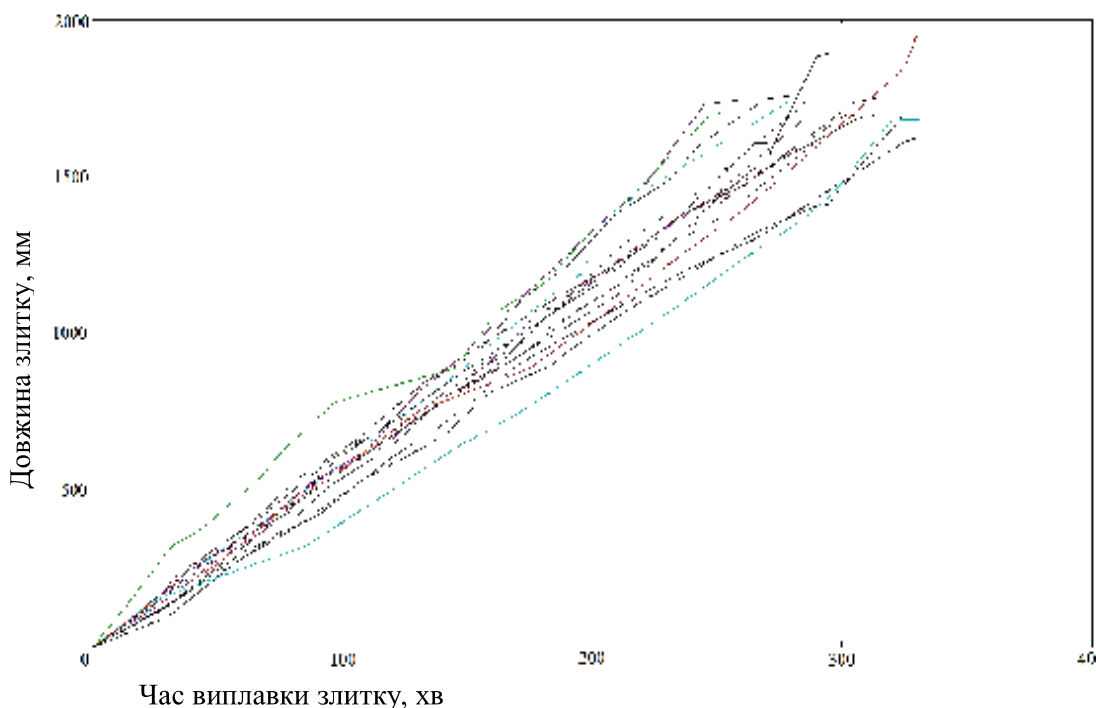


Рисунок 3 — Розкид часу виплавки титанових злитків.

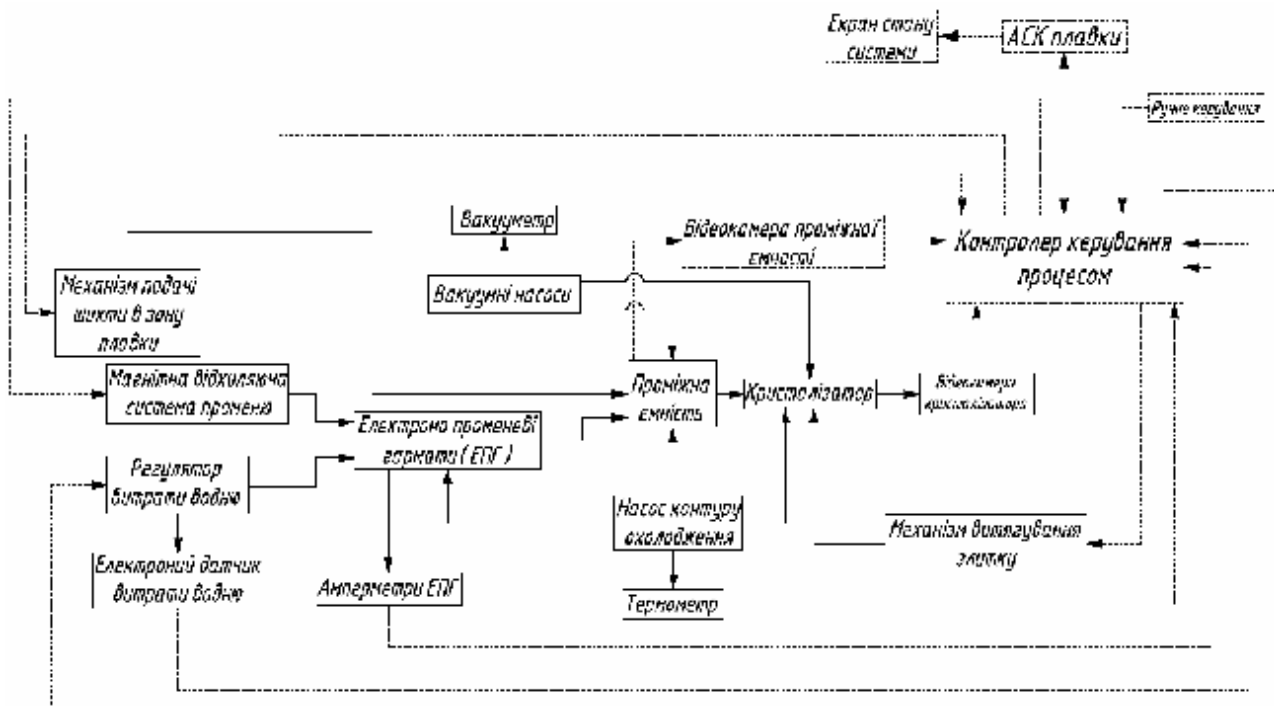


Рисунок 4 — Функціональна схема запропонованої мехатронної системи керування плавкою титану.

використанням системи розпізнавання образів і положення, та на основі відповідних алгоритмів забезпечити автоматичне керування ЕПГ;

- для забезпечення більшої плавності витяжки злитку з кристалізатора використовувати гідропривод з героторним гідромотором та передачею гвинт-гайка;
- на основі спостережень системи розпізнавання образів і положення за процесом плавки розробити відповідні алгоритми керування приводами подачі шихти і механізмом витяжки злитку з кристалізатора відповідно.

З такої метою розроблено функціональну схему системи (рисунок 4), яка повинна вирішувати проблеми керування процесом. На рисунку суцільними лініями показано існуючу систему керування, до якої додані необхідні блоки керування та зворотні зв'язки (показані штрих-пунктирними лініями) для підвищення ефективності процесу.

Запропонована система керування є дворівневою. На верхньому рівні системи знаходиться автоматична система керування (АСК) плавкою на основі промислової ЕОМ, а на нижньому — контролер керування процесом. У такому випадку є можливість керування процесом в автоматичному і в напівавтоматичному режимах з можливістю втручання оператора протягом налаштування оптимальних режимів процесу і аварійних ситуацій.

Усі сигнали від датчиків надходять на вхід контролера керування процесом, звідки вони передаються на АСК

плавки, опрацьовуються і у відповідності з певними алгоритмами подаються на контролер, а з нього передаються керуючі сигнали на виконавчі механізми.

Реалізація запропонованої функціональної схеми дозволить зменшити розкид часу виплавки вдвічі, тобто тривалість виплавки злитку по відношенню до середньої тривалості зменшиться на 11–13%, а отже, і споживання електроенергії також зменшиться на 11–13%.

Висновки

Проаналізовано існуючу технологію електронно-променевої плавки титану. Виявлено наступні задачі подальшого дослідження: нерівномірність подачі шихти, витягування злитку з кристалізатора, керування електронно-променевими гарматами. Проаналізовано також час витяжки злитків, який змінювався у межах 252–335 хв, середня тривалість процесу складала 299 хв. Встановлено, що час витяжки злитку з кристалізатора при технології ЕПП значною мірою залежить від кваліфікації оператора та його фізичних можливостей.

Було запропоновано наступні заходи для максимального вирішення проблем, що виникають під час ЕПП титану: використовувати для керування подачею шихти до зони плавки гідропривод зі зворотним зв'язком; організувати відеоспостереження за процесом плавки на лінії подачі шихти (над проміжною емністю) з використанням системи розпізнавання образів і положення; для забезпечення більшої плавності витяжки злитку з кристалізатора ви-

користувати гідропривод з героторним гідромотором та передачею гвинт-гайка; на основі спостережень системи розпізнавання образів і положення за процесом плавки подавати відповідні сигнали в автономному режимі на приводи подачі шихти і механізму витяжки злитку з кристалізатора відповідно.

Розроблено відповідну функціональну схему дворівневої мехатронної системи керування плавкою титану. Ця схема враховує усі вищезазначені заходи для максимального вирішення проблем, що виникають під час ЕПП титану. При цьому на основі заощадження загального часу плавки можливо зменшити споживану електроенергію на 11–13%.

Література

1. Электронно-лучевая плавка титана/ Б.Е.Патон, Н.П.Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук. — К.: Наукова думка, 2006. — 248 с.
2. О структуре производства титановой продукции: мировой опыт и реализация в Украине / А.В. Минакова, В.Н. Минаков, Н.В. Минаков Н.В., В.И.Трефилов. — К., 1998. — 22 с.
3. Контроль и стабилизация уровня жидкого металла в кристаллизаторе при электронно-лучевой плавке / В.Г. Соловьев, Ю.Н. Ланкин. Современная электротехнология. — 2009. — № 1. — С. 22—27.

Надійшла 24.04.2012 року