

## Розробка принципів управління процесами безперервного розливання сплавів з використанням магнітодинамічного обладнання

В. І. Дубодєлов, А. Ю. Семенко, К. С. Богдан, М. С. Горюк

Запропоновано новий принцип управління температурою та масовою витратою металевого розплаву при його безперервному розливанні. Встановлено, що таке управління може здійснюватися на основі постійного контролю маси рідкого сплаву в ливарних та металургійних агрегатах і відповідного регулювання системами обладнання. Використання для впливу на рідкометалеве середовище електромагнітних полів та магнітогідродинамічних (МГД) чинників є ефективним засобом забезпечення необхідних технологічних та техніко-економічних показників процесу безперервного розливання. Запропоновано відповідну принципову конструктивно-функціональну схему системи автоматичного управління (САУ) процесом безперервного розливання сплавів, яка ґрунтується на застосуванні магнітодинамічного проміжного ковша (МД-ПК) і магнітовагової системи. Визначено їх основні конструктивні особливості та функціональні можливості стосовно до процесів безперервного розливання як у порівнянні з існуючим обладнанням, так і з системами аналогічного призначення. Пропонується реалізувати МД-ПК у вигляді двокамерного агрегату, в якому розділені функції прийому розплаву зі сталерозливного ковша, нагрівання рідкого металу, видачі його у кристалізатор машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Стабілізація витратного режиму розливання, у тому числі малонапорного, здійснюється за рахунок постійного контролю маси розплаву в системі та відстеження його рівня у випускній камері МД-ПК і кристалізаторі МБЛЗ.

Розроблений спосіб та створювані агрегат, система і допоміжні пристрої дозволять суттєво удосконалити сучасні технології безперервного лиття

Ключові слова: безперервне розливання, магнітодинамічний проміжний ківш, масова витрата, система автоматичного управління

### 1. Вступ

На сьогодні технології безперервного розливання сталі посідають одне з чільних місць з точки зору підвищення ефективності металургійного виробництва і забезпечення високої якості металопродукції. Тому наукові та прикладні дослідження процесів, що супроводжують безперервну розливу сталі, є надзвичайно актуальними і перспективними та інтенсивно проводяться у провідних промислово розвинених країнах світу. Основними проблемами, що вирішуються в межах зазначених досліджень, є передусім покращення структури та властивостей безперервнолитих заготовок, якості їх зовнішньої поверхні, а також збільшення продуктивності виробництва.

Безперечною перевагою існуючих технологій є їх розповсюдженість, ґрунтовне відпрацювання всіх операцій. Однак у цьому і полягає їх головний недо-

лік – можливості вдосконалення існуючих технологій за рахунок більш повної реалізації закладених в них наукових ідей та інженерних розробок майже вичерпані. Подальший розвиток відбувається лише за рахунок підвищення культури виробництва, застосування нових матеріалів, комп'ютерної техніки та удосконалення конструкції окремих вузлів.

Одна з головних проблем полягає в тому, що при безперервній розливці сталі на всіх стадіях процесу слід забезпечити широкодіапазонне малоінерційне управління тепловим та гідродинамічним станом рідкого металу. Бажано також забезпечити проведення перерахованих операцій в одному багатofункціональному агрегаті.

Стабільність процесу безперервного розливання металевих розплавів, а отже і якості одержуваних заготовок, багато в чому визначається технологічними параметрами в ланцюгу: «сталерозливальний ківш – проміжний ківш – кристалізатор». Підтримання постійного рівня розплаву в кристалізаторі може бути забезпечене лише при наявності швидкодіючих органів управління, які дозволяють регулювати витрату розплаву з потрібною точністю. Крім того, зважаючи на високу динаміку процесу безперервного розливання, актуальною також є задача суворого додержання заданої температури розплаву. За це також має відповідати система управління, що ґрунтується на контролі маси та/або рівня рідкометалевої ванни у промковші і відповідного регулювання потужності нагріву.

Тому одним з перспективних напрямків досліджень є розробка наукових основ створення нових високоефективних мультифункціональних проміжних ковшів для процесів безперервного лиття. Такі унікальні агрегати мають бути інтегровані в структуру машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), забезпечити перенесення до промковша операцій з позапічної обробки розплаву, які зазвичай реалізуються в агрегатах типу «піч-ківш».

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Ефективність індукційного нагріву, в порівнянні з широкозастосовуваними у промковшах електродуговими та плазмовими джерелами з тепловим та електричним ККД на рівні 0,55–0,75, становить 0,80–0,85 [1]. Тому корпорацією Kawasaki Steel був розроблений індукційний проміжний ківш місткістю 5 тонн для технології безперервного розливання слябів з високоякісної нержавіючої сталі [2, 3]. Така розробка дозволила практично повністю виключити дефекти безперервнолитих заготовок, що пов'язані з нестабільністю теплових режимів розливання. Так, розливання сталі з традиційного промковша супроводжується досить значним падінням температури розплаву (більше 10 °С) за порівняно тривалий, з огляду на динаміку процесу, період (3–6 хв). Тому на певних стадіях процесу розливання (старт розливання, зміна сталь-ковша та ін.) слід вводити в розплав значну електричну енергію – на рівні 300–500 кВт (залежно від маси металу в промковші).

Однак такий унікальний агрегат не знайшов широкого застосування у промисловості, що пояснюється в першу чергу недосконалістю системи управління подачею розплаву в кристалізатор МБЛЗ. Така система заснована на застосуванні недостатньо надійних, контактуючих з рідкої сталлю стопорних або ши-

берних затворів. Спроби створити безконтактний електромагнітний затвор увінчалися успіхом тільки для модельних речовин типу сплаву Вуда [3]. Через незадовільні електричні властивості сталі, великі немагнітні зазори, обмеженість простору в місці установки затвора, такий пристрій на сьогодні не може бути створений для реальних виробничих процесів безперервного розливання сталі на промислових МБЛЗ.

Для нагріву металу і видалення неметалевих включень (НВ) пропонується застосувати проміжні ковші, у тому числі двокамерні, з додатковими електромагнітними системами, у першу чергу індукторами [4–7]. Так, відомий оснащений індукційною одиницею промковш, в якому, крім індукційного нагріву рідкої сталі, забезпечується видалення неметалевих включень з неї за рахунок використання явища пінч-ефекту та різних електричних властивостей металу і НВ [6, 7].

Інша конструкція так званого двокамерного відцентрового проміжного ковша передбачає відділення за допомогою перегородок частини порожнини промковша, в яку надходить рідкий метал зі сталерозливального ковша. Ця порожнина охоплена напівкільцевим індуктором обертового магнітного поля, що створює обертовий рух розплаву в ній і виключає потрапляння НВ у ванну промковша та далі у кристалізатор МБЛЗ [8]. Однак ефективна робота такої системи залежить від співвідношення висоти індуктора та рівня розплаву у промковші, щоб запобігти заміщенню шлаку з поверхні вглиб рідкометалевої ванни.

Крім того, всі без винятку розглянуті пристрої мають суттєві недоліки [9, 10]. По-перше, це вже згадуване використання стопорних та шибєрних затворів, які схильні до заростання та руйнування. По-друге, такі промковші забезпечують розливання металу під значним металостатичним напором, що обумовлює високу лінійну швидкість розплаву (3–5 м/с), який надходить до кристалізатора МБЛЗ, та пов'язані з цим дефекти структури. Також слід відзначити проблеми стабільності процесу розливання (захоплення плівок, НВ, газів в тіло заготовки, глибока рідкометалева лунка, розмивання кірки та збільшення небезпеки її прориву тощо). Для запобігання таких негативних наслідків застосовують спеціальні дорогі пристрої електромагнітного гальмування високошвидкісних потоків сталі у кристалізаторі МБЛЗ типу EMBR (Electromagnetic Brake) [11–13].

Тому можна з впевненістю констатувати, що розробки для удосконалення процесів безперервного розливання переживають певний науковий та технологічний застій. Причина полягає у вичерпанні можливостей існуючого обладнання та відсутності нових підходів, які дозволили б кардинально поліпшити техніко-економічні показники процесу. Аналогічні дослідження, у тому числі такі, де проміжний ківш як технологічна одиниця набирає все більшої функціональної ваги, проводяться і за кордоном [14, 15].

### **3. Мета і задачі дослідження**

Метою дослідження є розробка теоретичних принципів і підходів для удосконалення процесів безперервного розливання сплавів, зокрема, з використанням оригінального обладнання і сучасних засобів контролю та управління основними технологічними параметрами. Це дасть можливість створити переду-

мови поліпшення якості литої металопродукції та підвищення техніко-економічних показників технологій лиття.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– на основі проведеного аналізу існуючих технологій безперервного розливання сплавів та обладнання для їх реалізації, запропонувати нові зразки металургійного обладнання з удосконаленою конструкцією та розширеними функціональними можливостями;

– сформулювати основні принципи організації та практичної реалізації досліджуваного технологічного процесу з застосуванням запропонованого новітнього обладнання;

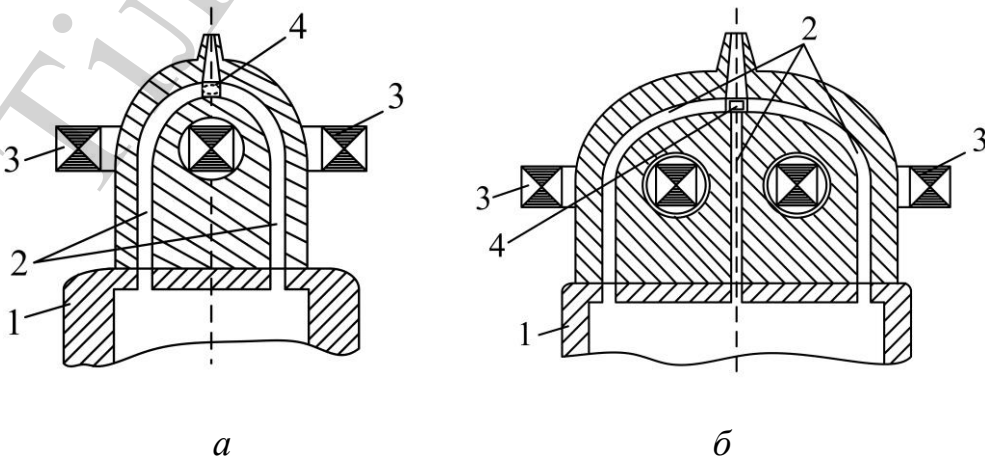
– розробити загальну схему управління досліджуваним технологічним процесом на основі контролю температурних і витратних характеристик.

#### **4. Обґрунтування необхідності застосування оригінального обладнання для безперервного розливання та розробки принципової схеми процесу і системи управління**

##### **4.1. Особливості конструкції та функціонування оригінального магнітодинамічного проміжного ковша**

В якості вищезазначеного автономного багатофункціонального пристрою, здатного оперативно та ефективно управляти тепловими та гідродинамічними параметрами при безперервному розливанні сталі, пропонується використати магнітодинамічний проміжний ківш (МД-ПК). Такий агрегат розроблено на базі магнітодинамічного міксер-дозатора для перегрівання і розливки чавуну та сталі конструкції Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної Академії наук України [16]. Подібні МГД-агрегати мають розширені функціональні можливості щодо підігріву рідкого металу, усереднення його температури та хімічного складу, можливості позапічної обробки розплаву, що забезпечує покращення якості безперервнолитої заготовки і ефективності процесу розливання.

Створюваний МД-ПК має в своїй конструкції (рис. 1): тигель, індукційний канал та розливальну частину. До складу індукційної частини входять: прямокутний у перерізі індукційний канал U-подібної, Ш-подібної або більш складної форми; від одного до трьох індукторів; один або два електромагніти та зливальних носки.



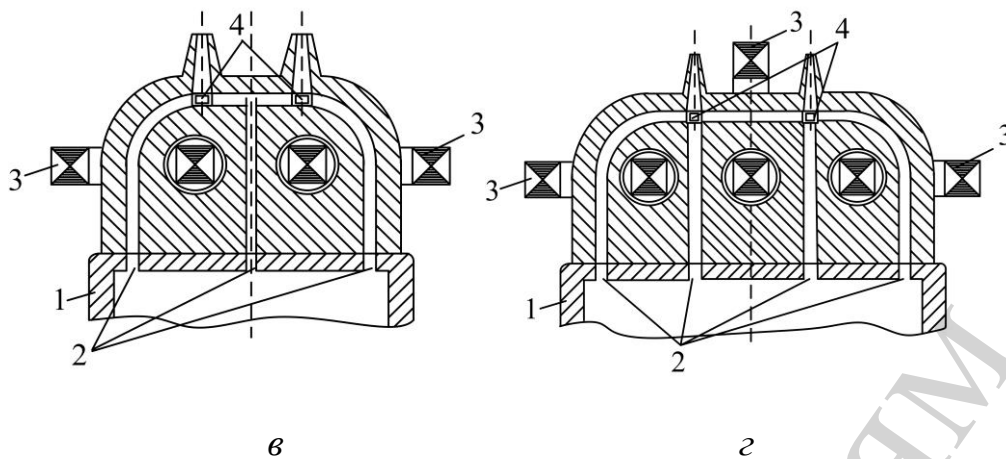


Рис. 1. Варіанти виконання конструкції індукційної частини магнітодинамічного міксера-дозатора (горизонтальне розташування, вид зверху): *а* – одноіндукторне виконання; *б, в* – двоіндукторне виконання з різною кількістю електромагнітів і зливних носків; *с* – триіндукторне виконання; 1 – тигель; 2 – гілки індукційного каналу; 3 – індуктор; 4 – робоча зона

Головними рисами магнітодинамічного міксера-дозатора та, відповідно, створюваного МД-ПК є:

1) наявність двох автономних електричних систем – індуктора й електромагніта. Індуктор слугує для нагріву металу, а електромагніт створює на певній ділянці каналу (у робочій зоні) змінне магнітне поле, яке взаємодіє з електричним струмом у каналі. Результуюча електромагнітна сила приводить розплав у рух. Таке технічне рішення дозволяє незалежно керувати режимами нагріву і розливки розплаву за рахунок регулювання тепловиділення в металі та його руху під дією електромагнітних сил;

2) горизонтальне розташування індукційної частини. Завдяки такій конструкції полегшується експлуатація агрегату, а відбір металу на розливу здійснюється із зони нагріву. Таким чином, можна витримувати розплав у тиглі при зниженій температурі та перегрівати метал до температури розливки безпосередньо під час його видачі з міксера, що дозволяє значно скоротити енерговитрати процесу;

3) можливість розливання розплаву з малим металостатичним напором.

#### 4. 2. Принципова схема процесу безперервного розливання з використанням магнітодинамічного проміжного ковша

Аналіз роботи проміжних ковшів МБЛЗ традиційної конструкції показав [4, 10, 17], що середня висота рівня розплаву в них протягом циклу розливання становить 0,7–1,1 м. У разі заміни сталерозливного ковша після переливу усієї маси розплаву з нього у проміжний ківш, до надходження нового ковша відбувається суттєве зниження рівня, тобто має місце періодично повторюваний процес зменшення/зростання рівня розплаву  $H$  у промковші протягом часу розливання  $\tau_n$  (рис. 2). При цьому не слід допускати зменшення рівня нижче за  $\sim 0,4$  м, оскільки в такому разі над зонами видачі рідкого металу (над вихідним

отвором сталерозливного стакану, який занурений під рівень розплаву в кристалізаторі МБЛЗ) внаслідок дії ряду гідродинамічних чинників формується воронка [10]. Це призводить до захоплення шлаку з поверхні рідкометалевої ванни і повітря над дзеркалом металу. Як наслідок, неметалеві включення та газу потрапляють до кристалізатора МБЛЗ та спричиняє виникнення дефектів у тілі безперервнолитої заготовки.

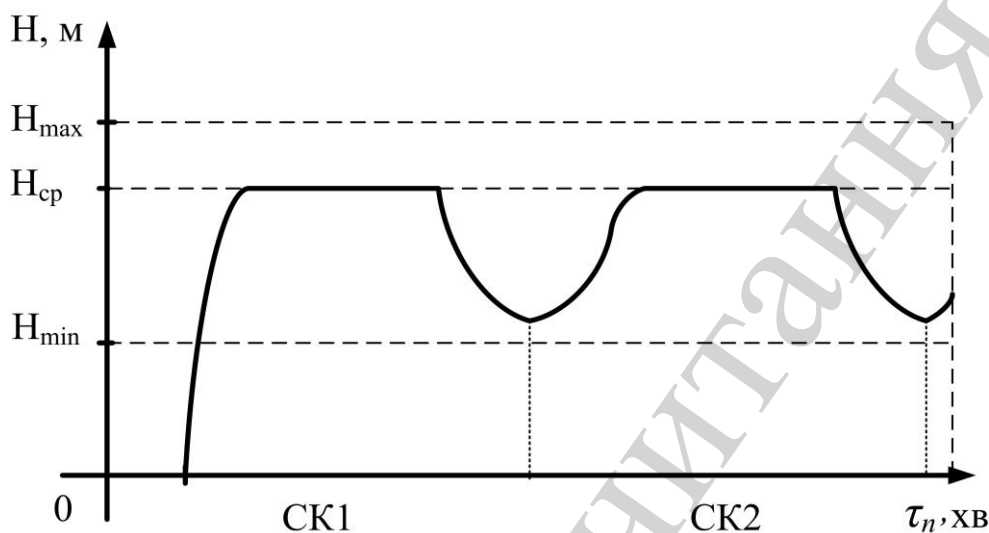


Рис. 2. Характер зміни рівня розплаву у промковші при безперервному розливанні та періодичному поповненні з нового сталерозливного ковша: СК1, СК2 – час переливу розплаву зі сталерозливних ковшів 1 та 2 до МД-ПК

Зазначені переваги МД-ПК дозволили проаналізувати його роботу щодо забезпечення стабільності процесу в режимі безперервного розливання металу і раціоналізувати енергетичні і технологічні параметри. При цьому має бути дотриманий тепловий баланс між тепловмістом рідкого металу, який у кожний момент часу перебуває у МД-ПК, надходить до нього зі сталерозливного ковша і зливається з МД-ПК у кристалізатор. За умов періодичного поповнення МД-ПК розплавом, баланс описується закономірністю:

$$\eta_{ел} \cdot \eta_{тепл} \cdot P_{інд} \cdot (\tau_p + \tau_{p+d}) + (M \cdot t - Q_{розл} \cdot \tau_p \cdot t_{розл} - M_{дол} \cdot \Delta t') \cdot c = 0. \quad (1)$$

У виразі (1) частина складових описують параметри МД-ПК:  $\eta_{ел}$  та  $\eta_{тепл}$  – відповідно електричний і тепловий коефіцієнт корисної дії МД-ПК;  $P_{інд}$  – потужність індуктора МД-ПК, кВт;  $M$  – маса металу в МД-ПК, кг. Інші складові пов'язані з температурними, часовими та витратними показниками власне технологічного процесу розливання. Серед часових параметрів наявні:  $\tau_p$  – час, протягом якого відбувається лише видача розплаву з МД-ПК в прийомний пристрій, с;  $\tau_{p+d}$  – час, протягом якого одночасно відбуваються розливання металу з МД-ПК та доливання в нього нової порції розплаву, с. Виключно теплові чинники процесу:  $t$  – температура металу в МД-ПК, °С;  $t_{розл}$  – задана температура розливання, °С;  $c$  – теплоємність розплаву, Дж/(кг·°С);  $\Delta t'$  – величина необхід-

ного перегріву розплаву в МД-ПК, °С:  $\Delta t' = t_{розл} - t_{дол}$ , °С. Масові та витратні показники наступні:  $Q_{розл}$  – масова витрата металу при розливанні, кг/с;  $M_{дол}$  – маса порції металу, що доливається в МД-ПК, кг.

Для повністю безперервних процесів (безперервне доливання розплаву в МД-ПК і безперервна видача металу з нього в приймальний пристрій) умова (1) набуває вигляду:

$$\eta_{ел} \cdot \eta_{тепл} \cdot P_{інд} - (Q_{розл} \cdot t_{розл} + Q_{дол} \cdot \Delta t') \cdot c = 0, \quad (2)$$

де  $Q_{дол}$  – масова витрата металу при доливанні в МД-ПК, кг/с.

Для реалізації такого режиму керування процесом безперервного розливання було запропоновано двокамерний МД-ПК. Управління витратою металевого розплаву відбувається шляхом контролю маси розплаву та його рівня в камерах МД-ПК і кристалізаторі МБЛЗ [18, 19].

#### 4. 3. Розробка конструктивно-функціональної схеми САУ МД-ПК

Запропоновано нове технічне рішення для управління потоком розплаву від розливающего ковша до кристалізатора, яке засноване на використанні двокамерного МД-ПК з магнітоваговим управлінням витратою розплаву (рис. 3).

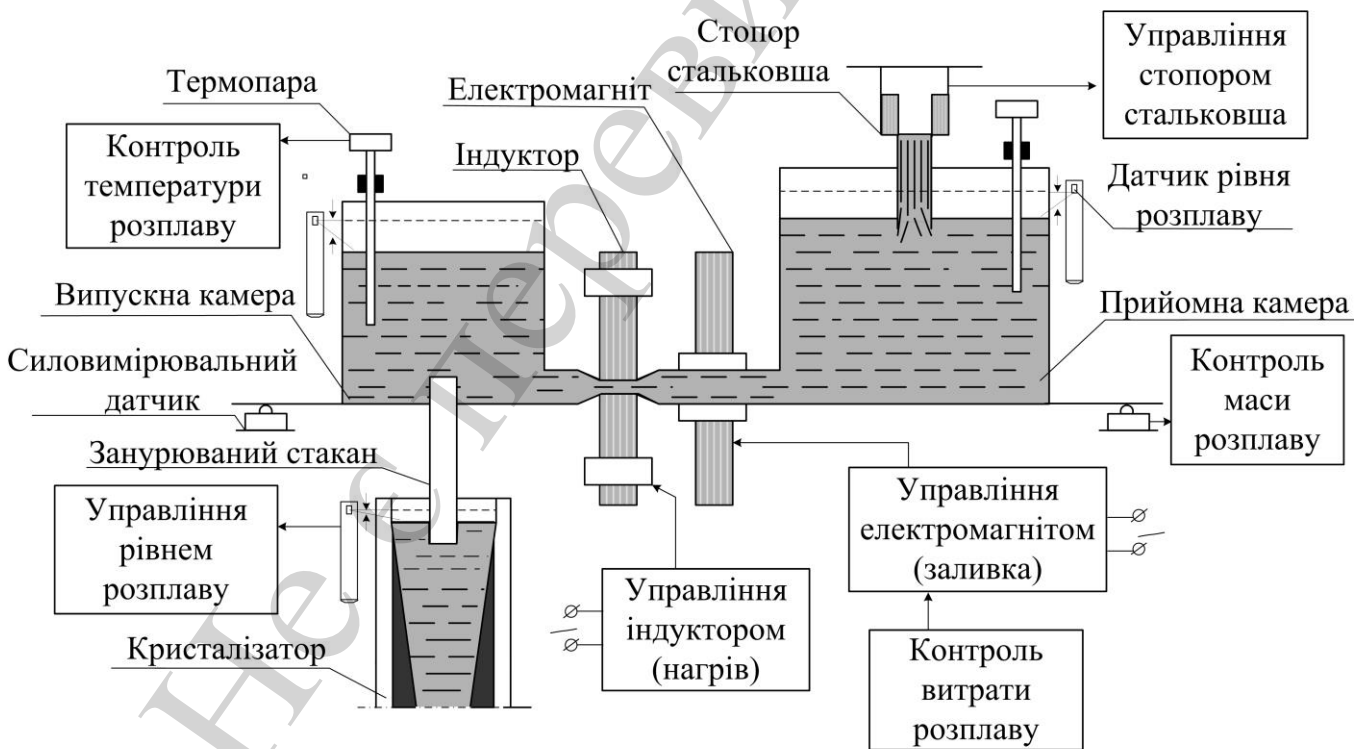


Рис. 3. Конструктивно-функціональна схема САУ МД-ПК для процесів безперервного розливання розплавів

Двокамерний МД-ПК має в своєму складі: прийомну та випускну камери, що являють собою сполучені ємкості, з'єднані індукційним каналом. Відбува-

ється постійний регульований індукційний нагрів рідкого металу, що безпосередньо надходить на розливання, оскільки розплав з випускної камери безперервно подається до кристалізатора. Величина такого перегріву в процесі розливання залежить від геометрії індукційного каналу та потужності індуктора. Дослідно-промислова перевірка запропонованого рішення щодо нагріву розплаву безпосередньо в процесі його розливання була свого часу проведена в умовах ливарного цеху на діючому магнітодинамічному міксері-дозаторі для чавуну та сталі [16]. Індукційна частина міксера була виконана як представлено на рис. 1, б. Повна місткість міксера-дозатора складала 4 тонни залізовуглецевого розплаву, сумарна максимальна потужність двох індукторів 300 кВт. Геометричні розміри центральної гілки індукційного каналу, через яку під дією електромагнітних сил проходить метал з тигля на зливний носок, складала: довжина – 1,1 м; переріз – прямокутний, 0,12×0,09 м. Було досліджено перепад температур рідкого металу між тиглем і зливним носком міксера-дозатора, що забезпечується нагрівом розплаву в процесі його руху. Встановлено [16], що в залежності від режимів руху розплаву і потужності індукторів величина перегріву складає не менше 10 °С (в умовах періодичного заливання виливків на ливарному конвеєрі). Процес безперервного розливання відзначається масовими швидкостями руху металу у 3–5 разів більшими, ніж при дозуванні в умовах ливарного цеху. Тому потужність індукторів для забезпечення співставних теплових параметрів слід збільшувати.

Крім того, індуктор бере участь у створенні електромагнітної сили. Додатковий електромагніт на певній ділянці індукційного каналу створює зовнішнє змінне магнітне поле. Створене поле взаємодіє з індукційним струмом у каналі та внаслідок суперпозиції полів генерується об'ємна електромагнітна сила, яка забезпечує рух розплаву між камерами. Залежно від режимів включення індуктора та електромагніта, може відбуватись контрольоване гальмування або прискорення руху розплаву у напрямку випускної камери (тобто може здійснюватись активне управління масовою витратою при розливанні).

Загалом рівень розплаву у камерах МД-ПК (рис. 3) за умови відсутності зовнішніх фізичних дій буде однаковим. Однак можливе конструктивне виконання випускної камери з піднятим рівнем донної частини відносно рівня дна впускної камери. У такому разі сполучні індукційні канали між камерами мають бути підняті на відповідний рівень або виконані похилими у напрямку підйому від впускної камери до випускної. При цьому відносна висота рівня розплаву у впускній камері стає суттєво меншою, ніж у випускній. Також при включенні електромагніта в режимі гальмування потоку з випускної камери рівень розплаву у випускній камері буде меншим.

Відомо [20], що лінійна швидкість витікання розплаву з ємкості залежить від поточного рівня рідини  $H$  (м) у цій ємкості:

$$v = \mu(2 \cdot g \cdot H)^{1/2}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт гідравлічного опору при витіканні рідини з ємкості, звичайно  $\mu = (0,60 \dots 0,95)$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .



Тому при зниженні рівня розплаву у випускній камері МД-ПК у 2–2,5 рази порівняно з традиційними проміжними ковшами (з ~1,0 м до 0,4–0,5 м) згідно з (3) вертикальна складова лінійної швидкості розплаву у кристалізаторі зменшується у 1,4–1,6 рази. Тобто, суттєво поліпшуються умови приготування заготовки у кристалізаторі МБЛЗ. По-перше, перегріта сталь не так глибоко проникає у тіло заготовки, розмиваючи затверділу частину. По-друге, захоплені неметалеві та газові включення залишаються головним чином у зоні кристалізатора і не потрапляють у зону вторинного охолодження і фінального тверднення заготовки.

Проміжний ківш встановлений на чотирьох силовимірювальних датчиках (по два на кожній стороні ковша), закріплених на нерухомій основі. Виходи датчиків підключені до суматора у блоці вимірювання маси. В схемі також передбачено блок завдання миттєвого значення маси розплаву у промковші. Виходи обох блоків підключені до нуля-органа у блоці управління стопором (затвором) розливающего ковша, з'єднаного з приводом. Крім того, виходи пари датчиків, розташованих зі сторони випускної камери, підключені разом з виходом блока управління тиском через блок корекції напруги живлення до блоків управління індуктором і електромагнітом. Стакан випускної камери входить у кристалізатор МБЛЗ. Розплав надходить із розливающего ковша через стопор з приводом у випускную камеру промковша, а з неї через стакан у кристалізатор.

Контроль температури розплаву у випускній і випускній камерах промковша здійснюється за допомогою датчиків температури і, відповідно, підключених до термоконтролера з цифровим індикатором температури.

Контроль рівня розплаву у прийомній та випускній камерах промковша і кристалізаторі здійснюється за допомогою датчиків рівня, підключених до блока управління рівнем розплаву.

Індуктори і електромагніт підключені до блока живлення, з'єднаного через шафу управління з пультом управління. Мікропроцесорні блоки вимірювання маси, тиску і витрати розплаву підключені до відповідних цифрових індикаторів, що дає змогу контролювати, при необхідності, різні параметри.

Розроблювана САУ МД-ПК передбачає два режими роботи: без стабілізації масової витрати та зі стабілізацією. У будь-якому разі, процес безперервного розливання розплаву відбувається наступним чином. У вихідному стані промковша порожній (тобто індикатор маси розплаву обнулений) і перебуває в режимі очікування. При цьому, електричне живлення індуктора та електромагніта відсутнє. За командою оператора з пульта управління, спрацьовує стопор (затвор) розливающего ковша і розплав починає надходити у випускную камеру МД-ПК. Після заповнення індукційного каналу вмикається індуктор. Коли миттєве значення маси розплаву у промковші досягне розрахункового значення, спрацьовує нуль-орган у блоці вимірювання маси розплаву, і його витрата у випускній камері стабілізується. При цьому рівень розплаву у випускній камері також стабілізується для забезпечення необхідної сталої масової витрати при розливанні та постійного рівня розплаву у кристалізаторі МБЛЗ. Для забезпечення заданих витратних параметрів може вмикатися електромагніт.

Дослідна перевірка запропонованого способу управління масовою витратою була проведена в умовах експериментально-технологічної дільниці відділу

магнітної гідродинаміки Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України (ФТІМС НАН України). В якості прототипу (фізичної моделі) МД-ПК була використана магнітодинамічна установка МДН-6А для алюмінієвих сплавів місткістю до 630 кг розплаву. Установку додатково було оснащено тензорезисторним силовим датчиком для контролю миттєвого значення маси розплаву  $m_{vis}$  безпосередньо на зливному металопроводі. Ця величина залежить від рівня розплаву в установці і величини створюваної електромагнітної сили, що при сталому живленні індуктора визначається в першу чергу напругою на електромагніті. Слід зазначити, що процес розливання, внаслідок дії ряду гідродинамічних чинників, супроводжується пульсаціями струменя розплаву. При безперервному розливанні відкритим струменем з проміжного ковша у кристалізатор МБЛЗ це призводить до розбризкування та вторинного окислення металу. У разі розливання з використанням занурюваного під рівень розплаву в кристалізаторі стакану, відбувається розмивання його порожнини, що також погіршує якість заготовки. Тому в експерименті для зменшення впливу пульсацій струменя на процес розливання було застосовано безрозмірний критерій  $k$ :

$$k=Q/m_{vis}, \quad (4)$$

де  $Q$  – масова витрата розплаву при розливанні, кг/с.

В ході експерименту з розливання алюмінієвого сплаву встановлено, що мінімальні пульсації струменя забезпечуються при значеннях  $k$  від 2,2 до 2,25. Додержання цього показника при дискретному розливанні розплаву порціями масою 1,8 кг забезпечило високу точність дозування (рис. 4). Похибка склала до 1,5 % від маси дози. Для порівняння, при дозованому розливанні порцій до 3 кг, наприклад, в технологіях лиття під тиском, без застосування магнітодинамічного обладнання та запропонованої магнітовагової системи похибка може сягати 5 % [21].

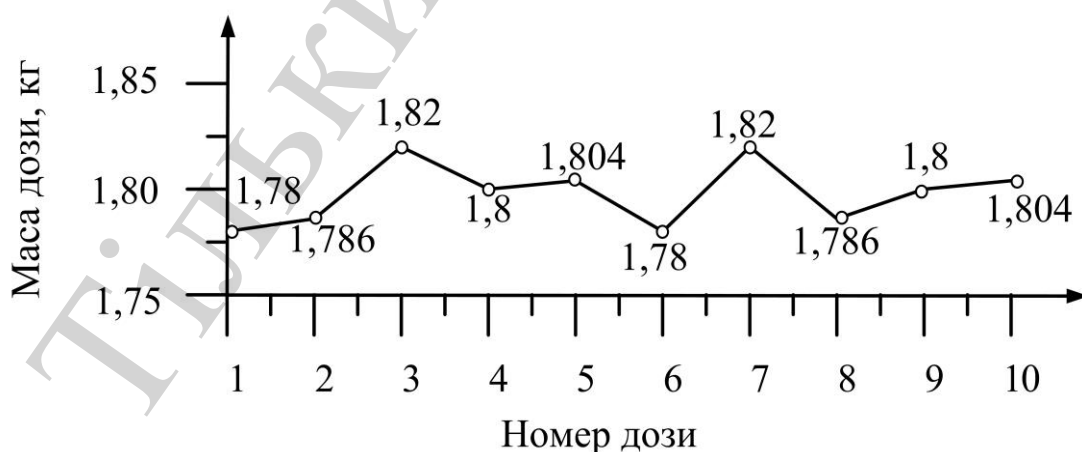
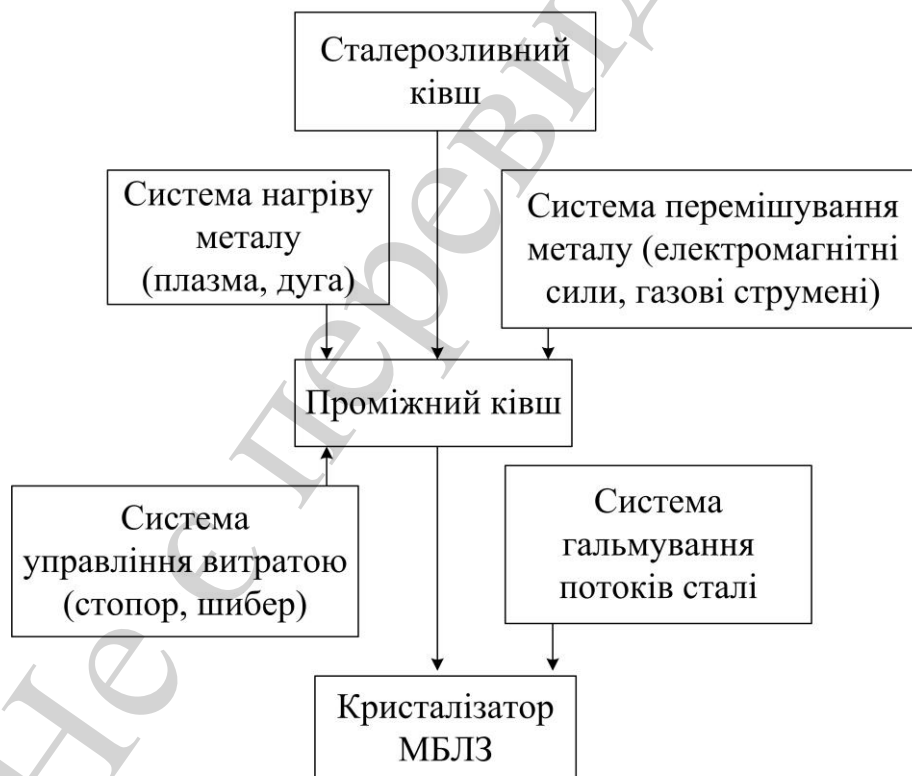


Рис. 4. Дискретне дозування алюмінієвого розплаву порціями масою 1,8 кг за допомогою магнітодинамічної установки, що оснащена ваговимірвальним тензорезисторним датчиком.

Таким чином, реалізація розробленого магнітовагового способу управління безперервним розливанням розплаву забезпечує стабільність процесу, що підтверджено вищенаведеними результатами експериментальних досліджень на діючому та модельному магнітодинамічному обладнанні. Зокрема, активне управління тепловим станом розплаву у МД-ПК скорочує ймовірність виникнення дефектів, пов'язаних з несприятливим температурним режимом розливання. Управління витратними характеристиками забезпечить збільшення виходу придатного лиття та продуктивність процесу.

### 5. Обговорення результатів досліджень створення нової системи автоматичного управління магнітодинамічним проміжним ковшом

Порівняння розробленої САУ МД-ПК з традиційними технологіями управління безперервним розливанням (рис. 5, табл. 1) свідчить про наступне. Існуючі типи технологічного обладнання не завжди добре адаптуються один до одного, синхронізуються між собою, не є взаємозамінними та важко інтегруються до єдиної системи. Запропонований спосіб і агрегати дозволяють скоротити кількість взаємопов'язаних агрегатів і створити належні передумови для розвитку процесу та поліпшення його техніко-економічних показників.



*a*

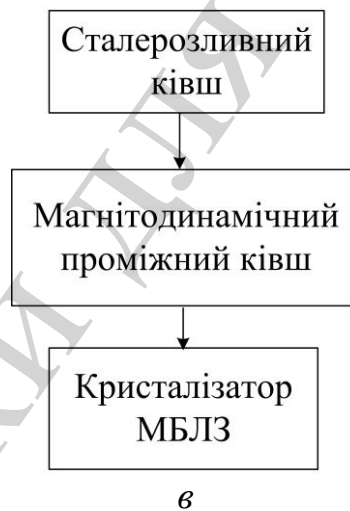


Рис. 5. Порівняння схем процесу безперервної розливки сталі: *a* – технологія з використанням традиційного проміжного ковша; *б* – технологія з використанням індукційного проміжного ковша; *в* – технологія з використанням магнітодинамічного проміжного ковша

Таблиця 1

Порівняння характеристик проміжних ковшів різної конструкції

Характеристика	Традиційний проміжний ківш	Індукційний проміжний ківш	Магнітодинамічний проміжний ківш
Відносна простота конструкції	++*	+	+
Відпрацювання операцій	++	+	+
Новизна технічних рішень	-	+	++
Ефективний підігрів металу без застосування додаткових систем	-	+	+
Перемішування розплаву без застосування додаткових систем	-	+	++
Можливість інтенсифікації процесів позапічної обробки металу	-	+	+
Можливість розливання розплаву без застосування механічних пристроїв	-	-	+
Стабільність витікання струменя сталі із промковша у кристалізатор	+	+	++
Можливість малонапорного розливання та зниження динамічного впливу струменя сталі	-	-	+
Можливість ефективного управління процесом безперервного розливання та зменшення ймовірності проривів	-	+	++
Можливість поліпшення умов розподілу металу по ширині кристалізатора	-	-	++
Відсутність необхідності застосування інертних газів для захисту елементів стопорних та шибєрних систем	-	-	+
Підвищення якості продукції	-	+	++
Матеріало- та енергозбереження	-	+	++

Примітка: \* Оцінки: «-» посередньо; «+» добре; «++» дуже добре.

Виходячи з аналізу наявної інформації та наведених результатів досліджень, можна сформулювати загальні рекомендації до створюваного зразка МД-ПК:

- місткість – 3–10 тонн рідкої сталі;
- сумарна електрична потужність індукторів – 300–600 кВт;
- система управління – інтегрована ваговимірювальна з використанням тензорезисторних датчиків, а також з можливістю додаткового застосування сучасних датчиків рівня розплаву;
- області застосування – безперервне лиття тонкого слябу, пряме одержання з розплаву листової металопродукції литтям – прокатування у двовалковий кристалізатор, одержання сортової заготовки в умовах металургійних міні- та мікровиробництв.

Подальший розвиток проведених досліджень має здійснюватись за двома основними напрямками.

По-перше, слід ґрунтовно відпрацювати часові, температурні та витратні співвідношення на всіх ланках технологічного процесу – від плавильного агрегату до кристалізатора МБЛЗ – в реальних виробничих умовах.

По-друге, необхідна адаптація розроблених підходів обладнання і систем до найбільш перспективних технологій безперервного розливання сплавів. На сьогодні такими є одержання тонкого слябу, пряме виготовлення сталевих листів з розплаву за технологією розливання у двовалковий кристалізатор, а також випуск сортової заготовки в умовах малих металургійних виробництв.

## **6. Висновки**

1. Запропоновано удосконалення процесів безперервного розливання металів та сплавів на основі використання магнітодинамічного проміжного ковша української розробки. Розроблено новий принцип управління витратними характеристиками і відповідна САУ, які ґрунтуються на застосуванні інтегрованої ваговимірювальної системи.

2. За результатами натурних і модельних експериментів, запропонована розробка забезпечить: керований індукційний перегрів розплаву безпосередньо перед видачею до кристалізатора МБЛЗ. Також реалізується безконтактне управління рухом рідкого металу (його переміщення та видача до кристалізатора МБЛЗ) під дією електромагнітних сил. Крім того, стає можливим малонапірне розливання сплавів із регульованою масовою витратою і підведення розплаву по всій ширині кристалізатора МБЛЗ.

3. Очікувані економічні переваги застосування МД-ПК і запропонованої САУ полягають у зменшенні кількості технологічних переливів розплаву і пов'язаною з цим енергоекономією стабілізації роботи МБЛЗ, поліпшенні якості безперервнолитих заготовок, збільшенні виходу придатного лиття і підвищенні продуктивності процесу.

## **Література**

1. Альтгаузен, А. П. и др.; ред. Альтгаузен, А. П. (1980). Электротермическое оборудование. Москва: Энергия, 303.

2. Mabuchi, M., Yoshii, Yu., Nozaki, Ts. et. al. (1985). Automatic Control of Molten Steel Temperature in Tundish and Application to Stainless Steel Casting. *Kawasaki Steel Giho*, 14 (4), 365–371.
3. Takeuchi, E., Zeze, M., Toh, T., Mizoguchi, Sh. (1992). Applied MHD in the Process of Continuous Casting. Proceedings of Symposium “Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy” (during the TMS Annual Meeting). San Diego, California, 189–202.
4. Wang, Q., Li, B., Tsukihashi, F. (2014). Modeling of a Thermo-Electromagneto-Hydrodynamic Problem in Continuous Casting Tundish with Channel Type Induction Heating. *ISIJ International*, 54 (2), 311–320. doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.311>
5. Tang, H., Guo, L., Wu, G., Xiao, H., Yao, H., Zhang, J. (2018). Hydrodynamic Modeling and Mathematical Simulation on Flow Field and Inclusion Removal in a Seven-Strand Continuous Casting Tundish with Channel Type Induction Heating. *Metals*, 8 (6), 374. doi: <https://doi.org/10.3390/met8060374>
6. Taniguchi, S., Brimacombe, J. K. (1994). Separation of nonmetallic inclusions from liquid metal by pinch force. Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 1994”. Nagoya, 429–434.
7. Танигучи, С., Бримакомб, Дж. (1996). Извлечение немаetalлических включений из металла силой пинча. *Магнитная гидродинамика*, 2, 158–163.
8. Miki, Yu. (2006). Applications of MHD to continuous casting of steel. Proceedings of the 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2006”. Sendai, 26–30.
9. Toh, T., Takeuchi, E., Matsumiya, T. (2006). Recent advances in MHD applications to steelmaking processes. Proceedings of the 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2006”. Sendai, 21–25.
10. Дубоделов, В. И., Смирнов, А. Н., Ефимова, В. Г., Кравченко, А. В., Верзилов, А. П. (2018). Гидродинамические и физико-химические процессы в промежуточных ковшах для непрерывного литья стали. Киев: Наукова думка, 264.
11. Cho, S.-M., Kim, S.-H., Thomas, B. G. (2014). Transient Fluid Flow during Steady Continuous Casting of Steel Slabs: Part I. Measurements and Modeling of Two-phase Flow. *ISIJ International*, 54 (4), 845–854. doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.845>
12. Cho, S.-M., Kim, S.-H., Thomas, B. G. (2014). Transient Fluid Flow during Steady Continuous Casting of Steel Slabs: Part II. Effect of Double-Ruler Electro-Magnetic Braking. *ISIJ International*, 54 (4), 855–864. doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.855>
13. Wang, E. (2015). Progress of some techniques on electromagnetic metallurgy. Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2015”. Cannes.
14. Louhenkilpi, S., Law, W., Serna, M., Välimaa, K., Leuverink, D., Rodríguez Durán, T. et. al. (2013). Active tundish metallurgy. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: <http://doi.org/10.2777/62336>

15. Yue, Q., Zhang, C. B., Pei, X. H. (2017). Magnetohydrodynamic flows and heat transfer in a twin-channel induction heating tundish. *Ironmaking & Steelmaking*, 44 (3), 227–236. doi: <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1209919>
16. Dubodelov, V., Smirnov, A., Pogorsky, V., Goryuk, M. (2006). The magnetodynamic tundish for continuous casting of steel. *Proceedings of the 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2006”*. Sendai, 114–119.
17. Wang, G., Yun, M., Zhang, C., Xiao, G. (2015). Flow Mechanism of Molten Steel in a Single-Strand Slab Caster Tundish Based on the Residence Time Distribution Curve and Data. *ISIJ International*, 55 (5), 984–992. doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.984>
18. Горюк, М. С., Дубоделов, В. І., Богдан, К. С., Фікссен, В. М., Погорський, В. К. (2003). Пат. № 66035 UA. Проміжний ківш машини безперервного лиття заготовок. № 2003076633; заявл. 15.07.2003; опубл. 15.04.2004, Бюл. № 4.
19. Погорський, В. К., Богдан, К. С., Дубоделов, В. І., Горюк, М. С., Фікссен, В. М. (2004). Пат. № 67965 UA. Спосіб управління витратою металевого розплаву. опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7.
20. Идельчик, И. Е. (1975). *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. М.: «Машиностроение», 560.
21. Ефимов, В. А., Анисович, Г. А., Бабич, В. Н. и др. (1991). *Специальные способы литья*. М.: Машиностроение, 436.