

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра: „Матеріалознавство та ливарне виробництво”

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр Кузик

“ _____ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему:

**“Застосування магнітодинамічного міксер-
дозатора моделі МД-6300 для індукційного
нагріву і ефективної електромагнітної
розливки рідкого чавуну”**

Виконав здобувач вищої освіти

ІІ курсу, групи ПМ-23 М-1

спеціальності 131 – «Прикладна механіка»

_____ Ромадін В. М.

“ _____ ” _____ 2024 р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____ Віктор Ломакін

“ _____ ” _____ 2024 р.

Рецензент _____

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет _____ механіко-технологічний
Кафедра _____ матеріалознавства та ливарного виробництва
Рівень вищої освіти _____ магістр
Галузь знань _____ прикладна механіка
Спеціальність _____ 131 – Прикладна механіка
Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма
_____ 131 – Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри

“ _____ ” _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Ромадіну Валерію Миколайовичу

прізвище, ім'я, по-батькові

1. Тема роботи: “Застосування магнітодинамічного міксер-дозатора моделі МД-6300 для індукційного нагріву і ефективної електромагнітної розливки рідкого чавуну”, затверджена наказом по університету 25 вересня 2024 р., № _____
2. Керівник роботи: Ломакін Віктор Миколайович, к.т.н., доцент
3. Строк подання роботи до захисту: 25.12.2024 р.
4. Метою кваліфікаційної роботи є: вивчення впливу електромагнітної обробки і розливки розплаву сірого чавуну при застосуванні магнітодинамічного міксер-дозатора моделі МД-6300.

Завданням кваліфікаційної роботи є: критичний аналіз магнітодинамічних установок; розрахунок міксер-дозатора МД-6300; дослідження макро- і мікроструктури, тимчасового опору розриву, тимчасового опору згинанню, відносного подовження і твердості зразків гільз циліндрів тракторних двигунів, отриманих ковшовою і електромагнітною розливкою.

5. Консультанти по роботі із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Огляд сучасного стану <u>магнітодинамічних</u> установок	Ломакін В. М.		
Проектний розрахунок міксера-дозатора МД-6300	Ломакін В. М.		
Дослідження макро- і мікроструктури, тимчасового опору розриву, згинанню, відносного подовження і твердості зразків литих гільз циліндрів	Ломакін В. М.		
Узагальнення результатів і висновки	Ломакін В. М.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд сучасного стану <u>магнітодинамічних</u> установок		
2.	Проектний розрахунок міксера-дозатора МД-6300		
3.	Дослідження макро- і мікроструктури, тимчасового опору розриву, згинанню, відносного подовження і твердості зразків литих гільз тракторних двигунів		
4.	Узагальнення результатів і висновки		

Дата видачі завдання:

“ ” 2024 р.

Підпис керівника

_____ Ломакін В. М.
(прізвище та ініціали)

Підпис здобувача

_____ Ромадін В. М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

стор. 51, рис. 14, табл. 4, бібліографічних назв 4

СІРИЙ ЧАВУН, СТРУКТУРА, ГРАФІТ, МІЦНІСТЬ, ТВЕРДІСТЬ, ПОДОВЖЕННЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ОБРОБКА, МІКСЕР, ІНДУКТОР, КАНАЛ, ЕЛЕКТРОМАГНІТ

Науково-дослідна робота присвячена застосуванню магнітодинамічних технологій на виробництві і вивченню впливу електричного і магнітного поля на властивості сірого чавуну при виготовленні литих гільз циліндрів тракторних двигунів.

Встановлено зменшення розмірів графітових включень, подрібнення структури металевої основи і підвищення від 5 до 10% тимчасового опору розриву, тимчасового опору згинанню і твердості у литих гільзах циліндрів тракторних двигунів, отриманих електромагнітною обробкою і розливкою.

ANNOTATION

page 51, fig. 14, tab. 4, bibliographic titles 4

**GRAY IRON, STRUCTURE, GRAPHITE, STRENGTH, HARDNESS,
EXTENSION, ELECTROMAGNETIC PROCESSING, MIXER,
INDUCTOR, CHANNEL, ELECTROMAGNET**

The research work is devoted to the application of magnetodynamic technologies in production and the study of the influence of electric and magnetic fields on the properties of gray cast iron in the production of cast cylinder liners for tractor engines.

A reduction in the size of graphite inclusions, refinement of the structure of the metal base and an increase from 5 to 10% in the tensile strength and hardness of cast cylinder liners of tractor engines obtained by electromagnetic processing and casting have been established.

Зміст

стор.

Вступ	7
1. Огляд магнітодинамічних пристроїв для обробки чорних і кольорових сплавів	8
1.1. Принцип дії магнітодинамічного насоса	8
1.2. Класифікація МДН	13
1.3. Магнітодинамічні установки для обробки і дозування чорних сплавів	20
2. Застосування магнітодинамічного міксера-дозатора моделі МД-6300 для індукційного нагріву і ефективної електромагнітної розливки рідкого чавуну	24
2.1. Компановка міксера-дозатора моделі МД-6300 з автоматичною формувальною лінією	24
2.2. Загальні характеристики МДН	27
2.3. Розрахунок електричних і теплових параметрів установки МД-6300	28
3. Науково-практичні аспекти підвищення фізико-механічних і експлуатаційних властивостей сірого чавуну при виготовленні литих гільз циліндрів тракторних двигунів	45
Висновки	50
Список літератури	51

Вступ

В сучасному матеріалознавстві і ливарному виробництві значна увага приділяється покращенню структури і властивостей чорних і кольорових сплавів, оскільки від цього залежить їхня механічна міцність, зносостійкість та інші експлуатаційні характеристики. Для досягнення оптимальних параметрів застосовуються різні методи термічної і хіміко-термічної обробки, такі як закалка, відпуск, цементація, азотування тощо. Ці методи дозволяють регулювати фазовий склад, змінювати кількість та розподіл карбідних частинок, а також впливати на розмір зерен. Проте поряд із традиційними методами існують нові перспективні підходи, що базуються на фізичному впливі під час процесів лиття. Одним із таких підходів є обробка розплаву ультразвуковими хвилями, які сприяють подрібненню кристалів та рівномірному розподілу включень. Особливо перспективним напрямком є застосування магнітного поля, яке забезпечує більш глибокий і контрольований вплив на структуру чорних і кольорових сплавів.

До числа нових технологічних розробок в області приготування чорних і кольорових сплавів, що знайшли застосування в промисловості, слід віднести магнітодинамічні установки (МДН) [1].

1. Огляд магнітодинамічних пристроїв для обробки чорних і кольорових сплавів

1.1. Принцип дії магнітодинамічного насоса

Магнітогідродинамічним насосом називається пристрій, який служить для збільшення в основному потенціальної енергії нестиснутого робочого середовища за допомогою перетворення енергії з використанням законів магнітної гідродинаміки. Іншими словами, металургійний МГД-насос виконує пряме перетворення енергії електромагнітного поля в механічну енергію потоку рідкого металу. МГД-насоси розділяються на кондукційні, в яких струм в рідкому металі має зовнішнє джерело і індукційні, в яких робочий струм індуктується в рідкому металі змінним магнітним полем. Один із видів індукційних насосів є трансформаторний МГД-насос, робочий струм якого представляє собою струм вторинної обмотки трансформатора [1].

Магнітодинамічний – це такий трансформаторний насос, в якому МГД-перетворення виконується при взаємодії робочого струму з зовнішнім магнітним полем, створеним магнітною системою, конструктивно і функціонально відмінною від системи створення робочого струму.

Магнітодинамічна – це така технологічна установка, основою якої є магнітодинамічний насос. Призначення її – перетворення електричної енергії в механічну і теплову, яка використовується для технологічних цілей: плавлення, рафінування, заливки ливарних сплавів т.п.

Термін (магнітодинамічний насос) запропоновано д.т.н., проф. В. П. Поліщуком, включений до збірника рекомендованих термінів з магнітної гідродинаміки.

Магнітодинамічні установки зазвичай позначаються номером насоса (МДН-1, МДН-2 тощо). Як правило, в технічну марку МДУ входить літера, яка визначає метал, для якого МДУ призначена та цифри, які характеризують її основні параметри і конструктивні особливості. Наприклад, МДН-6А-160 означає, що МДУ містить насос МДН-6, призначений для алюмінієвих сплавів

та має корисне завантаження тиглю 160 кг. Для промислових установок використовується також галузева індексація.

Для МДН характерною є також різноманітність конструкцій, які різняться кількістю, місцезнаходженням та формою основних елементів. Зараз існує більше 30 видів МДН.

Перша установка (індукційна канална піч), в якій використовувався принцип дії МДН, запропонована Л. Дрейфусом, а перший магнітодинамічний насос, подібний до МДН-3, був створений Н. Лінденбладом.

Заливочна установка з магнітодинамічним насосом (МДН-1) вперше розроблена і випробувана В.П. Поліщуком. В промисловості МДУ застосовуються при заливанні магнієвих і алюмінієвих сплавів, чавуну.

Розглянемо основні особливості МДН як окремого класу МГД-машин для металургії і ливарного виробництва на прикладі МДН-3.

Конструкція (рис. 1.1). Кільцевий трубопровід 2 охоплює центральний стержень замкненого магнітопроводу 3, зібраного із листів трансформаторної сталі, з розміщеною на ньому обмоткою 4, яка має форму котушки з ізолюваного проводу. Цей трубопровід називається каналом МДН, а магнітопровід із котушкою – індуктором. Оскільки МДН призначений для транспортування рідкого металу, окремі по конструкції ділянки каналу, а також трубопровід що підводе 5 чи відводе 8 метал називаються металопроводом, а їх сукупність – металотрактом. Термінологія прикладної магнітної гідродинаміки ще не стабілізувалась, зокрема замість слова “металопровід” вживається термін “канал”. Розміщена у місці з'єднання металопроводу 8 із каналом 2 ділянка 1, границями якої є продовження стінок металопроводу 8, називається робочою зоною МДН. Такий вузол з'єднання трубопроводів у гідравлиці називається трійником, і саме тому робоча зона розміщена в місці приєднання до каналу МДН одного транспортного металопроводу називається трійниковою. Вона знаходиться у щілині шихтованого металопроводу електромагніту, обмотка якого виконана у формі двох котушок 7, розміщених по обидві сторони від робочої зони.

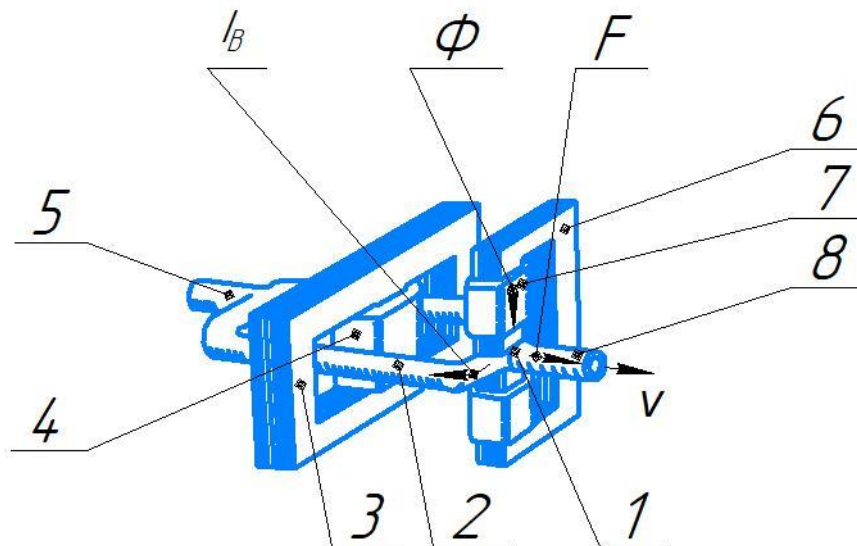


Рис. 1.1 – Схема насоса МДН – 3 (I_B – струм в каналі, Φ – зовнішній магнітний потік, F – електромагнітна сила, V – швидкість потоку металу)

*1 – робоча зона; 2 – кільцевий трубопровід;
3 – магнітопровід; 4 – обмотка; 5 – підвідний
трубопровід; 6 – шихтований магнітопровід;
7 – котушка; 8 – відвідний трубопровід*

Принцип дії. Підведений до котушки 4 (рис. 1.1) змінний струм I_i створює в магнітопроводі 3 змінний магнітний потік Φ_i , який індуктує в рідкому металі, створюючи в каналі 2 замкнутий виток – кільцевий струм. Система індуктор-виток рідкого металу представляє собою своєрідний трансформатор, у котрого первинною обмоткою служить котушка індуктора з кількістю витків w_i , а вторинною – виток рідкого металу з $w_b=1$. Канал МДН з одним замкнутим витком рідкого металу – як в МДН-З – називається одновитковим (канали, в яких утворюється два витка металу, – здвоєними). Така ж система створення струму характерна і для інших типів трансформаторних МГД-машин, а також індукційних каналъних печей для плавки і витримки металу.

Трансформаторний принцип перетворення електроенергії найбільш економічний: електричний ККД ($\eta_{ел}$) промислових силових трансформаторів,

дорівнює відношенню переданої потужності до підведеної, при стандартній частоті 50 Гц і становить 95–98%. В індукційних каналних печах великий зазор між обмоткою індуктора і металом в каналі збільшує розсіювання магнітного потоку індуктора Φ_i і знижує $\eta_{\text{ел}}$ (до 80-90%). Але негативний вплив зазора на $\eta_{\text{ел}}$ тут набагато слабкіше, ніж в системах з розімкнутим залізом.

Із теорії трансформатора слідує, що струм в каналі МДН $I_b \approx I_i w_i$, а ЕРС $E_b \approx U_i / w_i$, тобто величина струму в каналі зростає, а ЕРС зменшується в порівнянні з величиною і напругою струму, що підводиться до обмотки індуктора, пропорційно кількості її витків. Зазвичай при ЕРС у виткі в декілька вольт величина струму в ньому досягає декілька тисяч ампер при густині струму до 5-20 МА/м² і питомій потужності до 25 МВт/м³.

При живленні обмоток електромагніту змінним струмом I_e в його магнітопроводі створюється пульсуючий магнітний потік Φ_e основна частина якого Φ_0 замикається через міжполюсний зазор (рис. 1.2). Частина потоку, що проходить через робочу зону в площині її симетрії, називається робочим зовнішнім магнітним потоком Φ .

Для металургійних і ливарних МДН характерна велика величина немагнітного зазору електромагніту (0,05-0,50 м), обумовлена збільшеною товщиною стінок каналу. Це визиває велике розсіювання магнітного поля в зазорі. Зазвичай потік Φ становить всього декілька відсотків від Φ_e , і хоч індукція в робочій зоні не перевищує 0,2-0,3 Тл, на її створення витрачається значна потужність.

При взаємодії в робочій зоні струму з робочим магнітним потоком в металі виникають об'ємні електромагнітні сили: $f_e = j \times B$, де j – густина струму I_b в робочій зоні; B – індукція магнітного потоку Φ в робочій зоні. Оскільки обидві ці величини мають змінний характер, то і сила також змінюється у часі. Саме ця сила може створити гідравлічний напір і забезпечує транспортування металу.

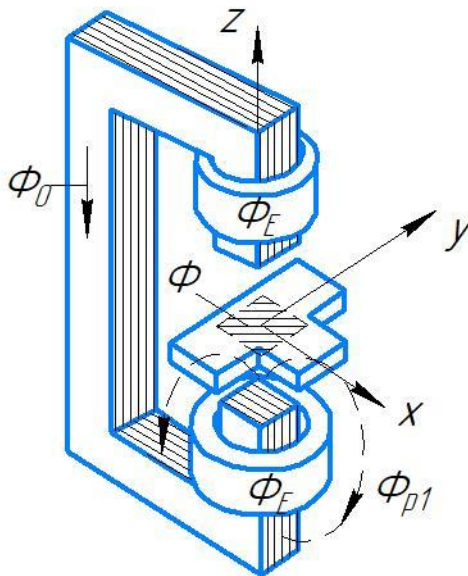


Рис. 1.2 – Схема створення зовнішнього магнітного поля

Індуктування струму в рідкому металі замкнутою магнітною системою – індуктором, створення робочого магнітного поля в робочій зоні іншою, незалежною від індуктора, магнітною системою і відсутність в робочій зоні твердих бокових стінок, на місці котрих спостерігаються завихрення течії, – це три визначальні ознаки МДН як самостійного класу МГД-насосів.

Основні переваги МДН. В порівнянні з іншими типами технологічного МГД-обладнання МДН має наступні переваги: 1) більш високий термічний і гідротермічний ККД завдяки високому ККД передачі енергії в рідкий метал замкнутою магнітною системою; 2) менші габаритні розміри робочої зони за рахунок можливості отримання в ній більшої густини струму (навіть в порівнянні з кондукційними МГД-насосами, де густина струму обмежується перегрівом контактів, що підводять струм); 3) більша технологічність виготовлення і надійність каналу (незважаючи на більш складну його форму в порівнянні, наприклад, з плоским ливарним насосом за рахунок виконання каналу МДН з оптимальною по технологічним і тепловим умовам товщиною стінки футеровки і теплоізоляції завдяки меншій залежності ККД систем з замкнутим магнітопроводом від величини немагнітного зазору); 4) можливість, завдяки наявності двох електромагнітних систем, більш глибокого керування гідравлічними і тепловими параметрами в таких технологічних процесах, де на різних стадіях необхідно то інтенсивно підігрівати метал, то переміщувати

його; 5) відсутність втрат тиску, визваних зсувом фаз між струмом в металі і робочим магнітним потоком завдяки можливості оптимізувати кут зсуву фаз між первинними напругами магнітних систем МДН; 6) більш високий загальний коефіцієнт потужності завдяки високому коефіцієнту потужності індуктора (0,6-0,8) і значно більшою, ніж у електромагніта, його потужності, що знижує вартість і габаритні розміри джерела живлення, підвищує електричний ККД МДН; 7) більш дешеве джерело живлення (без кошовних перетворювачів частоти струму) завдяки застосуванню струму промислової частоти; 8) більш проста і надійна для охолодження, заміни і ремонту конструкція обмоток.

1.2. Класифікація МДН

Аналіз розливочних типів МДН вказує, що всі вони містять робочу зону двох типів – трійникову і хрестоподібну.

Направленість транзитного потоку $v_{тр}$ може співпадати з направленістю F_e (режим нагнітання) або бути протилежною йому (режим гальмування), транзитний потік може бути і відсутнім (режим тиску).

Транзитний потік може проходити через робочу зону без зміни (наскрізний режим), в ній може відбуватися об'єднання (режим об'єднання) або розділення (режим розділення) транзитних і циркуляційних потоків металу. Таке об'єднання або розділення може бути симетричним або асиметричним. Хрестоподібні робочі зони з наскрізним режимом роботи називаються прямоточними, в інших випадках – непрямоточними.

Магнітне поле, індуктоване в робочій зоні струмом I_b може співпадати з зовнішнім, бути направленим назустріч йому, або замикатися в межах полюсного накієчника.

Магнітодинамічні насоси і установки доцільно розглядати не в хронологічній послідовності їх розробки, а групуючи по базовим конструкціям у відповідності з визначальними ознаками їх каналів і робочих зон:

- 1) МДН-3 – одновитковий канал з трійниковою робочою зоною;
- 2) МДН-6 – здвоєний канал з трійниковою робочою зоною;
- 3) МДН-7 – канал з прямоточними хрестоподібними робочими зонами;
- 4) МДН-4 – канал з непрямоточними хрестоподібними робочими зонами.

МДН з трійниковою робочою зоною і одновитковим каналом. Базовою конструкцією для цієї групи насосів є МДН-3, що описано вище.

При замиканні витка через нижню частину ванни (рис. 1.3) метал в ній підігрівається. Теплообмін між ванною і каналом здійснюється за рахунок теплової і електромагнітної конвекції металу (так само, як в індукційних каналних печах).

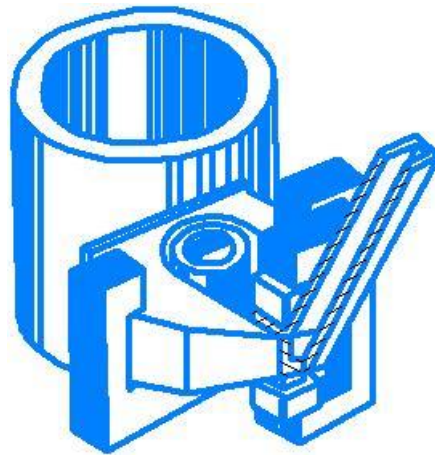


Рис. 1.3 – Схема насоса МДН-3, суміщеного з піччю

При недостатній інтенсивності такої циркуляції метал в каналі перегрівається. Така модифікація МДН-3 випробувана на алюмінієвих сплавах.

Проблема спрощення зливної частини металотракту і обігріву в ній металу кардинально вирішується при використанні однополюсного електромагніту, розміщеного під робочою зоною, і компановки. Дуже короткий зливний металопровід виконано в футеровці стінки каналу. Незважаючи на те що при нахилі каналу в бік тигля ускладнюється масообмін між каналом і ванною, а однополюсний електромагніт створює в робочій зоні значно меншу індукцію, ніж звичайний, простота конструкції металотракту забезпечила успішне застосування цієї установки в промисловості при розливанні чавуну.

В одному каналі МДН-3 може бути дві і більше робочих зон, що дозволяє здійснювати одночасну подачу металу декільком користувачам. Така установка також застосовується для розливання чавуну. Дві робочі зони дозволяють створити циркуляцію металу із швидкістю v_m в загальному жолобі з метою інтенсифікації обробки металу між заливками; при заливці обидві робочі зони працюють паралельно.

МДН-5 (рис. 1.4). Цей насос відноситься до класу занурюваних МДН, у котрих значна частина витка замикається по ванні печі.

Він поміщений в захистний кожух 8 і компонується з піччю. Короткий прямий канал 3 складається тільки з робочої зони. Обмотки 5, 7 індуктора рознесені на бокові стержні суміщеного магнітопровода 6, потік Φ_i проходить по цим стержням і зануреному в метал ярму 2, навколо котрого замикається виток. Потік Φ_e створюється обмоткою 4. Зливний металопровід 1 проходить через отвір в магнітопроводі 6 або огинає його. Первагою МДН-5 є те, що в метал занурена лише менша його частина – ярмо 2 магнітопровода і робоча зона 3, тому із печі витісняється невеликий об'єм металу, полегшуються теплові умови роботи обмоток. Але замикання витка навколо стержня магнітопровода без обмотки і одностороннє розміщення обмотки магніта збільшує розсіювання магнітних потоків і знижує ефективність роботи електромагнітних систем насоса.

МДН-5 випробуваний на ртуті, алюмінієвих і магнієвих сплавах.

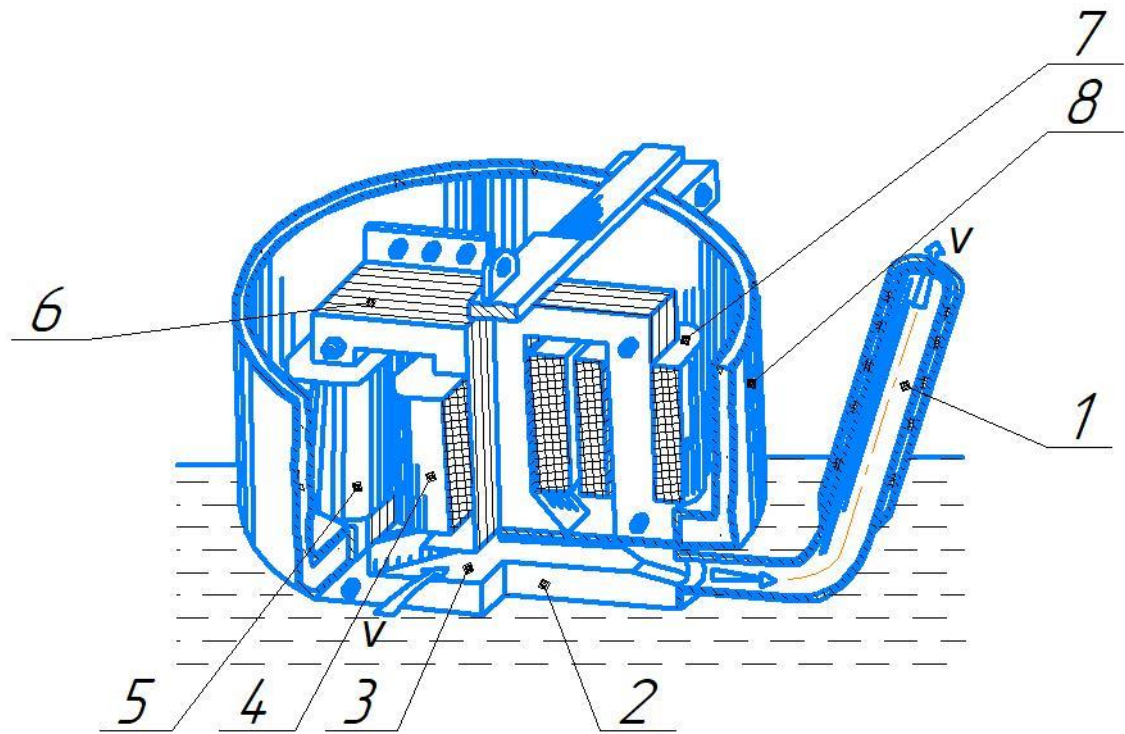


Рис. 1.4 – Схема зануреного насоса МДН – 5

*1 – зливний металопровід; 2 – ярмо;
3 – канал; 4 – обмотка; 5, 7 – обмотки індуктора;
6 – магнітопровід; 8 – захисний кожух*

МДН зі здвоєним каналом і трійниковою робочою зоною. Базовою конструкцією для цієї групи МДН є установка МДН-6 (рис. 1.5).

Тигель 1 установки в донній частині з'єднується з каналом, що складається із бокових 4, 8 і центрального 7 металопроводів. До центрального металопрвода приєднано зливний металопрвід 9. Ділянка з'єднання металопрводів 4, 7, 8 (робоча зона) розміщена в зазорі магнітопрвода 5 електромагніта, обмотки 6 котрого розміщені по обидві сторони робочої зони. Магнітопрводи 2 двох індукторів охоплюють бокові металопрводи, а їх обмотки 3 розміщені у вікнах каналу.

Така будова установки дозволяє створювати режими руху металу, що різняться направленням, абсолютною і відносною величинами швидкостей і тисків в кожному металопрводі, загальною підведеною тепловою потужністю і підігрівом металу на різних ділянках каналу.

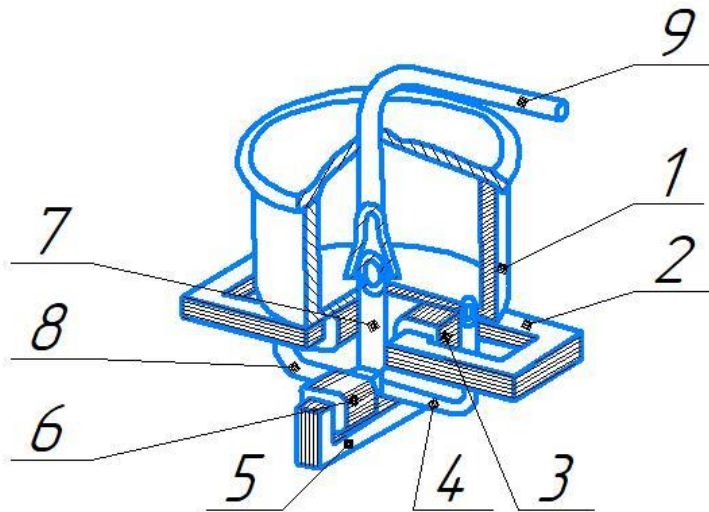


Рис. 15 – Схема плавильно – заливочної чстановки МДН – 6

- 1 – тигель; 2 – магнітопровід;
3 – обмотка; 4, 8 – бічні металопрводи;
5 – магнітопровід; 6 – обмотка;
7 – центральний металопровід;
9 – зливний металопровід*

Тому по технологічним можливостям установка МДН-6 не має рівних серед МГД-установок інших типів, чим пояснюється її застосування при плавці, рафінуванні, заливанні, дозуванні литті під електромагнітним тиском кольорових сплавів.

До недоліків установки слід віднести: МДН-6 має більш складний і довгий канал. Це обумовлює збільшення теплових втрат, зниження термічного і електричного ККД (при інших рівних умовах він нижче, ніж у МДН-3), зменшення термічної стійкості каналу. Нижнє по відношенню до ванни розміщення робочої зони обумовлює максимальний металостатичний напір в ній. Це унеможлиблює виникненню розрідження в робочій зоні, аде погіршує умови роботи футеровки, особливо для важких металів. Розміщення металопроводу всередині ванни полегшує підігрів металу в ньому між заливками, але виникають ускладнення з підбором матеріалів, стійких при двосторонньому контакту з високотемпературними сплавами. МДН-6 має ряд модифікацій.

МДН з прямоточними хрестоподібними робочими зонами. Базовою конструкцією цієї групи МДН є насос МДН-7 (рис. 1.6). Прямоточний металопровід 1 каналу насоса має дві робочі зони, котрі утворюються в місці з'єднання його з металопроводами 4 і 5, замкнутими навколо стержнів магнітопровода 2, на якому розміщена котушка 3 індуктора. Магнітопровід 7 електромагніту з котушкою 6 на полюсних накінецьниках прилягає до робочої зони з зовнішньої сторони прямоточного каналу, його магнітний потік замикається по магнітопроводу 2. Сумування тисків в двох робочих зонах обумовлює створення за допомогою МДН-7 високого тиску при мінімальних гідравлічних втратах. Але неоптимальне положення обмоток відносно витків і робочої зони знижує ефективність електромагнітних систем МДН-7. Відвід теплоти із металопроводів 4 і 5 ускладнений у зв'язку з відсутністю керованого масообміну з транзитним потоком металу.

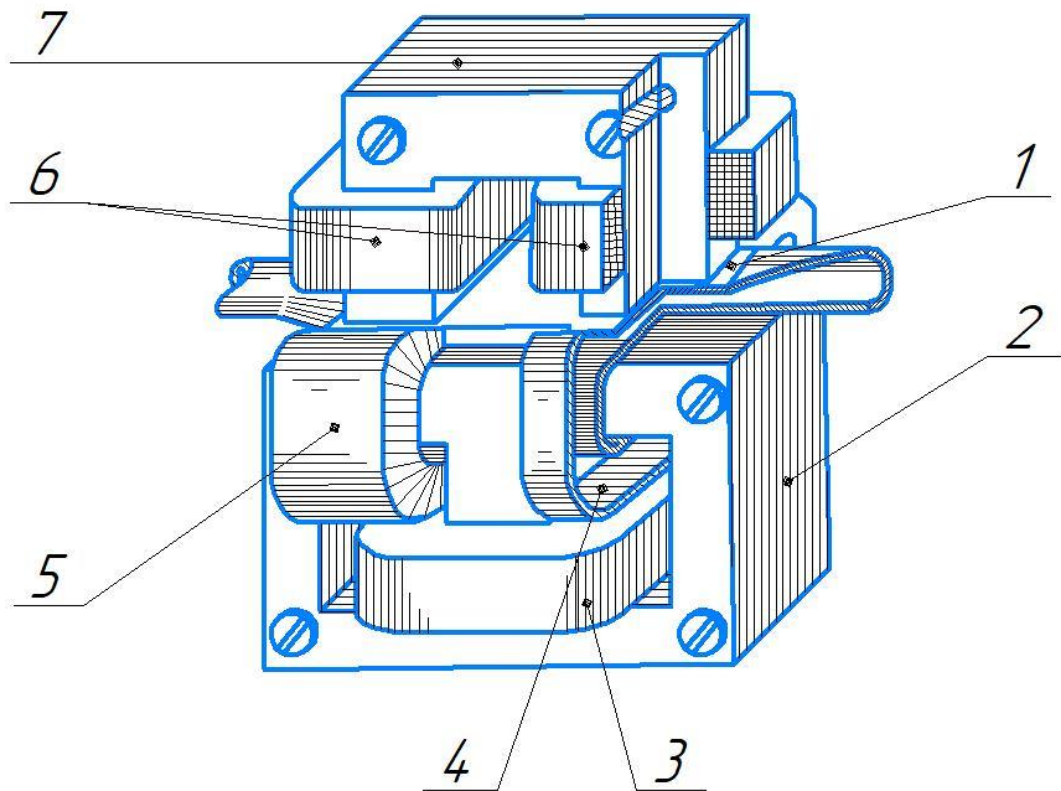


Рис. 1.6 – Схема насоса МДН – 7

*1 – металопровід; 2 – магнітопровід;
3 – котушка індуктора; 4, 5 – металопроводи;
6 – котушка електромагніта; 7 – магнітопровід*

МДН з непрямоточними хрестоподібними робочими зонами. Базовою моделлю для цієї групи насосів є МДН-4. Цей насос відрізняється більш компактною електромагнітною системою для створення зовнішнього магнітного поля. При роботі такого насоса в робочих зонах утворюється неоднаковий тиск. Як наслідок виникає циркуляційна течія металу. При цьому в металі знімається перегрів, але витрати енергії знижують гідравлічну ефективність МДН-4 в порівнянні з МДН-7. МДН-4 застосовували в промислових умовах для заливання магнієвих сплавів при неперервному литті зливків.

МДН-6Ч. Хоч цей насос має промислову марку МДН-6, по виду робочої зони і режиму роботи він відноситься до групи, де базовою моделлю служить МДН-4. Можливі три основних режими його роботи: транспортування, насосна циркуляція і пічна циркуляція. При транспортуванні робоча зона МДН-6Ч працює аналогічно другій зоні МДН-4, тобто в режимі розділення, але тут циркуляційний потік повертається у ванну.

В порівнянні з трійниковою в робочій зоні МДН-6Ч створюється більший перепад тиску. В режимі насосної циркуляції робоча зона МДН-6Ч працює, як перша робоча зона МДН-4, тобто в режимі з'єднання, але оскільки відсутня витрата з боку зливного металопровода, то метал тече як в МДН-6.

В МДН-6Ч, як і в МДН-6, можна реалізувати різні типи течії. Але слід мати на увазі, що в режимі транспортування витрата залежить тільки від перепаду тиску, а інтенсивність насосної циркуляції обмежена. У варіанті з однополюсним електромагнітом і поворотом навколо зливного носка цю установку успішно застосовують для заливки у форму чавуну.

Вибір оптимального для конкретної технології типу МДН є самим відповідальним етапом проектування МДУ, що передбачає ретельне порівняння енергетичних, гідравлічних і технологічних особливостей МДН, може бути зробленим лише з урахуванням конструктивних рішень.

Описані схеми не вичерпують усіх розроблених і можливих варіантів МДН.

1.3. Магнітодинамічні установки для обробки і дозування чорних сплавів

В створенні МДН-заливочних установок для чавуну особливу роль відіграла творча співдружність ФТІМС НАНУ з підприємствами України. Отримані результати дозволили розробити більш економічні і надійні установки типу МДН-3.

В подальшому сумісно була розроблена нова установка МДН-6Ч з керованою циркуляцією металу в каналі, створено ряд модифікацій установок МДН-3Ч і МДН-6Ч з підвищеною продуктивністю і потужністю, розливкою чавуну через один і два металопрводи.

Установка типу МДН-12. Дослідно промисловий зразок установки показано на рис. 1.7.

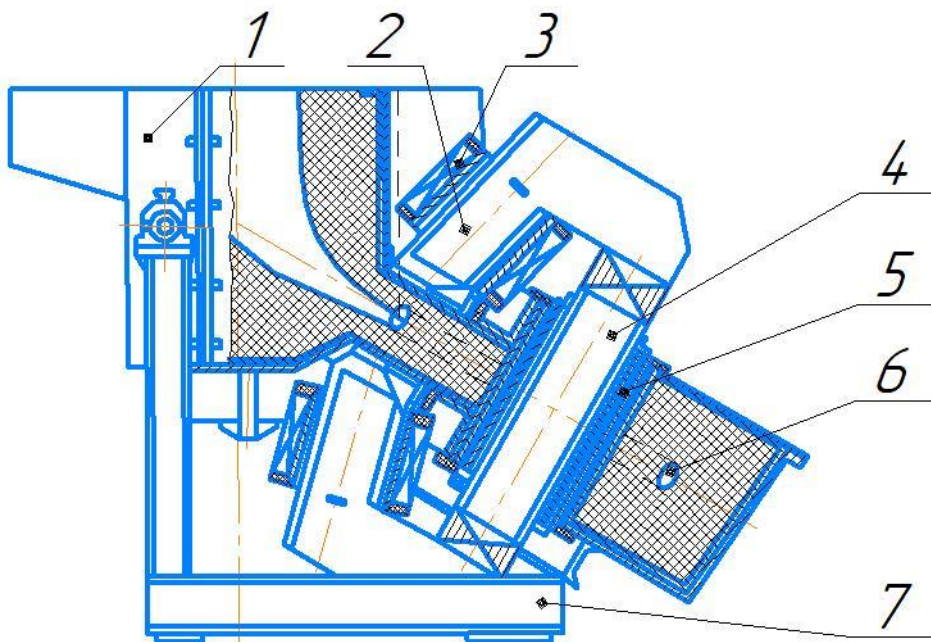


Рис. 1.7 – Установка МДН – 12 для заливки чавуну

*1 – тигель; 2, 3 – магнітопровід та обмотка електромагніту;
4, 5 – магнітопровід та обмотка індуктора; 6 – канал; 7 – рама*

Кожухи тигля виготовлено із сталі товщиною 10-12 мм. Товщина футеровки набивних високоглиноземистих мас марки Ме-78 в тиглі – 200-250 мм, каналі – 150 і в робочій зоні – 80 мм.

Кожух робочої зони і мідний циліндр навколо котушки індуктора охолоджується водою. Установка забезпечує підігрів чавуну зі швидкістю 100-110 К/год, створює надлишковий тиск до 0,03 МПа.

Максимальний гідростатичний напір в робочій зоні МДН-12 становить 0,42 м, при номінальній витраті – не більше 0,35 м. Це дозволяє розливати 40% завантаження ванни. В тяжких умовах двостороннього контакту з чавуном і шлаком перебувають вогнетривкі перегородки, що формують металопровід.

Збільшення їх товщини від 70-80 до 120-130 мм дозволяє продовжити термін роботи до 25-30 діб, але це призводить до зменшення корисного об'єма ванни заливочної установки і погіршенню нагріву металу на зливному носку.

Установка типу МДН-6Ч. Не відрізняючись по основним конструктивним рішенням від МДН-3Ч установка МДН-6Ч має здвоєний канал і два індуктора з незалежним живленням (рис. 1.8).

Кількість електромагнітів і зливних металопроводів, а отже, і робочих зон може бути різною – від одного до трьох. Більш ефективне керування циркуляцією металу в установках МДН-6Ч робить їх конкурентоспроможними з МДН-3Ч, незважаючи на більш складну форму, більші габарити каналу і всієї установки.

В цьому насосі при ввімкненні індукторів на різні по фазі або величині напруги можуть бути реалізовані комбіновані режими циркуляції. При заливці на формувальних лініях застосовується дозування по часу. Рівень металу на зливному носку підтримується сталим за рахунок заданого часу нахилу установки при кожній заливці. Ливарник візуально контролює рівень металу в ливниковій чаші і по мірі необхідності коректує з пульта час заливки (змінюючи установку реле часу) або швидкість подачі металу (нахилом установки або зміною напруги живлення електромагніта).

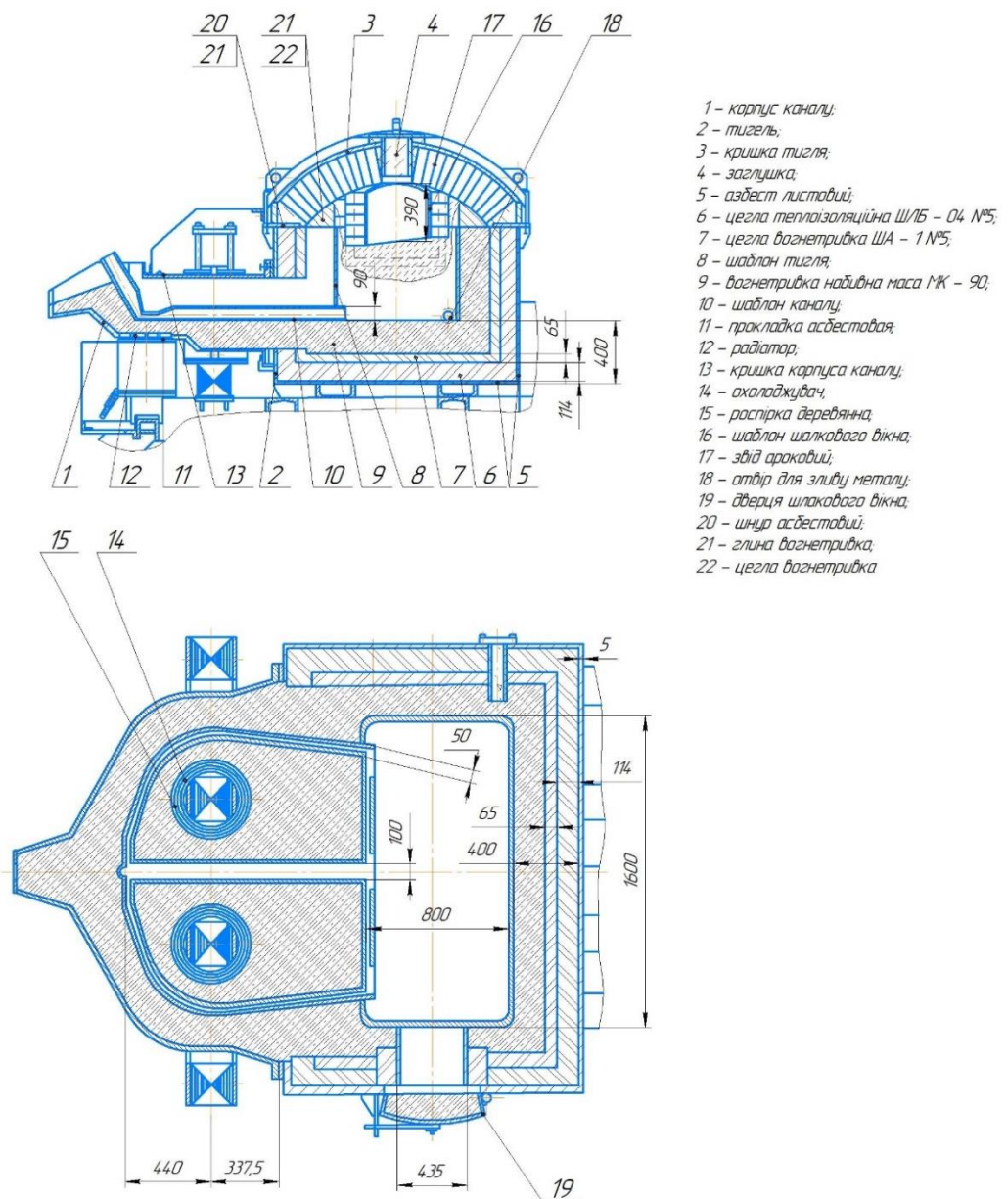


Рис. 1.8 – Загальний вид магнітодинамічної установки для чавуну (МДН-64)

Швидкість заливки металу у форму визначається діаметром вертикального зливного металопровода і рівнем металу на носку. На лінії ІЛ-225 таким способом заливається за годину 120-140 доз масою 100-110 кг. Чавун у ванні установки зазвичай знаходиться не більше години. За цей час змін в хімічному складі і структурі металу практично не відбувається. Межа міцності і відносне подовження зразків, отриманих із чавуну після 1,5-2 год витримки його в МДН, дещо збільшується, а потім починає зменшуватися. Твердість же з часом підвищується монотонно. Така зміна властивостей характерна для чавуну, витриманому при високій температурі, і пояснюється зменшенням кількості

центрів кристалізації за рахунок розчинення вільного вуглецю. Технічна характеристика МДН-6Ч представлена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика установка МДН-6Ч

Характеристика	МДН-6Ч		
	МДН-6Ч-1	МДН-6Ч-2	99413
Маса завантаження, кг:			
корисна	3000	3000	6300
повна	3500	3500	9000
Подача сплаву при заливці, кг/с	10	10×2	20
Тиск, МПа	0,018	0,018	0,020
Продуктивність при заливці ($\times 10^{-3}$), кг/год	10 25-100	10×2 25-100	20 50-200

2. Застосування магнітодинамічного міксер-дозатора моделі МД-6300 для індукційного нагріву і ефективної електромагнітної розливки рідкого чавуну

2.1. Компановка міксер-дозатора моделі МД-6300 з автоматичною формувальною лінією

Магнітодинамічний міксер-дозатор моделі МД-6300 (конструкція на базі МДН-6Ч) призначений для регульованого індукційного підігріву рідкого чавуну і сталі до необхідної температури і керованої електромагнітної розливки на пульсуючих ливарних лініях опочної і безопочної формовки, в кокільні і відцентрові машини, при безперервному литті і рідкому штампуванні. Рекомендується також як міксер для витримки металу при заданій температурі і для регульованого перемішування. Забезпечує реалізацію технологій рафінуючої обробки, легування і модифікування залізовуглецевих сплавів. Може використовуватися в ливарних цехах при масовому і серійному виробництві виливків.

МДН в ливарному виробництві, як правило, використовують в технологічному ланцюжку, в якому вони пов'язують резервуари з рідким металом і ливарні форми. Оскільки вибір відповідної вимогам технологічного процесу компановки МДН з ливарними агрегатами (перш за все роздавальними печами і металоприймачами ливарних машин) суттєво впливає на конструкцію МДН, режими їх роботи, пуску, зупинки і заміни, представляється доцільним описати загальні принципи компановки МДН з іншим технологічним ливарним устаткуванням в процесах, що закінчуються заливкою металу у форму.

Технічна характеристика магнітодинамічного міксер-дозатора для перегріву і розливки чавуну показана в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика магнітодинамічних міксерів-дозаторів

Показники	Величина			
Модель	МД-1600	МД-2500	МД-4000	МД-6300
Корисна маса металу, кг	1600	2500	4000	6300
Потужність індуктора, кВт	150	150(300)	300(600)	300(600)
Температура розливки розплаву, С	1300-1600			
Кількість зливних носків, шт	1	1(2)	1(2)	1(2)
Швидкість подачі металу у форму, кг/с	1-8	1-10	2-12	3-15
Продуктивність при розливанні, кг/год	6400	10000	16000	25000
Питома витрата енергії, не більше -при розливці, (кВт·год)/т -при витримці (кВт·год)/т	20 60	15 50	12,5 40	10 40
Живлення	Змінний трифазний струм напругою 380/220 В, частотою 50Гц			

На базі конструктивної схеми у ФТІМС НАН України розроблено два зразки магнітодинамічних міксерів: з одним зливним носком - для заливки металу в один металоприймач, і з двома зливними носками - для подачі металу в два металоприймача. В останньому варіанті індукційна одиниця оснащена двома електромагнітами з незалежними джерелами електроживлення. Магнітодинамічний міксер розміщується в ливарному цеху з урахуванням його технологічного використання. Електрообладнання міксера знаходиться в окремому приміщенні площею 20 м². Застосування міксера дозволяє повністю виключити ручну працю при розливанні металу, підвищити продуктивність праці, поліпшити якість металу і знизити брак литва, поліпшити умови праці.

На рис. 2.1 показана схема розміщення магнітодинамічного міксер-дозатора на ділянці заливки форм у чавуноливарному цеху.

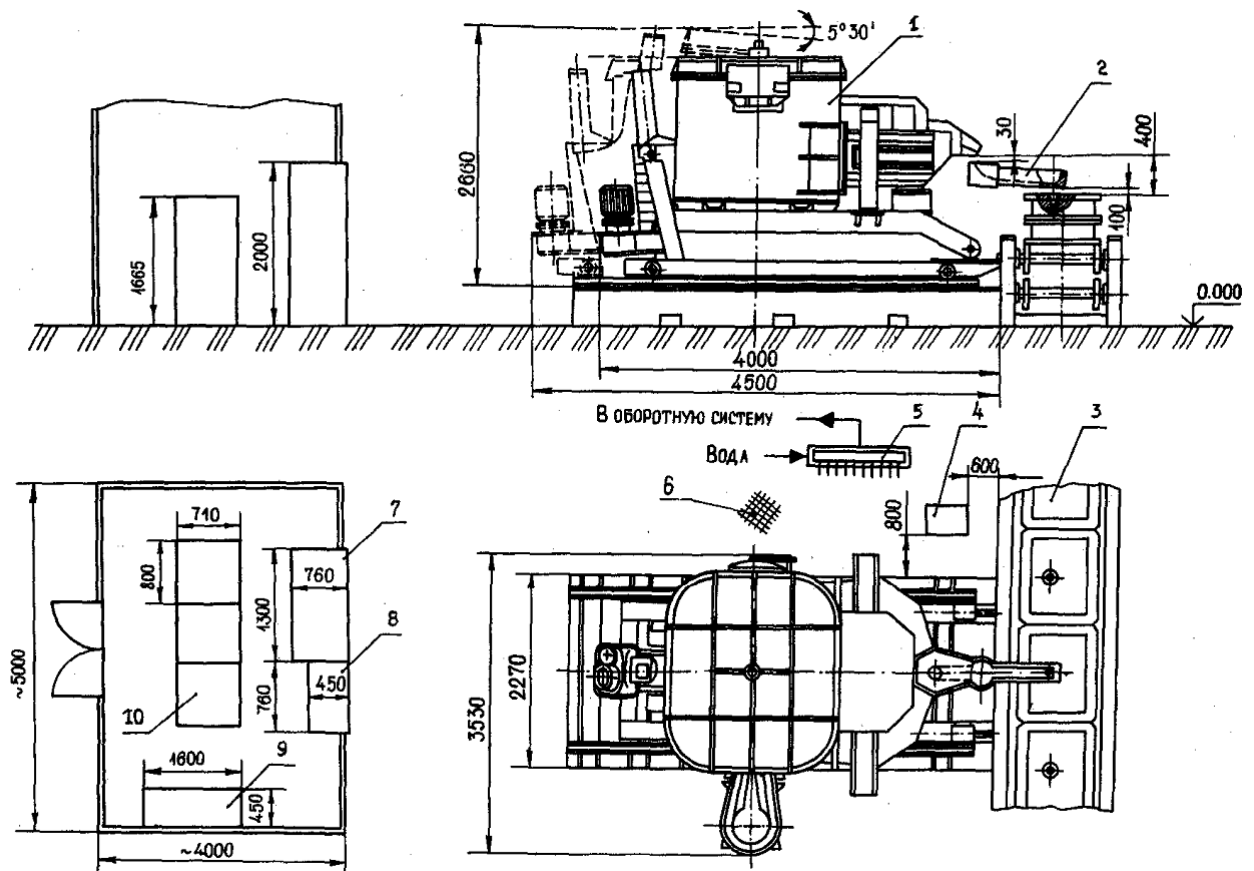


Рис. 2.1 – Схема розміщення магнітодинамічного міксер-дозатора на ділянці заливки форм у чавуноливарному цеху

- 1 – міксер; 2 – жолоб; 3 – ливарна лінія; 4 – пульт керування; 5 – колектор для води; 6 – робоча площадка; 7 – шафа електроживлення;
- 8 – шафа керування; 9 – блок конденсаторів; 10 – автотрансформатори.

Саме цей міксер-дозатор і запропонована компановка застосовані при литті гільз циліндрів тракторних двигунів.

2.2. Загальні характеристики МДН

Ефективність роботи МДН як пристрою для транспортування металу визначається його повним гідравлічним ККД:

$$\eta_z = \frac{P_z}{P_i + P_e}, \quad (2.1)$$

де P_z – корисна гідравлічна потужність;

P_i – потужність, підведена до індуктора;

P_e – потужність, підведена до магніту.

Зазвичай η_a для ливарних і металургійних становить десяті частки відсотка (що характерно і для інших металургійних МГД-насосів) і, як правило, не є визначальним параметром. Більш правильно ливарні і металургійні МГД-установки характеризувати питомою потужністю на одиницю розвинутого тиску P_p :

$$P_p = \frac{P_i + P_e}{p}, \quad (2.2)$$

де p – перепад тиску в робочій зоні.

Оскільки МДН – ливарна установка, то в більшості випадків цікавить її термічний ККД:

$$\eta_m = \rho_m \cdot c_m \cdot Q_n \cdot \frac{T_{вих} - T_{вх}}{P_i + P_e}, \quad (2.3)$$

де ρ_m – густина металу;

c_m – теплоємність металу;

Q_n – витрата (продуктивність) насоса;

$T_{вх}$ – температура на початку металотракту;

$T_{вих}$ – температура в кінці металотракту.

Термічний ККД МДН становить 30-70%, електричний – 50-80%. Це набагато вище, ніж в інших типах металургійних МГД-пристроїв. Інколи оперують також гідротермічним ККД:

$$\eta_{zm} = \eta_m + \eta_z, \quad (2.4)$$

Для оцінки технологічних установок порівняння їх по енергетичним ККД не завжди показово, а в багатьох випадках і неможливо. Більш доцільно співставлення питомих витрат енергії, а також потужності, маси, капіталовкладень, трудовитрат і т.п. на одиницю корисного ефекту (наприклад, масу придатних відливків, продуктивність по плавці, заливанні або обробці (кг/год), корисне завантаження і ін.). Так, ДСТУ 26354–84 передбачає для заливочних МДН два таких показника – питому масу і питому витрату енергії, віднесені до максимальної продуктивності установки.

2.3. Розрахунок електричних і теплових параметрів установки МД-6300

Вихідні дані:

1. Параметри установки

- 1.1. Корисна маса завантаження ванни, кг, не менше 3000.
- 1.2. Продуктивність при перегріві (на 100 °С), кг/год, 3000.
- 1.3. Потужність індукторів, кВт, не більше 360.
- 1.4. Потужність електромагніте, кВт, не більше 60.

2. Характеристика металу

- 2.1. Сірий чавун марки СЧ 20 такого хімічного складу: С-3.3-3.5%, Si-1.4-2.4%, Mn-0.7-1.0%, P<0.2%, S<0.15%.
- 2.2. Температура розливаемого чавуну, К (град С), не більше 1693 К (1420 °С).

2.3. Температура доливаемого чавуну, К (град С), не менее 1593 К (1320 °С).

2.4. Потребный электроопор при температурі розливки, Ом·м, $1,5 \cdot 10^{-6}$.

2.5. Глибина проникнення електромагнітної хвилі при $f=50$ Гц, 0,087.

2.6. Густина при температурі розливки, кг/м³, $7,3 \cdot 10^3$.

3. Характеристика системи електроживлення

3.1. Напруга живлення мережі, В, 380.

3.2. Частота струму, Гц, 50.

3.3. Параметри вторинної обмотки трансформаторів живлення (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Паспортні і розрахункові характеристики вторинної обмотки силового трансформатора АОЭСЗ-180/420

Ступені		1	2	3	4	5	6	7	8
Паспортні дані	$U_{тр2}$, В	420	380	349	322	272	221	171	112,5
	$I_{тр2}$, А	429	475	501	497	294	298	292	266
	P , кВт	180	180	175	160	80	66	50	30
Розрахункові дані після компенсації	$I_{тр2}$, А	505	459	420	386	327	266	208	138
	P , кВт	191	156	132	112	80	53	32	14

4. Система індуктування струму в рідкому металі. Індуктор складається з двох 0-подібних магнітопроводів, з'єднаних разом і двох обмоток, які є первинними в системі індуктування струму. Вторинним витком є канал з рідким чавуном, який замикається навколо індуктора.

4.1. Магнітопровід виконується шихтованим із листової електромеханічної сталі з товщиною листа 0,35 мм.

4.2. Стержень, на якому розміщена котушка, виготовляється ступінчастим.

Площа перерізу заліза магнітопроводу під котушкою (без врахування площі накладних пластин) $S'_{FE}=0,0420$ м²; площа перерізу заліза іншого магнітопроводу (без врахування площі накладних пластин), $S'_{FE}=0,0420$ м².

4.3. Обмотки індуктора однакові і кожна представляє собою котушку, розміщену на стержні магнітопроводу, що проходить всередині витка. Виконується у вигляді одношарової циліндричної котушки, навитої із мідної трубки. Навивка виконується на циліндричний каркас із стіклотекстоліта товщиною 5 мм. Стяжка котушки по висоті здійснюється за допомогою двох стіклотекстолітових шайб товщиною 25 мм. Між витками передбачені прокладки товщиною 3 мм:

- кількість витків $W_u=25$;
- переріз обмоточної трубки $14 \times 17 \times 2$;
- висота обмотки (без врахування фланців) $f_u=422$ мм;
- товщина обмотки $l_u=17$ мм.

5. Розрахунок електричного опору системи "індуктор-виток рідкого металу".

Розрахунок виконуємо по формулам:

- активний опір

$$R_e = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{1}{\eta} \cdot f} \cdot \sum \frac{a_{xi}}{f_{xi}} \cdot F_{xi}, \quad (2.5)$$

- індуктивний опір

$$x_e = 8 \cdot 10^{-6} \cdot f \frac{\Delta S}{b_u} \cdot k_R \cdot k_S, \quad (2.6)$$

- повний опір

$$z_e = \sqrt{R_e^2 + x_e^2}, \quad (2.7)$$

де $\frac{1}{\eta}$ – питомий електричний опір чавуну;

f – частота струму;

a_{xi} – довжина ділянки витка;

l_{xi}, f_{xi} – розміри перерізу витка на ділянках довжиною a_{xi} , (l_{xi} – розмір в напрямку проникнення електромагнітної хвилі);

F_{xi} – функція Бесселя для ділянок з різною геометрією;

ΔS – еквівалентна площа зазора, рівна сумі площ між обмоткою і витком, з урахуванням 1/3 площ обмотки індуктора і витка;

k_R – коефіцієнт Роговського;

k_S – коефіцієнт, що враховує різницю висот витка і обмотки індуктора.

Обмотки індуктора ввімкнені таким чином, що створені струми в центральному каналі рідкометалевого витка направлені назустріч один одному (режим “Насос”). Бокові вітки каналу симетричні відносно осі, що проходить вздовж центрального каналу, тому при розрахунку електроопору розглядається тільки половина витка.

Для розрахунку активного опору виток розбивається на ділянки.

5.1. Активний опір витка

- активний опір половини витка

$$\frac{1}{2} R_{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \cdot$$

$$\left(\frac{0,630}{0,100} \cdot 0,955 + \frac{0,830}{0,100} \cdot 1,48 + \frac{0,408}{0,100} \cdot 1,5297 + \frac{0,360}{0,100} \cdot 1,48 + \frac{0,125}{0,075} \cdot 1,48 + \frac{0,075}{0,05} \cdot 1,48 \right) =$$
$$= 1,73 \cdot 10^{-5} \cdot 34,56 = 5,99 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

- активний опір всього витка

$$R_{\epsilon} = 2 \cdot 5,99 \cdot 10^{-4} = 11,98 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

5.2. Індуктивний опір

5.2.1. Розрахункова площа зазору ΔS :

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S'', \quad (2.8)$$

де $\Delta S''$ – площа зазору між обмотками;

$\Delta S'$ – інша залишкова площа зазору.

Площі $\Delta S'$ і $\Delta S''$ дорівнюють відповідно 0,6421 м² і 0,0524 м².

Для них коефіцієнти k_R і k_S , що входять в формулу для розрахунку x_B , різні.

5.2.2. Коефіцієнт Роговського.

$$k_R = 1 - \frac{\Delta_{cp} + L_{b_{cp}} + L_u}{\pi \cdot b_u}, \quad (2.9)$$

де $\Delta_{cp} = \frac{\Delta S_1}{L_{cp}}$ – середній зазор між витком і обмоткою індуктора;

$\Delta S_1 = \Delta S'_1 + \Delta S''_1$ – площа зазору між витком і обмоткою + площа зазору між обмотками індуктора (визначається аналогічно ΔS , але без врахування 1/3 площі обмотки і витка);

L_{cp} – довжина середньої лінії зазору.

Для площі $\Delta S'$

$$\Delta S'_1 = 0,5886 \text{ м}^2; L'_{\bar{n}\bar{o}} = 1,74 \text{ м}; \Delta'_{\bar{n}\bar{o}} = \frac{0,5886}{1,74} = 0,338 \text{ м};$$

$$L'_{b_{cp}} = \frac{l_1 \cdot a_1 + \dots + l_6 \cdot a_6}{a_1 + \dots + a_6} = 0,073 \text{ м}.$$

Тоді

$$k'_R = 1 - \frac{0,338 + 0,073 + 0,017}{3,14 \cdot 0,422} = 0,677.$$

Для площі $\Delta S''$

$$\Delta S'_1 = 0,0524 \text{ м}^2; L''_{\text{нд}} = 0,230 \text{ м}; \Delta'_{cp} \frac{0,0524}{0,230} \text{ м};$$

$L'_{b_{cp}} = 0,017 \text{ м}$, оскільки витком по відношенню до обмотки першого індуктора є обмотка другого індуктора,

5.2.3. Коефіцієнт k_s

$$k_s = 1 + \frac{b_u - b_{ep}}{3,5 \cdot b_u} \left(1 + \frac{\pi}{3} \cdot \frac{b_u - b_{ep}}{\Delta_{cp} + \frac{l_{ep} + l_u}{3}} \right) \quad (2.10)$$

для площі $\Delta S'$

$$b'_{b_{cp}} = \frac{b_1 \cdot a_1 + \dots + b_6 \cdot a_6}{a_1 + \dots + a_6} = 0,0971 \text{ м}$$

$$k'_s = 1 + \frac{0,422 - 0,0971}{3,5 \cdot 0,422} \left(1 + \frac{\pi}{3} \cdot \frac{0,422 - 0,0971}{0,338 + \frac{0,073 + 0,017}{3}} \right) = 1,42$$

для площі $\Delta S''$

Тоді

$$k''_s = 1.$$

5.2.4. Індуктивний опір всієї системи “індуктор-виток рідкого металу”

$$x_{\epsilon} = 2 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{f}{b_u} \cdot (\Delta S' \cdot k'_R \cdot k'_s + \Delta S'' \cdot k''_R \cdot k''_s) = 16 \cdot 10^{-6} \frac{50}{0,422} \cdot$$

$$(0,6421 \cdot 0,677 \cdot 1,42 + 0,0524 \cdot 0,802 \cdot 1) = 12,61 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

5.3. Повний опір

$$z_{\epsilon} = \sqrt{(11,98^2 + 12,61^2) \cdot 10^{-4}} = 17,39 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

6. Параметри системи “індуктор-виток”. Для живлення обмоток індуктора вибрана напруга $U_u=349 \text{ В}$

6.1. ЕДС, створювана індуктором у витку рідкого металу

$$E_{\epsilon} = \frac{2 \cdot U_u}{k_u \cdot W_u} = \frac{2 \cdot 349}{1,1 \cdot 25} = 25,38 \text{ В},$$

де k_u – коефіцієнт, що враховує зниження напруги в обмотці індуктора.

6.2. Максимальна індукція в залізі магнітопроводу індуктора

$$B_{Feu} = \frac{E_{\epsilon}}{4,44 \cdot f \cdot 2 \cdot S_{Fe}} = \frac{25,38}{4,4 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 0,0420} = 1,36 \text{ Тл.}$$

6.3. Струм в рідкому металі

$$I_{\epsilon} = \frac{E_{\epsilon}}{z_{\epsilon}} = \frac{25,38}{17,39 \cdot 10^{-4}} = 14525 \text{ А.}$$

6.4. Активна потужність, що виділяється у витку

$$P_{ab} = I_{\epsilon}^2 \cdot R_{\epsilon} = 14525^2 \cdot 11,98 \cdot 10^{-4} = 255 \text{ кВт.}$$

6.5. Уявна повна потужність

$$P_{sb} = E_{\epsilon} \cdot I_{\epsilon} = 25,38 \cdot 14525 = 369 \text{ кВт.}$$

6.6. Коефіцієнт потужності витка

$$\cos \phi_b = \frac{R_\theta}{Z_\theta} = \frac{11,98 \cdot 10^{-4}}{17,39 \cdot 10^{-4}} = 0,69$$

7. Параметри індуктора

7.1. Маса сталі магнітопроводу індуктора

$$G_{Feu} = \gamma_{Fe} \cdot \sum S_{Feu_i} \cdot L_{Feu_i}, \quad (2.11)$$

де S_{Feu_i} – площа перерізу набору сталі на i -й ділянці;

$\gamma_{Fe}=7,65 \cdot 10^3$ кг/м³ – густина сталі;

$$G_{Feu} = 7,65 \cdot 10^3 (2 \cdot 0,0423 \cdot 2,460 + 2 \cdot 0,0423 \cdot 0,630 + 2 \cdot 0,0420 \cdot 0,630) = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 0,314 = 2405 \text{ кг}$$

7.2. Втрати потужності в сталі магнітопроводу (без врахування втрат в накладних пластинах).

Для сталі марки 3412 основними нормативними показниками є питомі втрати при магнітній індукції 1,5 Тл і частоті 50 Гц і магнітна індукція при напрузі магнітного поля 2500 А/м.

$$P_{Feu} = P \cdot \frac{B_{Feu}^2}{B_{Feu}^2(\text{ГОСТ})} \cdot G_{Feu} = 1,5 \frac{1,36^2}{1,5^2} \cdot 2405 = 2966 \text{ Вт.}$$

7.3. Активна складова струму холостого ходу індуктора

$$I_{0a} = \frac{P_{Feu}}{2 \cdot U_u} = \frac{2966}{2 \cdot 349} = 4,25 \text{ А}$$

7.4. Струм холостого ходу індуктора

$$I_{0u} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} = \sqrt{4,25^2 + 39,44^2} = 39,67 \text{ A}$$

де $I_{0p}=39,44$ А – струм намагнічування (реактивна складова струму холостого ходу).

7.5. Максимальний струм в обмотці індуктора при $U_u=349$ В

$$I_u = I_{\phi} + I_{0u} = 620 \text{ A}$$

де I_{ϕ} – приведенне до первинної обмотки значення струму витка.

7.6. Втрати потужності в обмотці індуктора

$$P_{Cu} = I_u^2 \cdot R_u = 620^2 \cdot 4,67 \cdot 10^{-3} = 1795 \text{ Вт}$$

де $R_u=4,67 \cdot 10^{-3}$ Ом – активний опір обмотки індуктора.

7.7. Вага міді обмотки індуктора

$$G_{Cu_u} = G_{Cu} \cdot (l_{Cu} \cdot W_u + l_{\text{вив}}) = 24,2 \text{ кг}$$

де $G_{Cu} = 0,96$ кг – вага 1 м трубки $14 \times 17 \times 2$;

$l_{Cu}=0,989$ м – довжина середньої лінії одного витка обмотки;

$l_{\text{вив}}= 0,480$ м – довжина двох виводів обмотки.

7.8. Потужність індуктора

7.8.1. Активна потужність індуктора

$$P_{au} = P_{a\phi} + 2 \cdot P_{Cu} + P_{Feu} = 255 + 2 \cdot 1,8 + 3 = 261,6 \text{ кВт}$$

Кожна обмотка індуктора ввімкнена від свого трансформатора, тобто навантаження на кожну обмотку трансформатора дорівнює $\frac{1}{2}P_{au}=262/2=131$ кВт.

7.8.2. Повна потужність

$$P_{su} = 2 \cdot U_u \cdot I_u = 349 \cdot 620 = 216380 \text{ Вт} = 434 \text{ кВА}$$

7.8.3. Реактивна потужність

$$P_{pu} = 2 \cdot \sqrt{P_{su}^2 - P_{au}^2} = 2 \cdot \sqrt{217^2 - 131^2} = 346 \text{ кВА}$$

7.9. Коефіцієнт потужності індуктора (фактично половини)

$$\cos \phi_u = \frac{P_{au}}{P_{su}} = \frac{262}{434} = 0,6$$

7.10. Максимальна потужність, що споживається в системі “індуктор-виток”

$$P_u = P_{au} + 2 \cdot P_{a_{mp}} + P_{a_{Cu}} = 262 + 2 \cdot 0,240 + 1,78 = 264,26 \text{ кВт}$$

де $P_{a_{mp}}=0,24$ кВт – втрати в трансформаторі живлення обмотки індуктора.

7.11. Електричний ККД системи індуктування струму

$$\eta_{ел.и} = \frac{P_{ab}}{P_u} = \frac{255}{264} = 0,965$$

8. Розрахунок системи створення зовнішнього магнітного поля в робочій зоні.

8.1. Характеристика магнітопроводу. Магнітопровід має Т-подібну форму; площа перерізу шихтованого заліза під котушкою $S'_{Fe}=0,03819 \text{ м}^2$; розміри полюсного накінецьника: ширина пластини $2l_{п}=0,230 \text{ м}$, товщина пакету $2a_{п}=0,183 \text{ м}$; площа інших частин магнітопроводу $S''_{Fe}=0,02196 \text{ м}^2$. Магнітопровід електромагніта виготовлений із тієї ж марки сталі, що і магнітопровід індуктора.

8.2. Характеристика обмотки електромагніта.

Обмотка намотана мідною трубкою $17 \times 14 \times 2$ у два шари, по 17 витків на кожному. $W_e=33$.

8.3. ЕРС на виток при номінальній напрузі живлення $U_e=380 \text{ В}$

$$E_0 = \frac{U_e}{K_u \cdot W_e} = \frac{380}{1,1 \cdot 33} = 10,37 \text{ В}$$

8.4. Максимальна індукція в магнітопроводі електромагніту

$$B_{Fe e} = \frac{E_0}{4,44 \cdot f \cdot S_{Fe e} \cdot 0,9} = \frac{10,37}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,03819 \cdot 0,9} = 1,36 \text{ Тл}$$

8.5. Струм в обмотці електромагніту. Із експериментальних даних струм в обмотці електромагніте при номінальній напрузі $U_e=380 \text{ В}$ дорівнює $I_e=1120 \text{ А}$.

8.6. Густина струму в обмотці

$$J_e = \frac{I_e}{S_{Cu_e}} = \frac{1120}{108} = 10,4 \text{ A/мм}^2$$

8.7. Втрати потужності в обмотці електромагніте

$$P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e = 1120^2 \cdot 6,35 \cdot 10^{-3} = 7970 \text{ Вт} = 7,97 \text{ кВт}$$

8.8 Втрати потужності в залізі магнітопроводу

$$P_{Fee} = P \cdot \frac{B_{Fee}^2}{B_{Fee}^2} \cdot G_{Fee} = 1,5 \frac{1,36^2}{1,5^2} \cdot 185 = 228 \text{ Вт}$$

8.9. Потужність електромагніте

- активна потужність (розрахункова)

$$P_{ae} = P_{Cu_e} + P_{Fee} = 7,97 + 0,228 = 8,198 \cdot \text{кВт}$$

Оскільки робоча зона МДН займає незначну область немагнітного зазору, робочий магнітний потік складає малу частину повного магнітного потоку. У зв'язку з цим є великі втрати потужності на вихреві струми в накладних пластинах магніту і конструктивних елементах кріплення.

Із експериментальних даних по аналогічному електромагніту визначено, що додаткові втрати на вихреві струми в накладних пластинах становлять 16,4 кВт, а в конструктивних елементах кріплення і в кожусі 12,8 кВт.

Тому приймаємо, що активна потужність електромагніте становить:

$$P_{ae} = 8,2 + 16,4 + 12,8 = 37,4 \cdot \text{кВт}$$

- повна потужність електромагніте

$$P_{se} = U_e \cdot I_e = 380 \cdot 1120 = 425,6 \text{ кВт}$$

- реактивна потужність

$$P_{se} = \sqrt{P_{se}^2 - P_{ae}^2} = \sqrt{425,6^2 - 38^2} = 424 \text{ кВт}$$

8.10. Коефіцієнт потужності електромагніте

$$\cos \phi_e = \frac{P_{ae}}{P_{se}} = \frac{37,4}{425,6} = 0,089$$

8.11. Повна потужність електромагніте:

$$P = P_{ae} + P_{amp} + P_k = 38 + 0,240 + 2,12 = 40,36 = 41 \text{ кВт}$$

де $P_{amp}=0,240$ кВт – втрати потужності в трансформаторі;

$P_k=2,12$ кВт – втрати потужності в батареї конденсаторів.

8.12. Струм в системі створення магнітного поля після компенсації реактивної потужності

$$I_{mp2} = \frac{41 \cdot 10^3}{380 \cdot 0,9} = 119 \text{ А}$$

що набагато менше, ніж допустимий.

9. Тепловий розрахунок.

Втрати тепла в установці відбуваються за рахунок теплопровідності і теплової конвекції. Теплові втрати визначаються за формулою:

$$Q = k \cdot S(T_m - T_o) = q \cdot S, \text{ кВт} \quad (2.12)$$

де S – площа поверхні, через яку іде теплопередача, м^2 ;

T_i – температура металу;

T_o – температура охолоджувача;

k – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

q – густина теплового потоку.

Коефіцієнт теплопередачі k розраховували за формулою:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{вн}}}, \quad (2.13)$$

де α_o – коефіцієнт тепловіддачі від нагрітої стінки в повітря, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

$\alpha_{вн}$ – коефіцієнт тепловіддачі від металу до внутрішньої стінки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -го шару футеровки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$;

Δ_i – товщина i -го шару футеровки, м .

Товщини і склад окремих частин тигля і каналу різні, тому тепловий потік розраховуємо для кожної частини окремо.

Для визначення густини теплового потоку слід розв'язати систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
q_1 &= \frac{T_m - T_1}{\Delta_1} \cdot \lambda_1(T) \\
q_2 &= \frac{T_1 - T_2}{\Delta_2} \cdot \lambda_2(T) \\
q_i &= \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta_i} \cdot \lambda_i(T) \\
q_0 &= \alpha_s(T_{нов} - 20)
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

9.1. Теплові втрати тигля

Для визначення теплових втрат через стінку розраховується величина внутрішньої $S'_{вн}$ і зовнішньої поверхні $S''_н$ цієї стінки.

Таким чином, розраховуючи окремо втрати з різних ділянок тигля отримуємо:

9.1.1. Втрати тепла з дна тигля

$$P_{m.дн} = 7,107 \text{ кВт.}$$

9.1.2. Втрати з бокових стінок тигля

$$P_{m.см1} = 4,544 \text{ кВт,}$$

$$P_{m.см2} = 3,744 \text{ кВт,}$$

$$P_{m.см3,4} = 6,521 \text{ кВт.}$$

9.1.3. Втрати з вікна тигля

$$P_{m.o} = 1,385 \text{ кВт.}$$

9.1.4. Втрати з кришки тигля

$$P_{m.кр} = 11,859 \text{ кВт.}$$

9.1.5. Загальні втрати тигля

$$P_m = 7,107 + 4,544 + 3,774 + 6,521 + 6,521 + 1,385 + 11,859 = 41,711 \text{ кВт.}$$

9.2. Теплові втрати з каналу установки.

Футеровка насоса складається із двох шарів: МК-90 ($\lambda_1=1,76-0,23 \cdot 10^{-3} T_{cp}$) і азбеста ($\lambda_2=0,2+0,22 \cdot 10^{-3} T_{cp}$). Розв'язавши систему рівнянь (2.14) для двохшарової стінки каналу, отримуємо:

9.2.1. втрати з верхньої частини каналу (без врахування на ній охолоджувальної системи):

$$P_{вер.к} = 5,639 \text{ кВт.}$$

9.2.2. Втрати з нижньої частини каналу:

$$P_{низ.к1} = 1,990 \text{ кВт,}$$

$$P_{низ.к2} = 5,975 \text{ кВт.}$$

9.2.3. Втрати з бокової поверхні каналу:

$$P_{бок.к} = 4,9224 \text{ кВт.}$$

9.2.4. Теплові втрати в бік індукторів:

$$P_{индк} = 12,7596 \text{ кВт}$$

9.2.5. Теплові втрати випромінюванням із зливного носка:

$$P_{випр} = k_u \cdot S_u \left[\left(\frac{T_M}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_с}{100} \right)^4 \right] \cdot \tau = 2,51 \text{ кВт}$$

9.2.6. Загальні втрати теплоти з каналу

$$P_k = 5,639 + 1,99 + 5,975 + 4,9224 + 12,7596 + 2,51 = 33,796 \text{ кВт}$$

9.2.7. Теплові втрати з тигля і каналу

$$P_{TK} = 33,796 + 41,711 = 75,507 \text{ кВт.}$$

9.2.8. Невраховані втрати – прийнято 20% і становлять 15,101 кВт.

9.2.9. Загальні теплові втрати:

$$\sum P_{TK} = 75,507 + 15,101 = 90,608 \text{ кВт.}$$

Отже, мінімальна потужність індуктора в режимі зберігання металу з урахуванням електричного ККД системи індуктування струму становить: 91 кВт.

3. Науково-практичні аспекти підвищення фізико-механічних і експлуатаційних властивостей сірого чавуну при виготовленні литих гільз циліндрів тракторних двигунів

Залізовуглецеві сплави мають порівняно з кольоровими (наприклад, алюмінієвими) погіршені основні фізичні властивості: високу температуру плавлення і розливання, високу хімічну агресивність самого розплаву і його шлаку, відносно низьку електро- і теплопровідність та ін. З одного боку, це призводить до необхідності істотного збільшення (в 3-5 разів) товщини футеровки в агрегатах для чавуну і сталі, а з іншого - до значного зростання (в 5-10 разів) потужності електромагнітних систем обладнання. Внаслідок дії такого комплексу несприятливих факторів, можливості магнітодинамічних пристроїв для чавуну і сталі по МГД обробці, особливо по руйнуванню мікронеоднорідності в рідкому сплаві, істотно обмежені, наприклад, в порівнянні з агрегатами для алюмінію. Однак, за ефективністю впливу на металевий розплав на макрорівні (нагрів, перемішування) міксери-дозатори для чавуну і сталі не поступаються установкам для кольорових металів і сплавів [2].

Були проведені дослідження впливу фізичної обробки сірого чавуну (хімічний склад, % мас.: 3,1-3,3 C, 2,2-2,8 Si, 0,6-0,8 Mn, 0,5-0,7 Cr, 0,3-0,5 Cu, 0,1-0,2 Ni, менше 0,1 S, менше 0,15 P) в магнітодинамічному міксері-дозаторі на його структуру і властивості при виготовленні виливків гільз циліндрів тракторних двигунів.

У порівнянні з традиційним технологічним процесом (виливка в ІЧТ і подальша ковшова розливка) виливки, розлиті магнітодинамічним міксером-дозатором, мають більш щільну макроструктуру, в ній відсутні пористість і шаруватість.

Мікроструктура гільзи по перетину однорідна, зменшуються розміри графітових включень (рис. 3.1), а також подрібнюється структура металевої основи (перліту, рис. 3.2). Це забезпечує ізотропію основних властивостей

(твердості, тимчасового опору розриву і вигину) по поверхні і по перетину виливка при одночасному їх збільшенні на 5-10% (рис. 3.3 і рис. 3.4).



а)



б)

Рис. 3.1 – Форма пластинчастого графіту в сірому чавуні
а) – традиційна розливка; б) – електромагнітна розливка

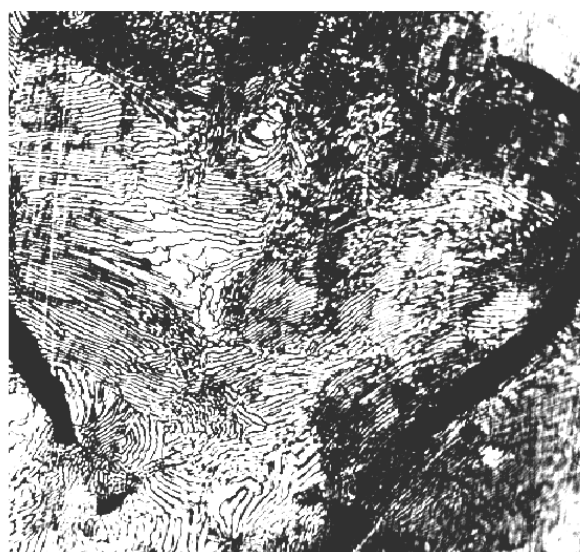
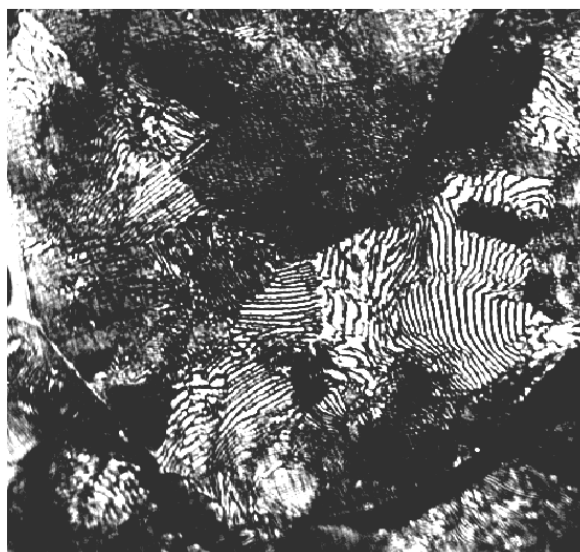


Рис. 3.2 – Форма перліту в сірому чавуні
а) – традиційна розливка; б) – електромагнітна розливка

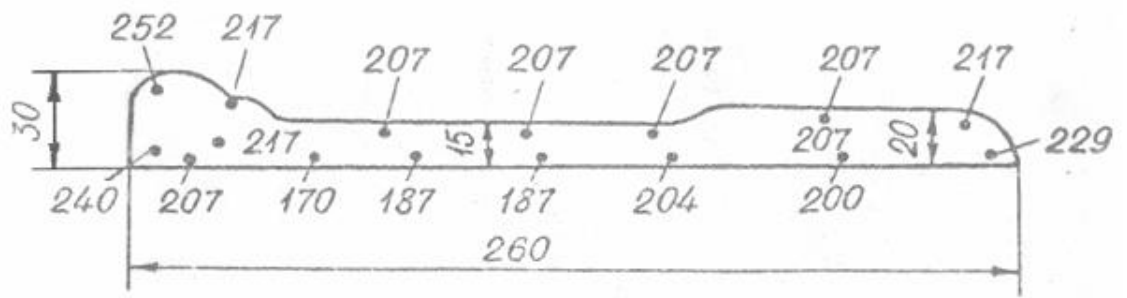


Рис. 3.3 – Зміна твердості чавуну по перетину зразка
(традиційна розливка)

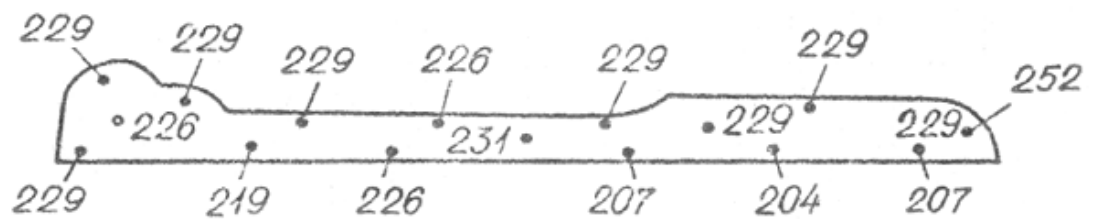


Рис. 3.4 – Зміна твердості чавуну по перетину зразка
(електромагнітна розливка)

Головною причиною зростання механічних властивостей чавунних виливків, отриманих після МГД обробки і електромагнітної розливання магнітодинамічним міксером-дозатором, слід вважати зміну умов термочасової обробки. Витримка розплаву в міксері-дозаторі під час коротких виробничих пауз і в інтервалах між розливанням порцій металу відбувається при постійній і досить високій температурі, наближеній до температури розливання. Витримка супроводжується безперервним інтенсивним перемішуванням розплаву під дією електромагнітних сил, що сприяє гомогенізації металу по хімічному складу, температурі і структурі в рідкому стані, що забезпечує ідентичні умови кристалізації виливків і обумовлює подрібнення і однорідність структури литого сплаву [3, 4].

Як показав досвід промислового застосування магнітодинамічного міксера-дозатора, механічні властивості (перш за все - міцність і пластичність) виливків залежать від тривалості і температури витримки вихідного розплаву.

Проведені дослідження показали, що в перші години витримки спостерігається зростання всіх основних механічних властивостей, проте через деякий час відбувається зниження показників міцності і пластичності (рис. 3.5).

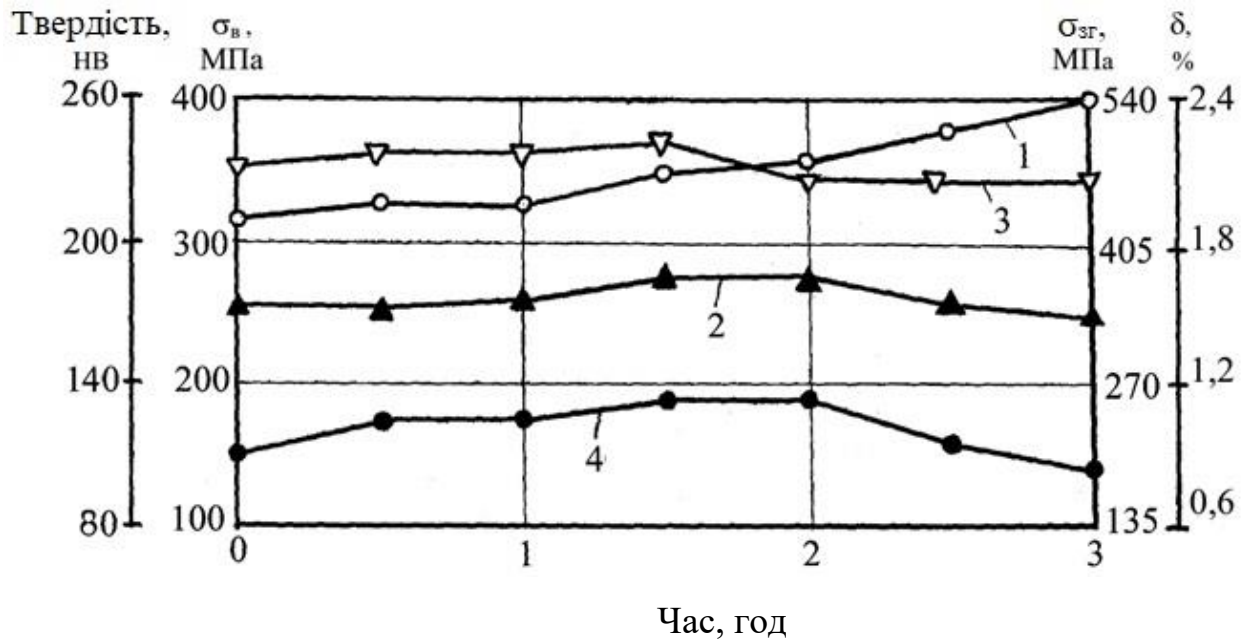


Рис. 3.5 – Зміна механічних властивостей чавуну в залежності від часу витримки в магнітодинамічному міксері-дозаторі

- 1 (○) – твердість по Бринеллю (НВ);
- 2 (▲) – відносний опір розриву ($\sigma_{\text{в}}$);
- 3 (▽) – відносний опір згинанню ($\sigma_{\text{зг}}$);
- 4 (●) – відносне подовження (δ)

Середні значення механічних властивостей для партій чавунних виливків приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Середні значення механічних властивостей чавунних виливків

Параметр	Розливка	
	Ковшова	Електромагнітна
Тимчасовий опір розриву, МПа	200-220	220-230
Тимчасовий опір згинанню, МПа	400-410	420-430
Твердість, НВ	200-210	220-225

Такий характер зміни властивостей чавуну можна пояснити самою природою його рідкого стану. Відомо, що при тривалій витримці в чавуні відбувається зменшення кількості центрів кристалізації внаслідок розчинення вільного вуглецю в перегрітому розплаві і коагуляції, спливання неметалевих включень. Це призводить до кристалізації відбіленого чавуну. Виливки, отримані з такого металу, відрізняються підвищеною твердістю. Тому, тривала витримка чавуну при високій температурі в магнітодинамічному міксері-дозаторі не рекомендується. В цілому період технологічної витримки чавуну між періодами розливання в міксері не повинен перевищувати 2 години. У разі необхідності перевищення цього часу, слід проводити обробку чавуну модифікаторами (наприклад, феросиліцієм), що сприяє утворенню в металі додаткових центрів кристалізації і усунення відбілу у виливках, або переходити на режими тривалої витримки при більш низьких температурах. Як показали дослідження, в такому разі істотної зміни хімічного складу і як його наслідки - падіння рівня властивостей - не відбувається, і крім того, забезпечується економія енергоресурсів.

Висновки

В роботі вивчено вплив електромагнітної обробки і розливки розплаву сірого чавуну на фізико-механічні властивості литих гільз циліндрів тракторних двигунів при застосуванні магнітодинамічного міксер-дозатора моделі МД-6300.

Встановлено зменшення розмірів графітових включень, подрібнення структури металевої основи і підвищення від 5 до 10% тимчасового опору розриву, тимчасового опору згинанню і твердості у литих гільзах циліндрів тракторних двигунів, отриманих електромагнітною обробкою і розливкою.

Список літератури

1. Сумцов В.П. Устаткування ливарних цехів. - К.: ІСДО, 1993. - 552 с.
2. Хричиков В.Е., Меньйло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. Видання друге, доопрацьоване. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. – 89 с.
3. Пахаренко В.Л., Марчук М.М. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів (металургія, ливарне виробництво). Навчальний посібник. – Рівне, 2009. – 182 с.
4. Бялік Г.А., Наумик В.В., Луньов В.В., Пархоменко А.В. Теорія ливарних сплавів. Навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 156 с. – ISBN: 978-617-529-068-2.