

Міністерство освіти і науки України  
Департамент освіти і науки Дніпропетровської облдержадміністрації  
Дніпропетровське територіальне відділення МАН України

Відділення: Технічних наук  
Секція: Технологічні процеси та  
перспективні технології

ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРОМІЖОГО КОВША  
ЗА ДОПОМОГОЮ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Роботу виконала:  
Бондарь Поліна Степанівна,  
учениця 11-го класу  
Криворізької педагогічної гімназії

Наукові керівники:  
Лялюк Віталій Павлович,  
доктор технічних наук,  
професор Криворізького металургійного  
інституту ДВНЗ «КНУ»  
Лінчук Інна Леонідівна,  
вчитель фізики Криворізької педагогічної  
гімназії, вчитель-методист

**Тези**  
**ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРОМІЖОГО КОВША ЗА**  
**ДОПОМОГОЮ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Бондарь Поліни Степанівни

Дніпропетровське відділення МАН України

Криворізька педагогічна гімназія; 11 клас; м. Кривий Ріг;

наукові керівники: Лялюк Віталій Павлович, доктор технічних наук, професор Криворізького металургійного інституту ДВНЗ «КНУ», Лінчук Інна Леонідівна, вчитель фізики Криворізької педагогічної гімназії.

**Актуальність роботи:** створення, розвиток і модернізація машин, агрегатів і елементів металургійних технологічних комплексів - найважливіше завдання сучасної промисловості, вирішення якого забезпечує підвищення продуктивності і якості металургійної продукції, що випускається. Виконання цього завдання прямо пов'язане із сучасним високопродуктивними технологічними системами безперервного розливання сталі.

**Мета роботи** – експериментальні дослідження направлені на підвищення якості безперервнолитної заготовки; конструювання і створення проміжних ковшів МБЛЗ із ефективними системами розподілу потоків сталі в його обсязі.

**Основні наукові та практичні результати роботи:**

1. Проведення аналізу поведінки потоків рідкої сталі та її витікання з металоприймача в залежності від його конструкції; розробка пропозицій щодо підвищення технологічної варіативності металургійного підприємства
2. Результати експериментальних досліджень процесів під час безперервної розливки у проміжному ковші МБЛЗ підтверджують доцільність застосування спеціально розроблених конструкцій металоприймача.
3. Отримані в ході експерименту результати показали, що під час безперервної розливки сталі для отримання якісної заготовки є важливим не тільки конструкція металоприймача, а технологія обробки сталі в залежності від її марки та вихідних властивостей.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ 1. ОСНОВИ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ.....	7
1.1. Загальні відомості про процес безперервного розливання сталі.....	7
1.2. Загальні принципи системи технологій безперервного лиття, архітектура й основні функціональні вузли МБЛЗ.....	7
Розділ 2. ВВЕДЕННЯ В ПРАКТИЧНУ ЧАСТИНУ.....	13
2.1. Розвиток конструкції металоприймачів для промковшів високопродуктивних сортових МБЛЗ.....	13
2.2. Способи обробки сталі в промковшах.....	16
2.2.1. Обробка сталі синтетичними шлаками і твердими шлакоутворюючими сумішами.....	16
2.2.2. Обробка сталі в промковші за допомогою нейтральних газів.....	17
2.2.3. Поліпшення якості та лиття металу шляхом обробки його елементами, що містять кальцій.....	17
Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТОКІВ РІДКОЇ СТАЛІ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МБЛЗ.....	20
3.1. Фізичне моделювання процесів руху рідкого металу в промковші.....	20
3.2. Хід експерименту.....	24
3.3. Експеримент № 1.....	26
3.4. Експеримент № 2.....	28
3.5. Експеримент № 3.....	30
Розділ IV. МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	32
4.1. Експеримент № 1.....	32
4.2. Експеримент № 2.....	34
4.3. Експеримент № 3.....	35
Висновки.....	37
Список використаної літератури.....	38

## СПЕЦІАЛЬНІ ТЕРМІНИ

1. МБЛЗ – машина безперервного лиття заготовки.
2. Кювета – ємність, призначена для вимірювання оптичної щільності розчинів в фотометрах, спектрофотометрах, колориметрії, флуориметр, мікроколориметрах, гемоглобінометр та інших приладах за допомогою яких вимірюють оптичні щільності забарвлених розчинів досліджуваних речовин в спектральному діапазоні поглинання речовин.
3. Фотометр - прилад, призначений для вимірювання фотометричних величин: освітленості, сили світла, світлового потоку, яскравості, коефіцієнта пропускання і коефіцієнта відбиття.
4. Кореляція - залежність двох випадкових величин.
5. Коефіцієнт кореляції - коефіцієнт, що характеризує ступінь залежності між двома випадковими величинами.
6. Нейтральні гази - гази, що являються інертними і не взаємодіють з системою, утворюючи нові сполуки.
7. Синтетичні шлаки - розплав, що готується зазвичай з оксиду кальцію і глинозему в печах (як правило, дугових). Використовується для рафінування рідкої сталі для десульфурзації і розкислення металу. Обробка сталі синтетичними шлаками прискорює фізико-хімічні реакції, збільшує повноту їх перебігу і покращує якість сталі.
8. Кінематична в'язкість, кінематичний коефіцієнт в'язкості - відношення звичайного коефіцієнта в'язкості (званого також динамічним) до щільності речовини.

## ВСТУП

Останнім часом в області технологій розливання сталі спостерігаються істотні зміни, спрямовані на збільшення продуктивності МБЛЗ і підвищення якості сталей, що розливаються. Це обумовлено розвитком досліджень, пов'язаних з металургійними й гідродинамічними процесами, що відбуваються в проковші в ході розливання.

Узагальнюючи дані відомих досліджень, слід зазначити, що для підвищення чистоти сталі в проковші необхідно контролювати процес плинину рідкого металу й установлювати оптимальний рівень симетричності й динаміки переміщення потоків у рідкій ванні. Розв'язок таких завдань вимагає вдосконалення внутрішньої конфігурації проковша, що дозволяє інтенсифікувати трансформацію турбулентної кінетичної енергії в зоні пливу металу. Як наслідок, у рідкій ванні проковша збільшується обсяг зон із квазіламінарним рухом потоків і зменшується частка так званих «мертвих» зон, що сприяє флотації неметалічних включень, а також усередненню сталі по хімічному складу й температурі. При формуванні в проковші зон з турбулентним характером руху потоків (наприклад область шлакового поясу, що прилягає до зони падіння струменя) у цьому місці спостерігається підвищене зношування шару футерівки й інтенсивне перемішування сталі з покривним шлаком внаслідок виникаючого бурління.

При розливанні наддовгими серіями (30-40 плавок і більше) активний контакт торкрет-шару проковша зі шлаком становить кілька десятків годин (при періодичній зміні рівня металу), що практично виключає можливість ефективного застосування високо стійких вогнетривів без додаткових заходів щодо їхнього захисту.

Тому **метою** даної **роботи** є дослідження, направлені на підвищення якості безперервнолитої заготовки шляхом розвитку методів конструювання й створення проміжних ковшів МБЛЗ та їх елементів, зокрема металоприймачів, із ефективними системами розподілу потоків сталі в його обсязі.

**Об'єкт дослідження:** спеціалізована прозора фізична модель проковша і металоприймача сортової МБЛЗ зі світлопроникного матеріалу (оргскла), що включає всі основні функціональні вузли. Обраний масштаб моделі (1:4)

**Предмет дослідження:** способи передачі металу у простір проміжного ковша через отвори металоприймача, технологічні та гідродинамічні процеси в обсязі проміжного ковша в залежності від конструкції отворів металоприймача.

**Актуальність:** теоретичними та експериментальними дослідженнями показано, що при впровадженні у виробництво проміжного ковша в залежності від конструкції отворів металоприймача може бути отриманий значний економічний ефект, прискорення розвитку та модернізації машин, агрегатів і технологічних елементів сучасної промисловості, підвищення продуктивності і якості металургійної продукції, що випускається.

Результати даної роботи мають практичну важливість при впровадженні спеціальної конструкції металоприймача в умовах металургійних підприємств.

**Гіпотеза:** Якість вихідного продукту при розливці можна отримати завдяки впровадженню спеціальних конструкцій проміжного ковша в залежності від марки сталі.

**Задачі дослідження:**

1. Дослідити існуючі теоретичні відомості щодо суті процесів, що відбуваються при безперервній розливці сталі.
2. Створити власний метод вдосконалення технологічних операцій при безперервному розливанні сталі на виробництві.
3. Провести експеримент, що підтверджує викладені міркування.

## РОЗДІЛ 1

### ОСНОВИ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ

#### 1.1. Загальні відомості про процес безперервного розливання сталі

Ідея розливання металу в безперервному режимі належить Г. Бессемеру: ним у 1856 р. була запатентована схема розливання металу між двома роликами, які оберталися. Надалі більшість дослідників прагнула створити машини безперервного розливання заготовок з використанням мідного кристалізатора коробчастого типу, розміщеного вертикально з водяним охолодженням. Найбільший технологічний ривок був забезпечений при цьому З. Юнгхансом, який сформулював концепцію зворотно-поступального руху кристалізатора з метою надання йому деякого переміщення щодо поверхні заготовки і запобігання прилипання твердої її скоринки до стінок кристалізатора (патент 1936 р.).

#### 1.2. Загальні принципи системи технологій безперервного лиття, архітектура й основні функціональні вузли МБЛЗ.

Для досягнення твердого стану заготовки необхідно відвести деяку кількість тепла в навколишнє середовище протягом певного часу. Для нормального процесу охолодження необхідно забезпечити рух заготовки з певною швидкістю за регламентованого відведення тепла (охолодження водою).

Загальна схема розливання сталі з позначенням основних функціональних вузлів і механізмів подана на рисунку 1.1.

До основних функціональних елементів МБЛЗ (рис. 1.1.) можна віднести:

- сталерозливний стенд (1) - призначений для розміщення на ньому сталерозливних ковшів (2), передання їх з резервного положення в положення розливання і назад, забезпечення серійного розливання, підняття і опускання ковшів під час розливання, а також для безперервного зважування ковшів з металом;

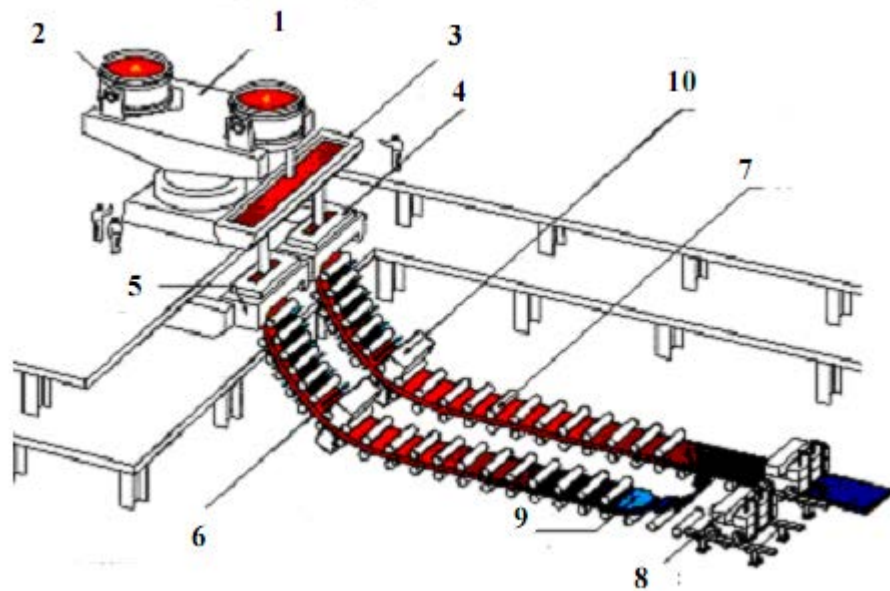


Рис. 1.1. Загальна схема розливання сталі на МБЛЗ

- візок промковша - потрібен для втримання його під час розливання і переміщення з резервної позиції в робочу;

- промківш (3) - забезпечує надходження металу в кристалізатор з певною витратою, добре організований струмінь, дозволяє розливати сталь у декілька кристалізаторів одночасно і здійснювати серійне розливання методом «плавка на плавку» змінюючи сталерозливні ковші без припинення і зниження швидкості розливання; проміжний ківш є буферною ємністю, тому що з його допомогою узгоджується надходження металу зі сталерозливного ковша в кристалізатор;

- кристалізатор (4) - призначений для приймання рідкого металу, формування зливка заданого перерізу і первинного його охолодження (виконується з міді і охолоджується в процесі розливання водою);

- механізм зворотно-поступального руху кристалізатора (5) - створює умови, що знижують імовірність виникнення проривів кірки зливка на виході з нього, а також забезпечує повне «заліковування» місця розриву, що виник під час руху зливка в кристалізаторі;

- зона вторинного охолодження (ЗВО) - дозволяє створити оптимальні умови для повної кристалізації безперервнолитого зливка, що забезпечує рівномірне охолодження заготовки (розпилення води форсунками (6)), підтримку її геометричної форми (7) (запобігання випинанню) і необхідну якість металу;



- тягнучо-правильна машина (ТПМ) - призначена для витягування литої заготовки із кристалізатора, випрямлення її на радіальних і криволінійних пристроях і подавання;

- машини (механізму) для різання; ТПМ забезпечує подавання затравки в кристалізатор, утримання її в кристалізаторі на час ущільнення зазорів, витягування з безперервнолитою заготовкою із кристалізатора, відділення головки затравки від заготовки і т.п.;

- машина (механізм) для різання заготовок (8) - забезпечує поділ безперервнолитого металу на мірні довжини відповідно до вимог споживачів;

- затравка (9) - призначена для утворення тимчасового «дна» в кристалізаторі перед початком розливання і наступного витягування зі зчепленою заготовкою ТПМ;

- електромагнітне перемішування (ЕМП) (10) - дозволяє значно підвищити якість сталі за рахунок створення направлених конвективних потоків рідкого металу в різних перерізах зливка.

Процесу безперервного розливання сталі на МБЛЗ обов'язково передує цілий комплекс підготовчих і допоміжних операцій, основними з яких є: футерування проміжного ковша, його сушіння і підігрів до температури 900-1100 °С; установа промковша в робоче положення над кристалізаторами; установа затравок і холодильників у внутрішній порожнині кристалізаторів; транспортування сталерозливного ковша від установки позапічної обробки до МБЛЗ і установа його на поворотний стенд та ін. Ще раніше перевіряється функціонування всіх вузлів і механізмів, а також КВП і автоматики.

Розливання сталі починається з відкриття шиберного затвора сталерозливного ковша. Подавання металу зі сталерозливного в проміжний ківш здійснюється відкритим або закритим струменем через вогнетривку захисну трубу (рис. 1.2.).

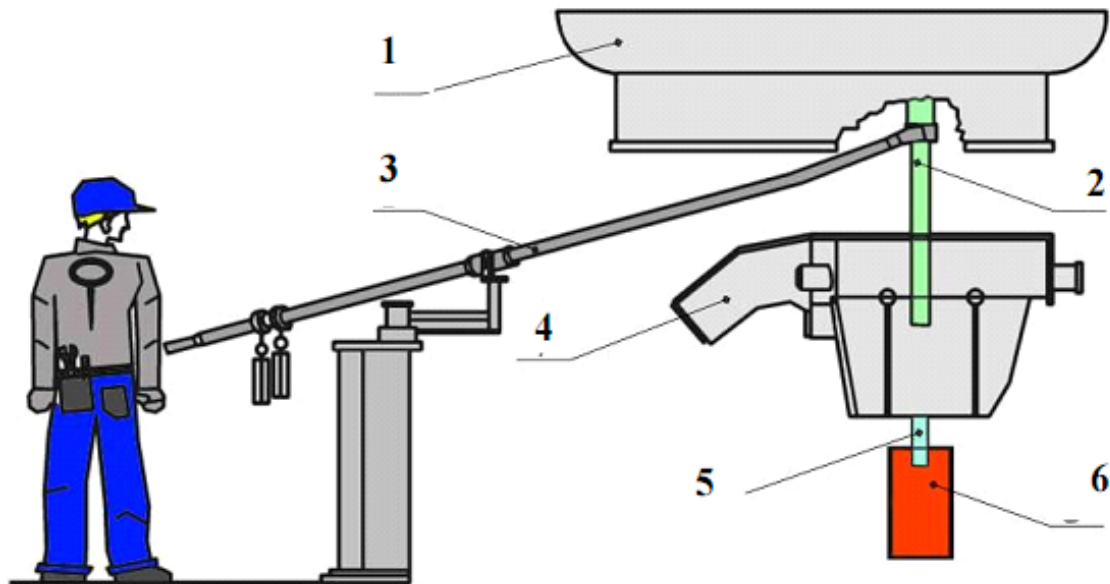


Рис. 1.6. Схема переливу сталі зі сталерозливного ковша в промківш закритим струменем через захисну трубу, установлену маніпулятором: 1 - сталерозливний ківш; 2 - захисна труба; 3 - маніпулятор; 4 - проміжний ківш; 5 - заглибний стакан; 6 – кристалізатор.

Після заповнення промковша металом на 30-40 % його номінальної ємності починається подавання сталі в кристалізатори. Регулювання витрат сталі, що витікає із промковша в кристалізатор, може здійснюватися за допомогою лиття через калібровані стакани-дозатори за підтримки заданої висоти наливу металу в промковші, а також зміною положення головки стопора щодо стакана-дозатора в промковші.

Під час наповнення внутрішньої порожнини кристалізатора металом починається процес руху затравки до низу. При цьому швидкість витягання заготовки визначається товщиною і механічною міцністю твердої кірки заготовки на виході із кристалізатора, що необхідна для запобігання проривів рідкого металу по ходу розливання.

У процесі розливання кристалізатор робить зворотнопоступальні рухи з певною частотою і амплітудою, що запобігає прилипанню твердої кірки заготовки до поверхні кристалізатора. Рівень металу в кристалізаторі підтримується постійним, що забезпечує підвищення якості поверхні заготовки і стабілізує процес

ЛІТТЯ.

Розливання металу може одночасно здійснюватися на 1-2 струмках для слябових МБЛЗ і на 1-8 струмках для блюмових і сортових МБЛЗ. Вибір кількості струмків здійснюється з міркувань забезпечення необхідної продуктивності МБЛЗ і ритмічності функціонування сталеплавильних агрегатів стосовно конкретного сталеплавильного цеху.

Після виходу із кристалізатора заготовка проходить через ЗВО, довжина якої може становити 8-35 м залежно від умов розливання (переріз заготовки, марка сталі, швидкість розливання та ін.).

Продуктивність МБЛЗ (т/хв.) може бути визначена за формулою

$$\Pi = b \cdot s \cdot v_c \cdot \rho \cdot n, \quad (1.1)$$

де  $b$  і  $s$  - товщина і ширина заготовки, м;  $v_c$  - швидкість витягування заготовки м/хв.;  $\rho$  - щільність сталі ( $\sim 7,6$  т/м);  $n$  - кількість струмків, шт.

Охолодження заготовки здійснюється в основному водою або водоповітряною сумішшю, що розпоршується спеціальними форсунками, які встановлені по ходу руху заготовки. Заготовка рухається по підтримувальних роликах, установлених уздовж технологічної осі.

При цьому довжина ділянки, на якій заготовка повністю кристалізується, приблизно визначається за емпіричною формулою (м)

$$L_s = (0,25 \cdot b^2 \cdot v_c) / K^2, \quad (1.2)$$

де  $K$  - коефіцієнт затвердіння, м/хв<sup>0,5</sup>, який для сляба становить 0,025-0,027, для блюма 0,028-0,030, а сортової заготовки 0,031-0,033.

Після виходу із ЗВО заготовка проходить ТПМ, потім відділяється затравка і заготовка подається на машину різання, де вона ділиться на мірні довжини і потім маркується. Відрізана мірна заготовка (зазвичай 6-12 м) транспортується до пристрою поперечного транспортування заготовок, де передається на холодильник.

Розливання сталі здійснюється серіями з декількох сталерозливних ковшів (10-25 ковшів і більше). При цьому заміна порожнього сталерозливного ковша на повний здійснюється шляхом зміни позиції поворотного стенда. Ця операція називається перековшовкою. Час заміни сталерозливного ковша становить, зазвичай, 90-120 секунд. У цей час розливання триває у звичайному режимі (або зі

зменшенням швидкості руху заготовки ) за рахунок металу, що перебуває в промковші.

Регулювання швидкості розливання (витягування заготовки) здійснюється двома способами: шляхом регламентування витрати металу, що витікає із промковша і зміни швидкості витягування заготовки.

Завершення процесу розливання здійснюється припиненням витікання металу зі сталерозливного, а потім і із промковша. При цьому в промковші залишається певний залишок рідкого металу (висота шару 200-300 мм), що перешкоджає потраплянню шлаків із промковша в кристалізатор. Після припинення подавання металу із промковша рух заготовки припиняється, що дозволяє «застудити» верхню частину заготовки з метою запобігання виливання металу через край. Із цією метою із дзеркала металу в кристалізаторі видаляється шлак і на нього подається вода. Далі заготовка продовжує свій рух і повністю виводиться із МБЛЗ.

До основних параметрів безперервного розливання можна віднести:

$V_p$  - швидкість розливання (0,3-2,5 м/хв для блюмових МБЛЗ; 0,6-2,5 м/хв. для слябових МБЛЗ; 4-6 м/хв для сортових МБЛЗ);

$L_p$  - робоча металургійна довжина МБЛЗ (7-10 м для вертикальних МБЛЗ; 15-35 м для радіальних і криволінійних МБЛЗ);

$R_v$  - загальна витрата води на охолодження (1,3-2 л/т для сортової заготовки; 0,3-1,2 л/т для блюма і сляба);

$\eta$  - продуктивність МБЛЗ (0,2-0,25 млн. т на рік на 1 струмок сортової і блюмової МБЛЗ; 1,2-1,5 млн т на рік на 1 струмок слябової МБЛЗ).

Основні втрати металу під час безперервного розливання сталі зумовлені:

- обрізку головної частини зливка (0,4-0,5 м);
- обрізку хвостової частини заготовки через усадку (2-3 м);
- залишком металу в промковші після розливання («козел» 5-10 т);
- вирізанням по заглибному стакану у випадку його заміни (0,4-0,6 м);
- втратами з окалиною і на різання - до 0,2 % від маси розливаної сталі.

## РОЗДІЛ 2

### ВВЕДЕННЯ В ПРАКТИЧНУ ЧАСТИНУ

#### 2.1. Розвиток конструкції металоприймачів для промковшів високопродуктивних сортових МБЛЗ

Сучасні тенденції розвитку технологій виробництва і розливання сталі характеризуються жорсткістю вимог від металопродукції. При цьому все більшого значення набуває система технологічних операцій, яка спрямована на поліпшення якості безперервнолитої заготовки, в тому числі і за рахунок рафінування сталі в ковші і промковші. В даний час багато дослідників розглядають процес безперервного розливання сталі як завершену стадію, яка безпосередньо впливає на якість металопродукції.

Сучасний промківш (рис. 2.1.) виконує різноманітні функції. Він є буферною ємністю, так як за його допомоги узгоджується дискретне надходження сталі з сталерозливного ковша в проміжний і неперервне надходження сталі з промковша в кристалізатор. При цьому забезпечується усереднення поції металу, що надходить і запобігання потрапляння шликів в кристалізатор. Передбачається, що конструкція проміжного ковша повинна забезпечити мінімальні втрати тепла металу під час всього циклу.

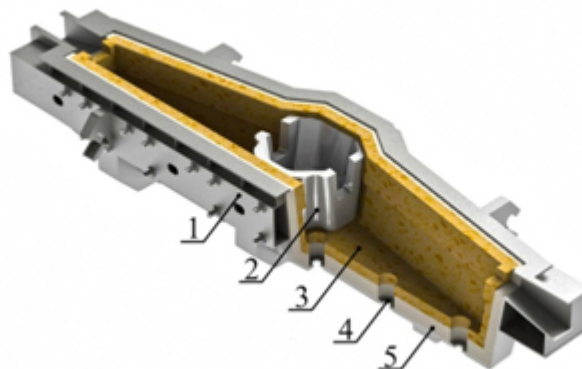


Рис. 2.1. - загальний вигляд 6-ти струмкового промковша сортового МБЛЗ: 1 - кожух промковша; 2 – металоприймач; 3 - робочий шар; 4 - склянка-дозатор; 5 - арматурний шар

Крім того, промковш забезпечує надходження металу в кристалізатор із певною витратою, забезпечуючи добре організований струмінь. Він дозволяє розливати сталь в декілька кристалізаторів одночасно та здійснювати серійну розливку методом плавка на плавку при зміні сталі розливочних ковшів без зупинки та зниження швидкості розливки.

Конструкція промковша повинна враховувати наступні основні фактори: кількість і розташування струмків МБЛЗ, переріз заготовок, що розливаються, регулювання процесів витікання металу із промковша, спосіб початку процесу розливки, метод видалення шлаку і залишків металу, оснащення промковша спеціальними пристроями та приладдями, характер руху конвективних потоків металу, можливість рафінування металу в промковша, кількість послідовно розливаємих плавків в серії та ін.

Геометричну форму промковша вибирають по можливості простою та наближеною до паралелепіпеда. В світовій практиці найбільшого поширення отримали багато струмкові МБЛЗ з кількістю струмків від 5 до 6 [27, 28].

Класифікація промковшів багато струмкових сортових МБЛЗ приведена на рис. 2.2, і базується на кількості струмків – парна чи непарна.

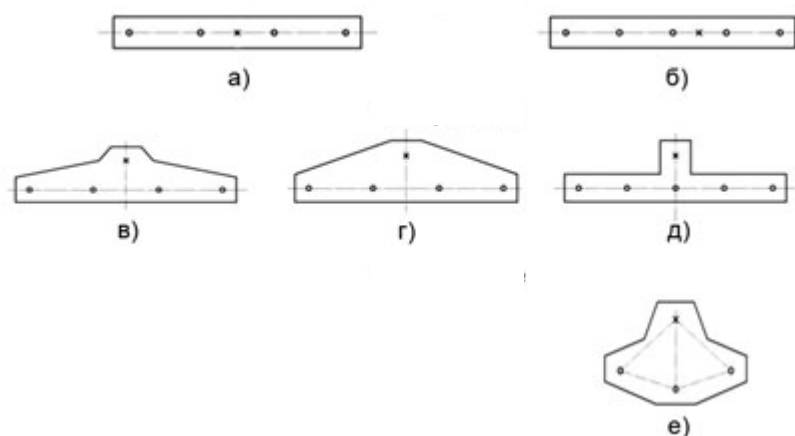


Рис. 2.2. Характерні геометричні форми промковшів багато струмкових сортових МБЛЗ: а) чотирьох струменевий В-образний з симетричною подачею; б) п'яти струменевий В-образний з несиметричною подачею; в), г) чотирьох струменевий Т-образний; д) п'яти струменевий Т-образний; е) трьох струменевий W-образний

Концепція створення метало приймачів розвивалась багатьма вогнетривкими фірмами, про що свідотствує велика різноманітність патентів та наукових статей [13-15].

Враховуючи конструкційні і технологічні особливості, сучасні метало приймачі можна розділити на два основних типи: «турбостоп» (рис. 2.3.) і «колодязь» (рис. 2.4.).

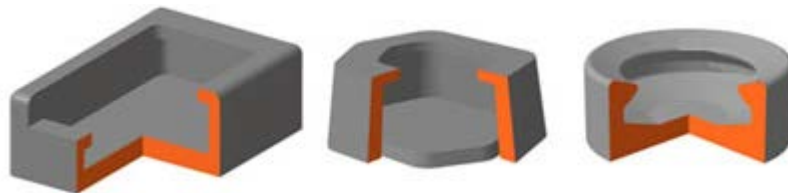


Рис.2.3. - Металоприймачі типу «турбостоп» різних фірм виробників.

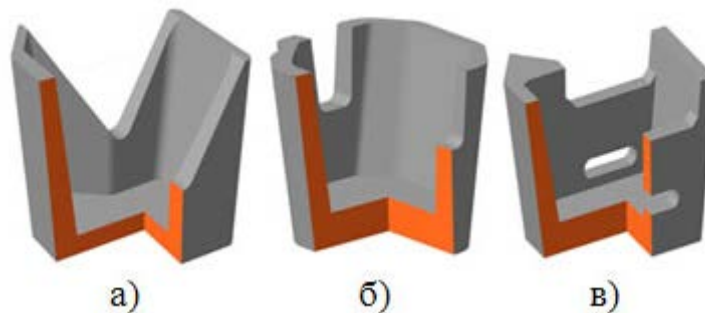


Рис. 2.4. - Металоприймачі типу «колодязь» різних фірм виробників.

Металоприймачі типу «турбостоп» виконують роль улавлювача струменя металу, що падає з сталерозливного ковша, і забезпечують її максимальне гальмування. Ефективна робота металоприймача типу «турбостоп» лімітується не тільки геометричними і характеристиками міцності, але також залежить від його хімічного складу, який підбирається індивідуально для конкретного споживача.

Незважаючи на численні переваги металоприймачів типу «турбостоп», вони не можуть забезпечити ефективний захист футерування в зоні шлакового поясу, що значною мірою обмежує серійність розливання. Альтернативним варіантом, в аспекті захисту шлакового поясу і підвищення експлуатаційного ресурсу футерування проміжного ковша є металоприймачі типу «колодязь». Як правило, такі металоприймачі використовують для промковшів багатострумкових сортових МБЛЗ при розливанні відкритим струменем [16].

Існує безліч конструктивних виконань такого металоприймача. Всі вони забезпечують максимальний захист стінок і днища промковша від негативного впливу конвективних потоків за рахунок гальмування струменя, а також завдяки наявності вирізів (вікон) у верхній частині (рис. 2.4 а, б) металоприймача, або випускних отворів в корпусі (рис.2.4 в), які рівномірно розподіляють рідкий метал по струменям МБЛЗ.

## 2.2. Способи обробки сталі в промковшах

### 2.2.1 Обробка сталі синтетичними шлаками і твердими шлакоутворюючими сумішами

Синтетичним шлаком називають шлак, що призначений для обробки сталі в ковші, який отримують зовні сталеплавильного агрегату.

Синтетичні шлаки виплавляють в електропечах, циклонних плавильних установках та інших агрегатах. Рідкий шлак у необхідній кількості зливають в сталерозливних ківш, який подають під випуск. В процесі випуску струмінь падаючого в ківш металу емульгує шлак і метал з наступним поділом фаз. В результаті емульгування різко збільшується площа поверхні розділу шлак-метал і швидкість протікають реакцій. Результати обробки визначаються висотою падіння струменя металу, масою металу і шлаку, фізичними характеристиками і складом шлаку і т. і. Зазвичай обробка дозволяє в ході випуску плавки отримувати ступінь десульфуратії сталі котра дорівнює 30-70%. Найбільш ефективна десульфуратія металу спостерігається при випуску плавки з великотонажних агрегатів.

Використання самоплавких шлакових сумішей істотно спростило технологію одержання синтетичних шлаків. Однак, після декількох великих пожеж у відділеннях підготовки сумішей металургійні підприємства СРСР від їх використання відмовилися.

В даний час для позапічної десульфуратії стали успішно використовують тверді шлакоформуєчі суміші з 10-30% шпату і вапна. Під час ходу випуску плавки суміш разом з розкислителями і легуючими завантажують у ківш, при



цьому плавлення суміші зазвичай завершується протягом 1-2 хвилин.

Особливість цієї технології полягає в тому, що однорідний шлак виходить при наповненні другої половини ковша, коли потужність перемішування сталі і шлаку, що падає в ківш струменем металу значно зменшується. У зв'язку з цим десульфуруюча здатність шлаку використовується не повністю. Тому після випуску плавки доцільно проводити додаткове перемішування шлаку і металу продувкою в ковші аргоном.

### 2.2.2. Обробка сталі в промковші за допомогою нейтральних газів

Для глибокого рафінування сталі в металургійній практиці широко застосовується продування аргоном через блоки (балки), встановлені безпосередньо у днищі проміжного ковша. За даними різних дослідників продування інертним газом в промковші дозволяє скоротити кількість неметалічних включень розміром більше 50 мкм на 70%, а включень розміром 25-50 мкм - на 40%. Між тим, в промислових умовах ефект видалення неметалевих включень досягається переважно при продувці сталі в бульбашковому режимі при порівняно низьких витратах аргону що вдувають. При цьому збільшення витрати більш певних (критичних) значень призводить до зниження ефекту рафінування внаслідок інтенсифікації перемішування металу і шлаку в області виходу бульбашок аргону на поверхню рідкої ванни.

Розвиток технології продувки сталі інертним газом в проміжному ковші останнім часом фокусувався на досягненні двох цілей: забезпечення рівномірного перемішування рідкої ванни, що сприяє збільшенню площі поверхні розділу фаз «газ-рідина-включення» і транспортування неметалевих включень до шлаку, який захищає дзеркало металу.

### 2.2.3. Поліпшення якості та лиття металу шляхом обробки його елементами, що містять кальцій

Як відомо, властивості металопрокату залежать від хімічного складу,

кількості, величини, характеру розподілу і морфології неметалічних включень. В даний час більшість сталей розкисляють алюмінієм, який не тільки технологічний як розкислювач, а також є дієвим модифікатором, що забезпечує отримання більш щільної структури із заданим дрібним зерном і хороших показників пластичності і в'язкості.

Основним завданням обробки кальцієм рідкої сталі, що розкислюється алюмінієм, є модифікування твердих включень глинозему в рідкі комплексні, які можуть частково видалятися до шлаку при позапічній обробці сталі аргонном в сталерозливному ковші. При цьому розчинений кальцій, що з'єднується з включеннями глинозему, утворює алюмінати кальцію різного складу, кількість яких росте пропорційно кількості розчиненого кальцію.

При  $1600^{\circ}\text{C}$ , коли вміст  $\text{CaO}$  в алюмінатах досягає 40%, вони переходять з твердого стану в рідкий. З підвищенням вмісту  $\text{CaO}$  до 60% фазовий стан алюмінатів знову змінюється, і при 60%  $\text{CaO}$  рідкими залишаються лише модифіковані включення. У трьохконтентній фазовій системі  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  кожна зона визначає різні властивості включень - рідкі або тверді, і характеристики їх деформації - пластичні або непластичні

Для того, щоб отримати бажане відношення  $\text{Ca}/\text{Al}$ , необхідно знати ступінь засвоєння кальцію металом в технологічному процесі. Встановлено, що вона складає не менше 15-25% при обробці порошковим  $\text{SiCa}$ -дротом і зазвичай менше 15% при інжекції порошку кальцію в метал. Крім того, при обробці дротом засвоєння кальцію більш стабільне.

Кількість кальцію, що необхідно модифікувати слід визначати в залежності від кількості включень глинозему, що залишився в рідкій сталі, щоб вони могли бути переведені в рідкі алюмінати кальцію.

Як відомо, кальцій відноситься до активних десульфураторів. У зв'язку з цим необхідна ретельне коригування домішок кальцію в рідку сталь для забезпечення бажаної модифікації первинних включень глинозему.

При введенні кальцію в кількості меншій оптимальної, відбувається неповна модифікація включень глинозему в алюмінати кальцію з високою температурою плавлення, з іншого боку, при добавці  $\text{Ca}$  в кількості більшій оптимального

утворюються сульфіди кальцію, що також викликає зтягування сталерозливної склянки промковша МБЛЗ.

**Гіпотеза:** На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що якість безперервної заготовки залежить від багатьох параметрів процесу розливки. Суттєву роль відіграє технологія та спосіб обробки сталі. Таким чином, питання впровадження нових конструкційних рішень, котрі могли би використовуватись для реалізації різних ефективних способів обробки сталі є актуальним і важливим питанням в теорії сучасної безперервної розливки сталі.

В ході експериментальної частини данної роботи необхідно розглянути різні варіанти отворів в металоприймачи та їх вплив на конвекційні потоки в об'ємі проміжного ковша. На базі отриманих результатів необхідно запропонувати та обґрунтувати технологію обробки сталі.

В ході математичного аналізу стоїть задача графічного аналізу отриманих результатів та отримання кореляційних рівнянь, котрі могли би стати фундаментом для подальших досліджень.

## РОЗДІЛ ІІІ

### ЕКСПЕРИМЕНАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТОКІВ РІДКОЇ СТАЛІ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МБЛЗ

#### 3.1 Фізичне моделювання процесів руху рідкого металу в промковші

Оскільки промисловий експеримент при дослідженні металургійних систем і процесів пов'язаний з рядом труднощів (великі витрати на випробування, неможливість візуалізації характерних стадій процесу, складність виміру значень фізичних величин), у цей час для експериментальних досліджень складних високошвидкісних технологічних процесів у багатофазних системах, при екстремальних значеннях температури й тиску, активно використовуються методи фізичного моделювання.

Під фізичним моделюванням мають на увазі такий метод дослідження, при якому на моделі відтворюються й досліджуються процеси, якісно однакові із процесами, які протікають у реальних промислових апаратах і об'єктах. Основний зміст моделювання полягає в тому, щоб за результатами дослідів з моделями, які можна виготовити з меншими витратами засобів і часу, визначити найкращі характеристики натурального виробу (процесу), а іноді просто встановити невідомі раніше закономірності. Фізичне моделювання ґрунтується на глибокому проникненні в процес, у розробку експериментальних і теоретичних методів дослідження для одержання достовірних результатів і, у підсумку, - систематичних правил і рекомендацій, необхідних для розв'язку конкретних практичних завдань.

Такі дослідження сприяють кращому розумінню різних процесів переносу (наприклад, резидентного часу, спливання включень, переносу тепла і т.д.), що проходять у промковші. Розроблені комплексні й досить надійні фізичні моделі дозволяють виконати прогнози, конструкторські рішення й обчислювальні операції.

Точне знання параметрів потоку рідкої сталі (а саме, просторовий розподіл компонентів швидкості, турбулентна кінетична енергія і т.д.) у промковші є необхідною умовою для аналізу або оптимізації ефективності процесу. Тому для

вивчення гідродинамічних процесів і пов'язаних з ними процесів переносу усередині промковша сортової МБЛЗ зі світлопроникного матеріалу (оргскла) була створена його прозора фізична модель, що включає всі основні функціональні вузли. Обраний масштаб моделі (1:3) забезпечує візуальне спостереження за всіма гідродинамічними процесами, що протікають у промковші, практично в режимі реального часу. Схема модельного стенду, що імітує промківш пятиструмкового МБЛЗ (в роботі проведені дослідження з використанням двох струмків), наведено на рис. 3.1.

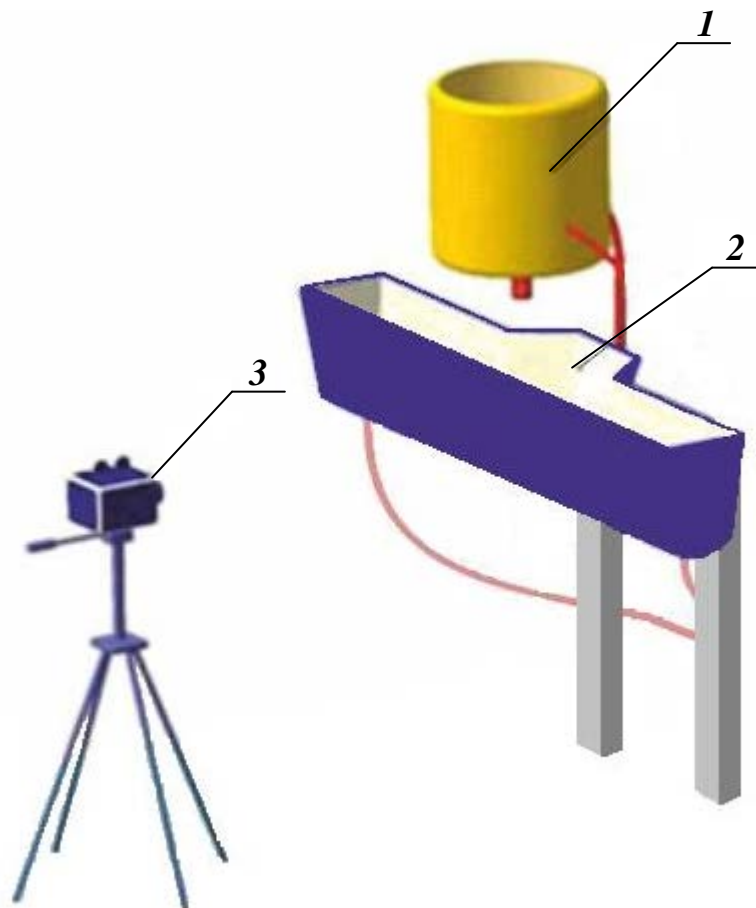


Рис. 3.1. Схема модельного стенду, що імітує промківш пятиструмкового МБЛЗ. 1- ємність що імітує сталерозливний ківш; 2 – промківш; 3 – цифрова відеокамера.

У якості робочої рідини, що моделює рідку сталь, використовується вода з температурою 18-25 °С. У таблиці 3.1 наведені фізичні властивості води при температурі 20 °С і сталі при температурі 1600 °С. З таблиці видно, що вода при 20°С і рідка сталь при 1600 °С мають практично однакову кінематичну в'язкість,

що дозволяє на зменшених гідравлічних моделях вивчати різні процеси масопереносу (режим потоку, характер перемішування, рух включень, впливання бульбашок газу і т.д.) у промковшах.

При вивченні ізотермічних стійких систем на зменшених моделях обов'язковими для дотримання є дві подоби між модельною й повномасштабною системою: геометрична й динамічна. Геометрична подоба означає фіксоване співвідношення кожного розміру в моделі відповідному до розміру повномасштабної системи. Динамічна подоба пов'язана з різними силами, що діють на струминний елемент, і вимагає тотожності відповідних сил у модельній і повномасштабній системі.

Таблиця 3.1.

Фізичні властивості води при температурі 20 °С та сталі при температурі 1600 °С

Параметр	Вода	Сталь
1	2	3
Молекулярна в'язкість, $\mu$ , кг/м*с	0,001	0,0064
Густина, $\rho$ , кг на м <sup>3</sup>	1000	7014
Кінематична в'язкість, $\nu = \mu/\rho$ , м <sup>2</sup> /с	10 <sup>-6</sup>	0,913·10 <sup>-6</sup>
Поверхневий натяг, $\sigma$ , Н/м	0,073	1,6

У гідравлічній системі промковша, що функціонує в стабільному й стійкому режимі з ізотермічним плином, рівновага між різними силами, що діють на струминний елемент, можна описати рівнянням Нав'є-Стокса [4].

$$N_{eu} = f(N_{re}, N_{fr}) \quad (3.1)$$

де  $N_{re}$  і  $N_{fr}$  - число Рейнольдса й число Фруда, відповідно.

Рівняння (3.1), що є основним для динамічної тотожності між двома геометрично подібними системами, може точно задовольняти модельній і повномасштабній системі промковша за умови, що геометричний масштабний коефіцієнт дорівнює одиниці. Це означає, що розміри модельної й

повномасштабної системи повинні бути тотожні. При дослідженнях на зменшених моделях, наприклад, з використанням води як модельної рідини стає неможливим одночасне дотримання рівності для критеріїв подоби Рейнольдса й Фруда, оскільки кінематична в'язкість води й рідкої сталі практично однакові. Тим часом при протіканні турбулентних процесів у металі, наприклад, у промковші, перенос імпульсу за допомогою сил молекулярного тертя вважається вторинним по ступеню важливості. Відповідно це означає, що число Фруда є домінуючим для потоків металу в промковшах МБЛЗ, і, отже, ці потоки регулюються в основному інерційними й гравітаційними силами, що діють на рідину.

Експериментальними дослідженнями, виконаними в роботі [11], показано, що в умовах турбулентного потоку величина числа Рейнольдса у різних промковшах незалежно від їхньої конфігурації й розмірів виявляється практично однаковою. Отже, основні умови динамічної подоби між модельним і повномасштабним промковшами, що функціонують у режимі турбулентного потоку, можна забезпечити рівністю чисел Фруда для цих об'єктів. При цьому для забезпечення умов виконання критерію Фруда необхідно забезпечувати відповідність припливу (витрати) води в модельній системі до швидкості припливу рідкого металу в повномасштабному промковші [11, 12].

Узагальнюючи численні дослідження в області фізичного моделювання процесів руху потоків у промковші, можна виділити наступні загальні підходи:

- у якості основного критерію гідродинамічної подоби більшість дослідників використовує критерій Фруда;
- у якості робочої рідини у фізичній моделі використовується вода, що забезпечує візуалізацію процесів, що протікають;
- при фізичному моделюванні перевага віддається зменшеним у кілька раз у порівнянні із промисловим об'єктом моделям, що суттєво знижує трудомісткість виконуваних експериментів;
- найважливішим елементом, що забезпечує коректність одержуваних у ході фізичного моделювання результатів, є дотримання повної геометричної подоби об'єктів, у тому числі й рівня наливу рідини в промковші;

### 3.2. Хід експерименту

Підготовка до експерименту. В якості моделюючої рідини була взята вода, так як нас цікавить гідродинамічна поведінка рідини в проміжному ковші, а вода при температурі 20 °С і сталь при температурі 1600 °С (середня температура рідкого металу при розливці) мають практично однакову кінематичну в'язкість (див. таблицю 3.1).

Ємність - проміжний ківш, виконаний з оргскла в масштабі 1:4 з металоприймачем відроподібної форми. Відроподібний тип металоприймача, а також модель проміжного ковша обрані після аналізу виробничого досвіду ПАТ «ЄМЗ» та досліджень Смірнова О.М. в ДонНТУ [17].

Подача чорнильної рідини здійснювалася таким чином: над металоприймачем розташовувалася ємність, в яку заливали потрібну рідину. Дана ємність мала спеціальну гумову трубку, розташовану в нижній частині. На трубці розміщувався кран, що дозволяє або регулювати швидкість подачі рідини через неї, або повністю її перекривати.

Для контролю і отримання якісної оцінки ступеня перемішування потоків рідини в обсязі проміжного ковша було прийнято рішення використовувати підфарбовану чорнилом воду, а вимірювання здійснювати за допомогою фотометра КФК-3-01 (рис. 3.2.).

Відбір проб для вимірювання здійснювався наступним чином: брали довгу голку і з її допомогою відбирали 3 мл рідини з певних точок за обсягом промковша (рис 3.3.). Використання тонкої голки дозволило нівелювати будь сторонне втручання в гідродинамічні процеси, що відбуваються в ході експерименту.

Відібрана рідина містилася в спеціальні кювети для фотометрії зі скла К-8, після чого вони містилися в фотометр і вимірювався їх коефіцієнт пропускання світла (КПС). В якості порівняльного кювету використовувалася ємність з дистильованою водою. Таким чином, КПС дистильованої води становить 100% (весь світловий потік пропускається), а КПС використовуваної чорнильної рідини - 0% (весь світловий потік не пропускається). Іншими словами, низький коефіцієнт світлопропускання означає, що в дану область здійснюється активна подача металу



і в цій точці потрібне здійснення технологічних операцій з обробки сталі.



Рис.3.2. Фотометр з досліджуваними кюветами.

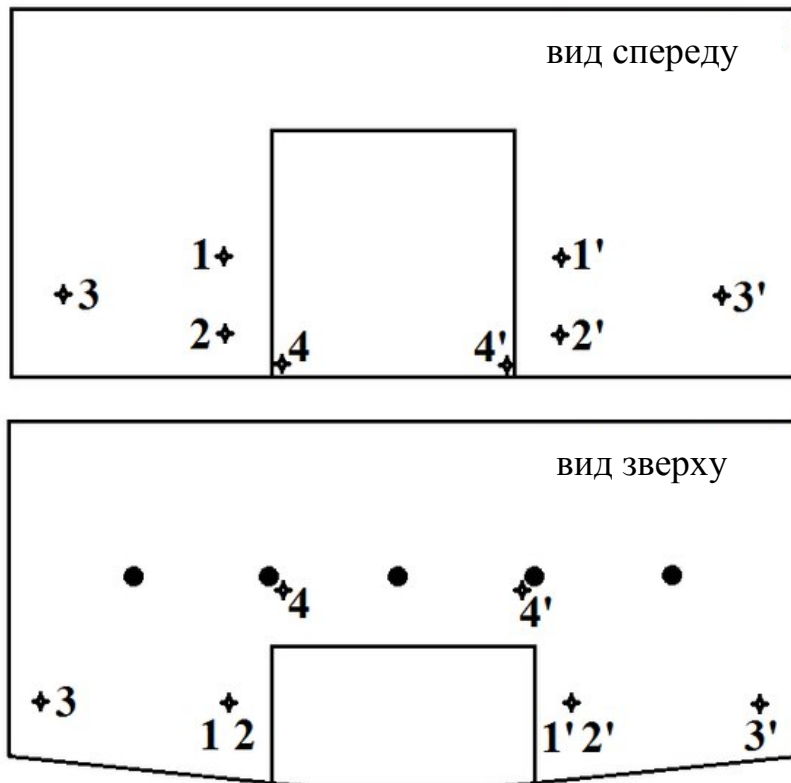


Рис. 3.3.

Сам експеримент проводився наступним чином:

1. Обсяг проміжного ковша заповнювався дистильованою водою (на 30-40 %).
2. Над промковшем розташовувалася ємність з рідиною, підфарбованою чорнилом (КПС=0 %), а трубка, розташована знизу цієї ємності розташовувалася в центрі металоприймача, та заглиблена під поверхню води на кілька сантиметрів.
3. Одночасно відкривався кран з подачею чорнильної рідини, а також два крана для відводу рідини з промковша, що імітують струмки безперервного розливання. Діаметр трубки, використовуваної для подачі чорнильної рідини дорівнював 1 сантиметру, а трубок для відводу - 0,7 сантиметра. Таким чином, площа поперечного перерізу трубки для подачі чорнила становила  $0,78 \text{ см}^2$ , а відведення -  $0,77 \text{ см}^2$ . Враховуючи невелику тривалість проведення експерименту (трохи більше 2 хвилин), різниця в поперечних перетинах не привела до істотного підвищення рівня рідини в проміжному ковші.
4. Фотознімки стану системи робилися на 30, 60, 90 і 120 секундах, а проби відбиралися через 5 секунд після зйомки.

### 3.3. Експеримент № 1 (з трьома нижніми отворами)

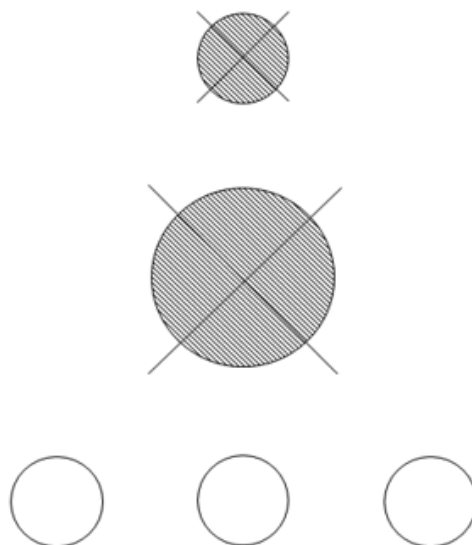


Рис. 3.4. Схема експерименту з трьома нижніми отворами.

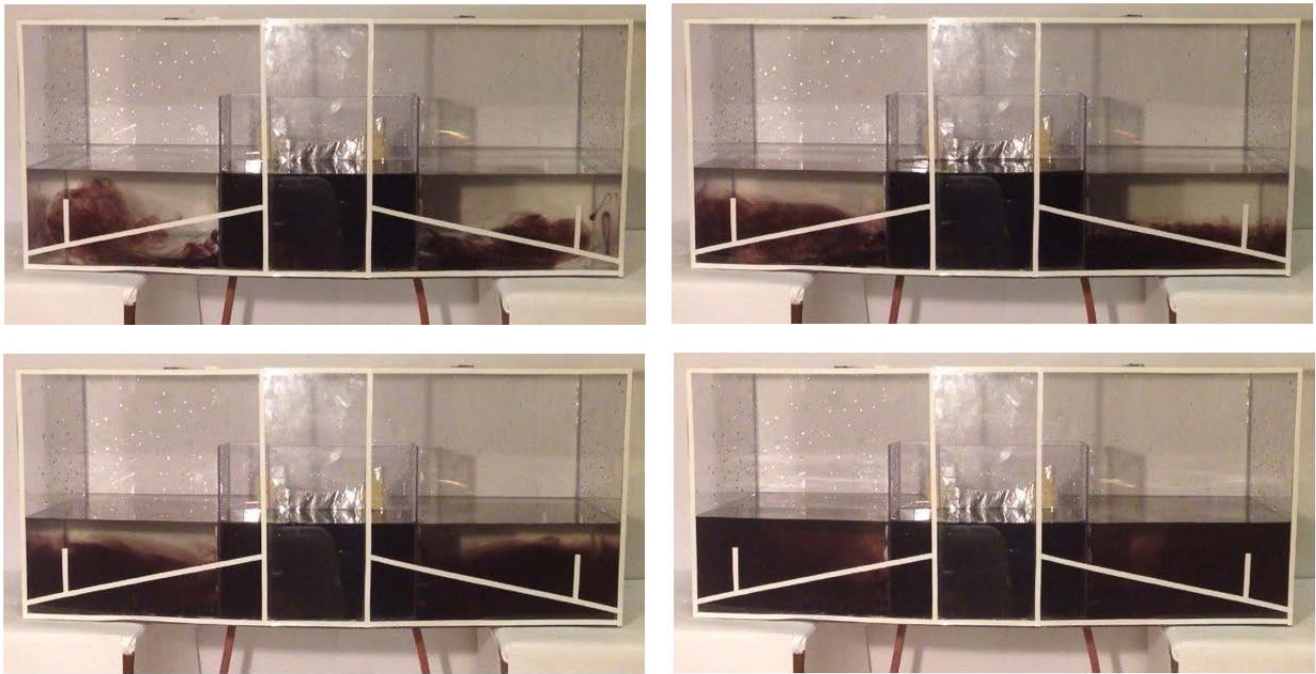


Рис. 3.5. Фото експерименту з трьома нижніми отворами.

Таблиця 3.2.

Результати експерименту експерименту з трьома нижніми отворами.

Рис. 3.4, 3.5 (3 нижніх отвори)							
35 секунд		65 секунд		95 секунд		125 секунд	
Точка	КПС*, %	Точка	КПС, %	Точка	КПС, %	Точка	КПС, %
1	100	1	100	1	97	1	34
1'	100	1'	100	1'	97	1'	34
2	42	2	27	2	15	2	0
2'	41	2'	25	2'	14	2'	0
3	63	3	51	3	22	3	2
3'	61	3'	51	3'	21	3'	2
4	100	4	95	4	65	4	21
4'	100	4'	95	4'	64	4'	21

\*КПС - коефіцієнт пропускання світла через рідину

Експеримент продемонстрував, що найменші показники коефіцієнта пропускання спостерігаються в нижній частині проміжного ковша, що й обумовлено обраною комбінацією отворів в металопріймачі. Примітно, що перше

падіння КПС в точці 4 (рис. 3.3.) (біля вихідного отвору) спостерігається в проміжку між 35 і 65 секундами. Це говорить про те, що після початку розливання, метал знаходиться в обсязі проміжного ковша досить тривалий проміжок часу і, якщо говорити про обробку шлаками, цього достатньо для ефективної взаємодії сталі з рафінуючі середовищем.

#### 3.4. Експеримент №2 (з великим середнім і нижнім маленьким отворами)

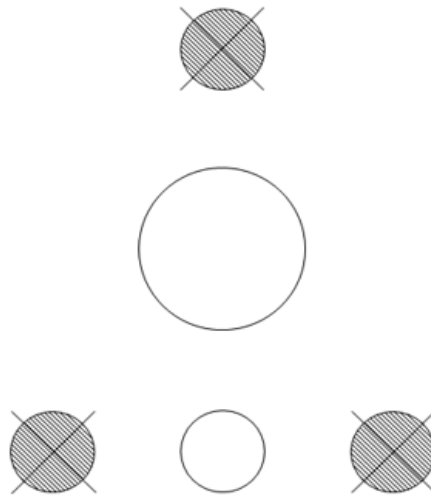


Рис. 3.6. Схема експерименту з великим середнім і нижнім маленьким отворами.

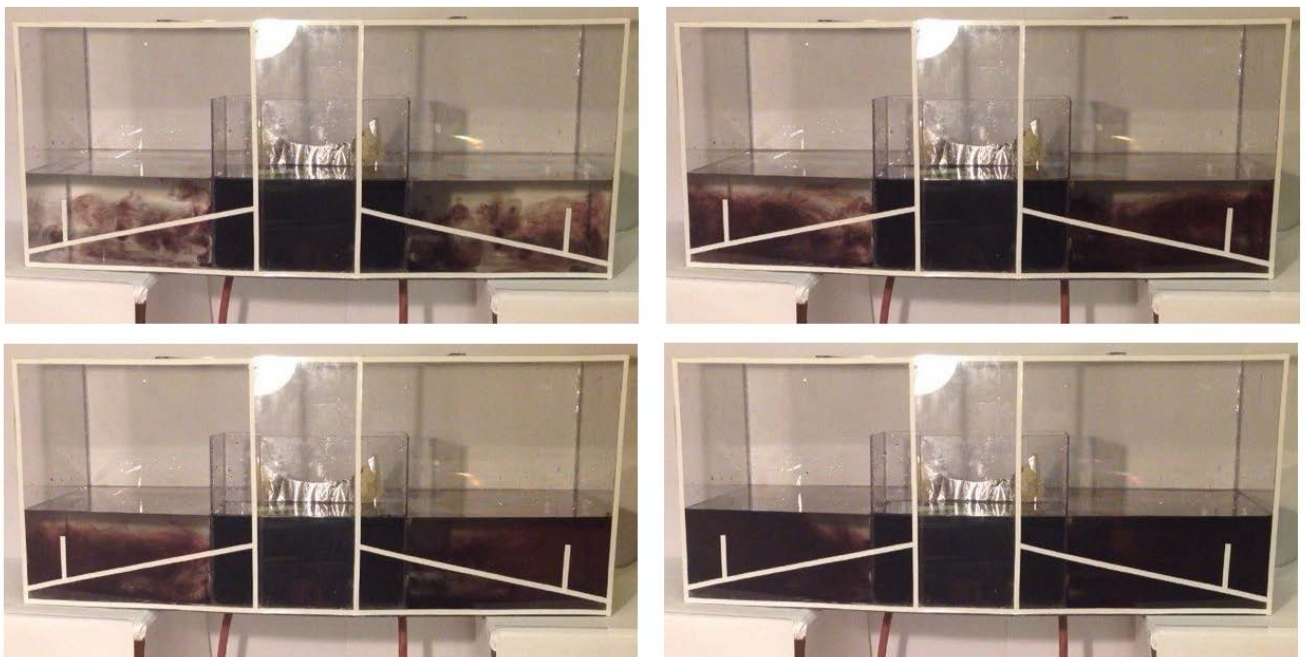


Рис. 3.7. Фото експерименту з великим середнім і нижнім маленьким отворами.

Таблиця 3.3

Результати експерименту з великим середнім і нижнім маленьким отворами.

Рис. 3.6, 3.7 (велике середнє і нижнє маленьке)							
35 секунд		65 секунд		95 секунд		125 секунд	
Точка	КПС, %	Точка	КПС, %	Точка	КПС, %	Точка	КПС, %
1	67	1	54	1	43	1	12
1'	67	1'	52	1'	41	1'	11
2	74	2	53	2	32	2	11
2'	70	2'	53	2'	31	2'	11
3	84	3	43	3	25	3	5
3'	81	3'	41	3'	25	3'	5
4	100	4	100	4	90	4	75
4'	100	4'	100	4'	90	4'	76

Результати даного експерименту демонструють, що передача рідини через великий отвір в металопріймачі здійснюється хвилеподібно (рис. 3.8.).



Рис. 3.8. Фото передача рідини через великий отвір в металопріймача

Приблизно така ж картина, хоч і більш «розмазана», спостерігається і в правій частині промковща. Примітно, що не в попередньому, не в наступному

експерименті (теж з великим отвором) такий хвилеподібною передачі металу не відбувалося. Це може бути пов'язано з особливостями гідродинаміки всередині металопріймача і вимагає більш детального вивчення в рамках наступних наукових робіт. Аналіз стану системи в проміжному ковші, а також отримані дані по коефіцієнту-НТУ пропускання світла вказують на те, що рідина протягом тривалого відрізка часу і досить рівномірно (знизу вгору) заповнює весь обсяг промковша.

### 3.5. Експеримент № 3 (з великим середнім і верхнім маленьким отворами)

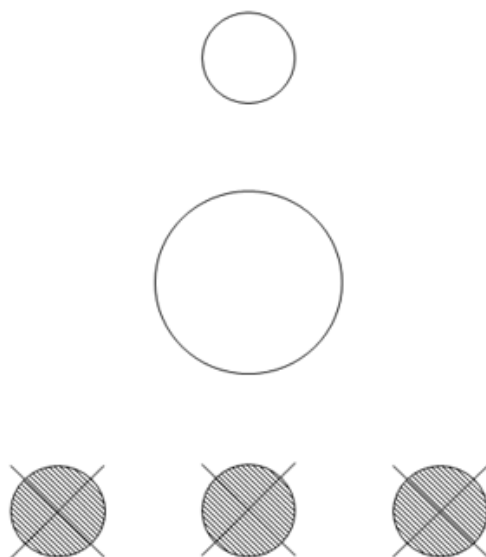


Рис. 3.9. Схема експерименту з великим середнім і верхнім маленьким отворами.

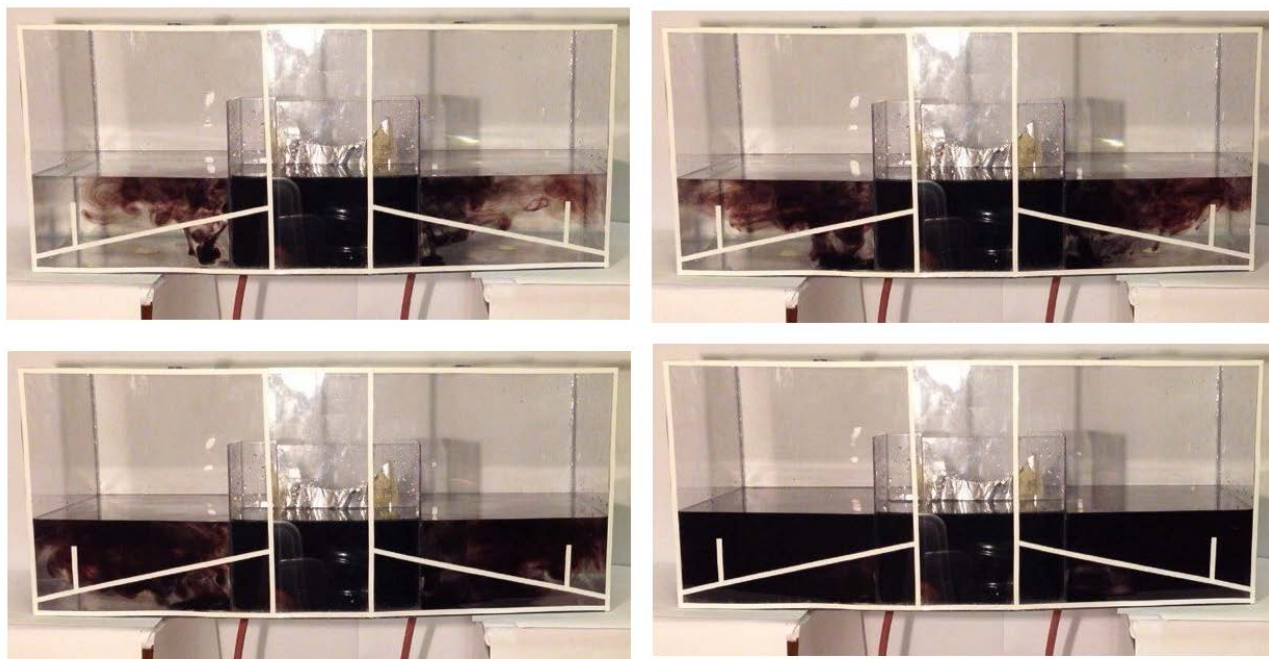


Рис. 3.10. Фото експерименту з великим середнім і верхнім маленьким отворами.

Таблиця 3.4

Результати експерименту з великим середнім і верхнім маленьким отворами.

Рис. 3.9, 3.10 (велике середнє і верхнє маленьке )							
35 секунд		65 секунд		95 секунд		125 секунд	
Точка	КПС, %	Точка	КПС, %	Точка	КПС, %	Точка	КПС, %
1	44	1	23	1	5	1	0
1'	44	1'	22	1'	5	1'	0
2	67	2	41	2	15	2	0
2'	67	2'	41	2'	15	2'	0
3	100	3	100	3	32	3	4
3'	100	3'	100	3'	31	3'	4
4	100	4	100	4	100	4	97
4'	100	4'	100	4'	100	4'	97

Результати третього експерименту показують, що моделююча рідина починає активно спливати в простір промковша з верхнього отвору. Крім того, результати фотометра показують, що в проміжку часу до 65 секунд частину обсягу промковша біля бічних стінок практично не омивається новими обсягами металу. Починаючи ж з 65 секунди проникнення потоків рідини в обсяг істотно зростає, що підтверджують і дані з фотометра: КПС в точках 3 і 3' падає з 100% до 31-32%. На базі цього можна зробити висновок, що така конструкція отворів дозволяє утримувати метал трохи довше безпосередньо в металоприймачі, а, відповідно, може бути використана для технологічних операцій, що вимагають часу на розплавлення обробних реагентів (наприклад, порошкового дроту).

## РОЗДІЛ IV

### МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

У процесі математичного аналізу отриманих результатів необхідно простежити залежність падіння КПС в ключових точках кожного із експериментів та встановити математичні рівняння, що дозволяють описати дану залежність.

#### 4.1. Експеримент № 1 (п. 3.3)

Для даного експерименту ключовими точками є точки 2 і 3 (рис. 3.3). Точка 2 демонструє, наскільки швидко відбувається витікання рідини з простору металоприймача, а точка 3 характеризує швидкість досягнення моделюючої рідини стінки металоприймача. Доцільність вивчення дзеркальних точок 2 і 3 відсутня, так як результати експериментів (дані по КПС) практично ідентичні точка 2 і 3.

Час, с	КПС, %	
	Точка 2	Точка 3
35	42	63
65	27	51
95	15	22
125	0	2
	Коефіцієнт кореляції, R	
	-0,99906	-0,9891

Можна відзначити, що коефіцієнт кореляції є доволі високим та оберненопропорційним, що демонструє високу ступінь залежності зниження КПС з ходом часу. Таким чином, дана конструкція забезпечує беззмінний режим передачі рідини в обсяг промковша.

На основі експериментальних даних побудовані графіки залежностей та отримані рівняння регресії. Усереднююча лінія на графіках називається лінією тренда, отримана в програмі Microsoft Excel та відтворює отримані рівняння регресії.



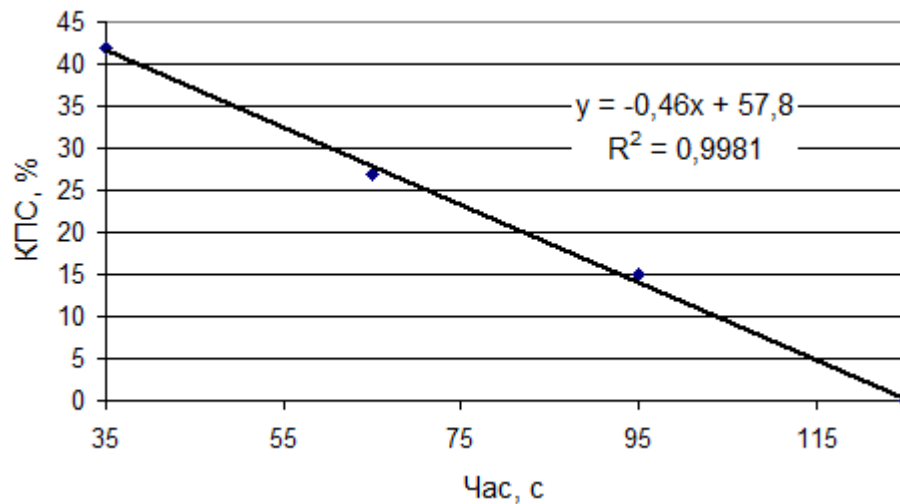


Рис. 4.1 Залежність зміни КПС в ході експерименту №1 (точка 2)

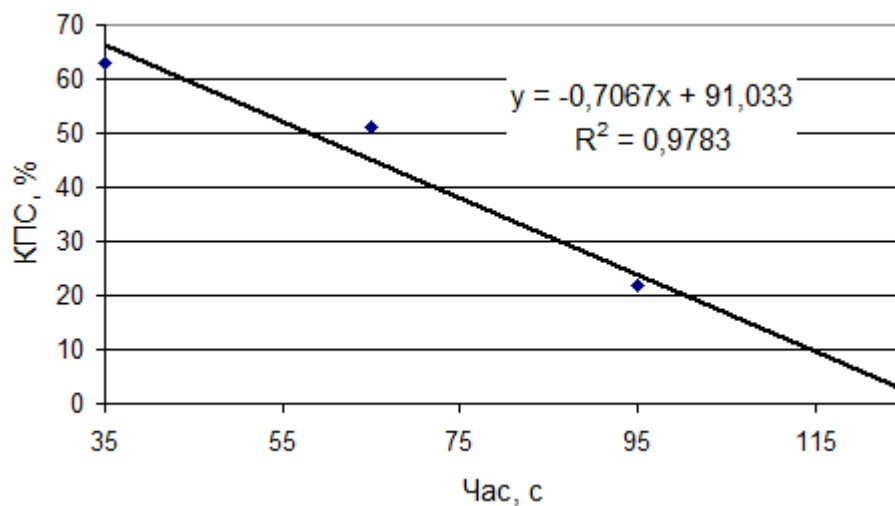


Рис. 4.2 Залежність зміни КПС в ході експерименту №1 (точка 3)

Потрібно відзначити, що підфарбована рідина в ході досліджень відіграє роль металу, що піддається технологічній обробці. Іншими словами, чим менший рівень коефіцієнта пропускання світла в певній точці, тим вищий рівень обробленості металу в ній спостерігається.

Отримані рівняння регресії  $y = -0,46x + 57,8$  (рис 4.1) та  $y = -0,7067x + 91,033$  (рис. 4.2) мають важливе практичне значення. Зокрема, задаючи параметр  $x$  (тривалість експерименту) можна досить точно визначати ступінь обробленості металу в контрольних точках.

#### 4.2. Експеримент № 2 (п. 3.4)

Для даного експерименту ключовими точками є точки 1 і 3 (рис. 3.3). Точка 1 демонструє процес витікання рідини з простору металлоприймача у верхньому шарі, а точка 3 характеризує швидкість досягнення моделюючої рідини стінки металлоприймача. Доцільності вивчення дзеркальних точок немає (див п. 4.1).

Час, с	КПС, %	
	Точка 1	Точка 3
35	67	84
65	54	43
95	43	25
125	12	5
	Коефіцієнт кореляції, R	
	-0,967	-0,978

Як і в попередньому експерименті, коефіцієнт кореляції є доволі високим та оберненопропорційним. Отже спостерігається висока ступінь залежності зниження КПС з ходом часу. Але необхідно відмітити, що проведений математичний аналіз по даним точкам хоч і демонструє високу залежність, не відображає хвилеподібні процеси в об'ємі проміжного ковша. Таким чином, існує доцільність подальших досліджень даної конструкції для уточнення та вдосконалення отриманих рівнянь.

На основі експериментальних даних побудовані графіки залежностей та отримані рівняння регресії.

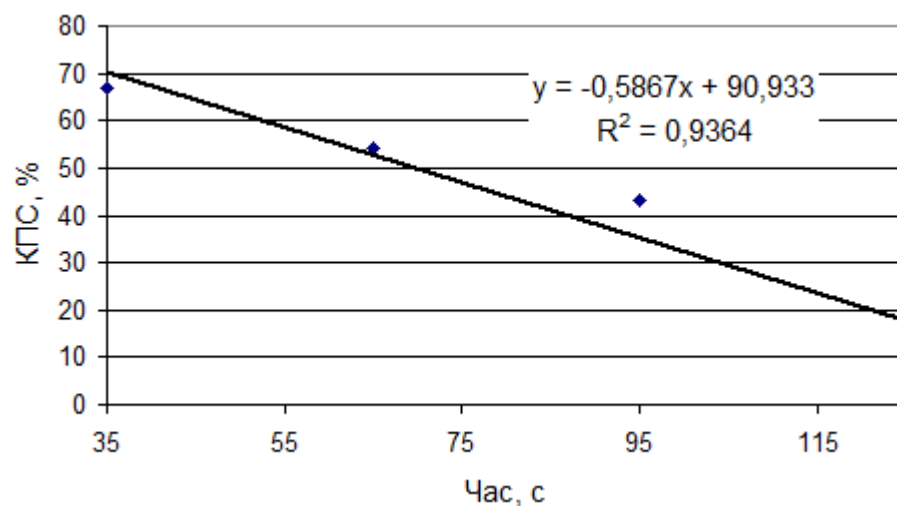


Рис. 4.3 Залежність зміни КПС в ході експерименту №2 (точка 1)

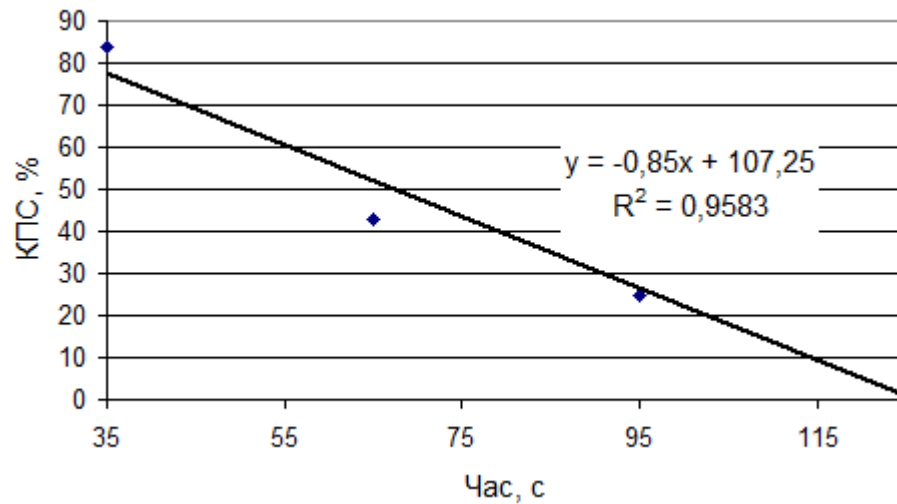


Рис. 4.4 Залежність зміни КПС в ході експерименту №2 (точка 3)

В ході математичного аналізу отримані рівняння регресії  $y = -0,5867x + 90,933$  (рис. 4.3) і  $y = -0,85x + 107,25$  (рис. 4.4).

#### 4.3. Експеримент № 3 (п. 3.5)

Для даного експерименту ключовими точками є точки 1 і 3 (рис. 3.3). Точка 1 демонструє процес витікання рідини з простору металлоприймача у верхньому шарі, а точка 3 характеризує швидкість досягнення моделюючої рідини стінки металлоприймача. Доцільності вивчення дзеркальних точок немає (див п. 4.1).

Час, с	КПС, %	
	Точка 2	Точка 3
35	44	100
65	23	100
95	5	32
125	0	4
	Коефіцієнт кореляції, R	
	-0,97	-0,94

На основі експериментальних даних побудовані графіки залежностей та отримані рівняння регресії.

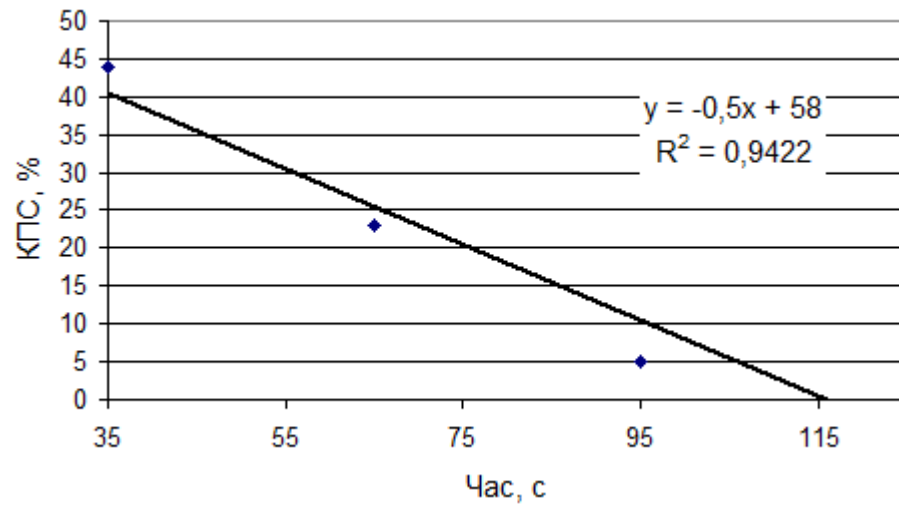


Рис. 4.5 Залежність зміни КПС в ході експерименту №3 (точка 1)

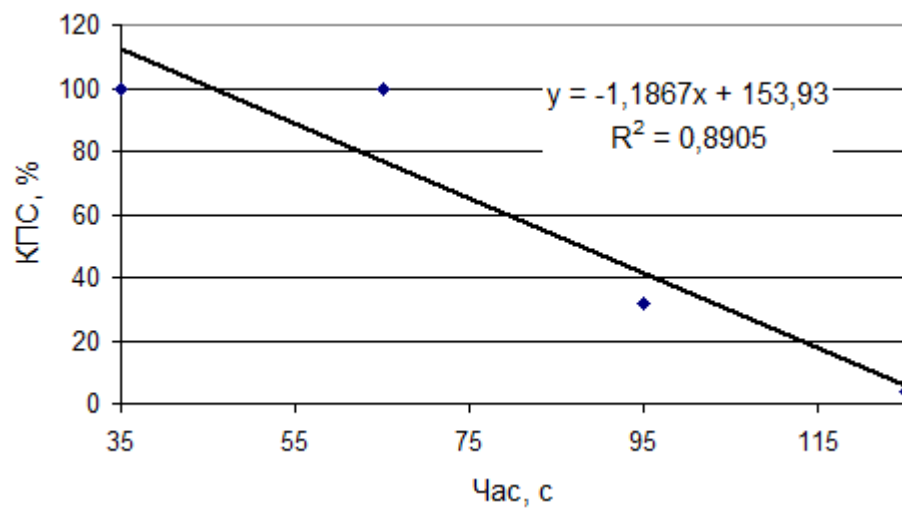


Рис. 4.6 Залежність зміни КПС в ході експерименту №3 (точка 3)

По даним результатам отримані регресії  $y = -0,5x + 58$  (рис 4.5) та  $y = -1,1867x + 153,93$  (рис. 4.6).

## ВИСНОВКИ

Результати отриманих експериментальних досліджень безперервного розливання у проміжному ковші МБЛЗ підтверджують доцільність застосування розроблених нами конструкцій (схем отворів металоприймача). Саме такі конструкції, під час безперервного розливання сталі, можуть дозволити здійснити передачу сталі в простір промковша найбільш оптимальними способами, дають можливість розширити сортамент і підвищити якість готової металопродукції.

Також отримані в ході експерименту результати показали, що під час безперервного розливання сталі для отримання якісної заготовки є важливим не тільки конструкція металоприймача, а й обробка сталі, в залежності від необхідних параметрів. На базі цього мною були запропоновані нові види бокових отворів металоприймача, які можуть застосовуватися в залежності від того чи іншого способу обробки сталі:

а) для обробки синтетичними шлаками доцільно застосовувати отвори малого діаметру у нижній частині метало приймача, котрі забезпечуть швидке витікання металу та високу ступінь перемішування (рис. 3.4, 3.5);

б) використання схеми з нижнім та середнім отвором демонструє хвилеподібне витікання рідини в об'єм проміжного ковша, що може бути реалізовано для обробки сталі нейтральними газами (рис. 3.6, 3.7);

в) обробка кальцієвмісними матеріалами (порошковим дротом) у об'ємі металоприймача потребує отворів, розміщених у його верхній частині, так як завдяки цьому спостерігається більш довше утримування сталі в металоприймачі, а цей час може бути використаний на розплавлення обробних матеріалів (рис. 3.9, 3.10).

Проведений математичний та графічний аналіз дозволив отримати рівняння регресії, встановити залежності між тривалістю експеримента та ступіню обробленості рідини в контрольних точках, побудувати графіки цих залежностей.

Результати даної роботи мають практичну важливість при впровадженні модернізації МБЛЗ в умовах металургійних підприємств, що займаються виробництвом якісних сталей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Машина непрерывного литья заготовок - Википедия // ru.wikipedia.org.
2. Бровман М.Я. Непрерывная разливка металлов / М.Я. Бровман. - М.: "ЭКОМЕТ". - 2007. - 484 с.
3. Бровман М.Я. Усовершенствование технологии разливки стали на УНРС. Национальная металлургия - № 6. - 2005. - С. 64-67.
4. Лукин С.В. Рациональное охлаждение сляба в машине непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, А.В. Гофман. Вестник Череповецкого Государственного университета. №1. – 2010. – С. 118-122.
5. Лукин С.В. Оптимизация вторичного охлаждения в машине непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, А.В. Гофман, Н.Г. Баширов. Т. 6. - № 3. – 2010. – С. 103-105
6. Повитухин С.А. Математическое моделирование процессов формирования заготовки в кристаллизаторе машины непрерывного литья. Вестник Южно-Уральского государственного университета. № 23. – 2007. – С. 77-79.
7. Свинолобов Н.П. Теоретические основы металлургической теплотехники. Учебное пособие / Н.П. Свинолобов, В.Л. Бровкин. - Днепропетровск: НМетАУ. - 2000. - 195 с.
8. Черный А.А. Эффективное математическое моделирование в литейном производстве: Учебное пособие / А.А. Черный. – ПГУ. - 2010. - 251 с.
9. Жукова Н.В. Система автоматического управления уровнем металла и скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора / Н.В. Жукова, О.С. Волуева, В.В. Корчак. Наукові праці Дніецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск - 21(183) - Донецьк, ДонНТУ. - 2011. С. 6-11
10. Шоломицкий А.А., Сотников А.Л., Адаменко В.И. Контроль геометрических параметров машины непрерывного литья заготовок // Металлургические процессы и оборудование. - 2007. - №3. - С. 27-30
11. Смирнов А.Н., Подкорытов А.Л. Современные сортовые МНЛЗ: перспективы развития технологии и оборудования / Технологии. - №12. – декабрь 2009.-

C. 18-25.

12. Smirnov A., Grydin S., Physical and mathematical modeling fluid flows movement in tundish for 6-strand billet CCM // 1-st International Conference Simulation and Modeling of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEELSIM-2005), Brno, 2005. – Brno: 2005. - P. 244-252.
13. RU 77811 Промежуточный ковш для непрерывной разливки металла / Белобородова Л.Н., Новоселов Э.Б., Ключков А.С. / Патентообладатели: Белобородова Л.Н., Новоселов Э.Б., Ключков А.С. – Номер заявки: 2008120211/22.- Дата публикации:10.11.20087
14. Sahai Y., Emi T. Tundish Technology for Clean Steel Production. – New Jersey: World Scientific, 2008. – P. 316
15. US Patent 2007/0132162 A1 Impact pad for metallurgical vessels / Ronald Barrett; Assignee North American Refractories Co.; Appl. No. 11/302,886; Filed Dec.14.2005; Date of Patent Jun.14.2007.
16. US Patent 7,004,227 B2 Impact pad for dividing and destributing liquid metal flow / Dong Xu, Laurens Heaslip, James Dorricott; Assignee Vesuvius Crucible Company; Appl. No. 10/477,473; Filed May.22.2002; Date of Patent Feb.28.2006
17. Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Подкорытов А.Л., Климов В.Г., Соловых С.Г. Оптимизация потоков стали в промковше при разливке сверхдлинными сериями на многоручьевых сортовых МНЛЗ // Сборник научных трудов конференции «50 лет непрерывной разливке стали в Украине» / Донецк 2010. – С.324-330.