

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра: „Матеріалознавство та ливарне виробництво”

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр Кузик

“ _____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

на тему:

**“Дослідження впливу електромагнітної обробки
сірого чавуну на структуру і властивості литих гільз
циліндрів тракторних двигунів”**

**“Study of the influence of electromagnetic treatment
of gray cast iron on the structure and properties
of cast cylinder liners of tractor engines”**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи МЗ-23мб

спеціальності 132 – «Матеріалознавство»

_____ Балакай Є.В.

“ _____ ” _____ 2026 р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____ Віктор Ломакін

“ _____ ” _____ 2026 р.

Рецензент _____

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет _____ механіко-технологічний _____
Кафедра _____ матеріалознавства та ливарного виробництва _____
Рівень вищої освіти _____ бакалавр _____
Галузь знань _____ матеріалознавство _____
Спеціальність _____ 132 – Матеріалознавство _____
Освітньо-професійна програма: Прикладне матеріалознавство та
інжиніринг

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри

“ _____ ” _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Балакай Євген Володимирович

прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: “Дослідження впливу електромагнітної обробки сірого чавуну на структуру і властивості литих гільз циліндрів тракторних двигунів”, затверджена наказом по університету №166-02 від 13.03.26.
2. Керівник роботи: Ломакін Віктор Миколайович, к.т.н., доцент
3. Строк подання роботи до захисту: .06.2026 р.
4. Мета кваліфікаційної роботи: дослідити вплив електромагнітної обробки сірого чавуну на структуру і властивості литих гільз циліндрів тракторних двигунів.

Завданням роботи є: огляд способів впливу на структуру і властивості сплавів; дослідження структури і властивостей литих гільз циліндрів тракторних двигунів при різних режимах електромагнітної обробки розплаву сірого чавуну.

5. Консультанти по роботі із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Огляд способів впливу на структуру і властивості сплавів	Ломакін В. М.		
Дослідження структури і властивостей литих гільз циліндрів тракторних двигунів при різних режимах електромагнітної обробки розплаву сірого чавуну	Ломакін В. М.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд способів впливу на структуру і властивості сплавів		
2.	Дослідження структури і властивостей литих гільз циліндрів тракторних двигунів при різних режимах електромагнітної обробки розплаву сірого чавуну		
4.	Оформлення пояснювальної записки		
5.	Оформлення рецензії		
6.	Захист кваліфікаційної роботи		

Дата видачі завдання:

“ _____ ” _____ 2026 р.

Підпис керівника

Ломакін В. М.

(прізвище та ініціали)

Підпис здобувача

Балакай Є. В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

стор. 45, рис. 9, табл. 3, бібліографічних назв 4

Сірий чавун, структура, домішки графіту, міцність, твердість, подовження, електромагнітна обробка, міксер, індуктор, електромагніт

Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на тему “Дослідження впливу електромагнітної обробки сірого чавуну на структуру і властивості литих гільз циліндрів тракторних двигунів” складається з п'яти розділів.

В першому розділі роботи розглянуто методи модифікації структури та властивостей сплавів.

В другому розділі роботи наведено методи обробки сплавів в рідкому стані.

Третій розділ присвячено загальній характеристиці магнітодинамічних пристроїв, що використовуються для обробки чорних і кольорових сплавів.

В четвертому розділі бакалаврської роботи викладено обґрунтування і зроблено вибір магнітодинамічного міксера моделі МД-6300 для обробки розплу сірого чавуну.

П'ятий розділ присвячено 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 тимчасового опору розриву, тимчасового опору згинанню і твердості у литих гільзах циліндрів тракторних двигунів, отриманих електромагнітною обробкою і розливкою.

Annotation

Page. 45, fig. 9, table. 3, bibliographic titles 4

Gray cast iron, structure, graphite impurities, strength, rigidity, elongation, electromagnetic processing, mixer, inductor, electromagnet

The qualifying work for the first (bachelor's) level of higher education on the topic "Study of the influence of electromagnetic processing of gray cast iron on the structure and properties of cast cylinder liners of tractor engines" consists of five sections.

The first chapter of the work examines methods for modifying the structure and properties of alloys.

The second chapter of the work presents methods for processing alloys in a liquid state.

The third chapter is devoted to the general characteristics of magnetodynamic devices used for processing ferrous and non-ferrous alloys.

The fourth chapter of the bachelor's thesis presents the rationale and selection of the magnetodynamic mixer model MD-6300 for processing molten gray cast iron.

The fifth chapter 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 manufacture 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 in the tensile strength, tensile strength and rigidity in cast cylinder liners of tractor engines obtained by electromagnetic processing and casting were established.

Зміст

стор.

Вступ	7
1. Методи модифікації структури та властивостей сплавів	9
1.1. Термічна обробка	9
1.2. Хіміко-термічна обробка: цементация, азотування, нітроцементация, ціанування	10
1.3. Борування, алітирування, хромування та силіціювання	12
1.4. Лазерна обробка сплавів	14
1.5. Іонно-імплантаційне модифікування поверхні	15
2. Методи обробки сплавів у рідкому стані	18
2.1. Вібрація сплаву при кристалізації	18
2.2. Прозвучування сплаву при кристалізації	19
2.3. Продувка сплаву інертними газами	21
2.4. Вакуумування сплавів	22
2.5. Легування та модифікування сплавів	24
2.6. Обробка сплавів електричним і магнітним полем	26
3. Магнітодинамічні пристрої для обробки чорних і кольорових сплавів	28
4. Застосування магнітодинамічного міксеру моделі МД-6300 для індукційного нагріву та ефективною електромагнітною обробки розплаву сірого чавуну	36
5. Дослідження фізико-механічних та експлуатаційних властивостей сірого чавуну при виготовленні литих гільз циліндрів тракторних двигунів	39
Висновок	44
Список літератури	45

Вступ

В сучасному матеріалознавстві 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 [1, 2].

До числа нових технологічних розробок в області приготування чорних і кольорових сплавів, що знайшли застосування в промисловості, слід віднести магнітодинамічні установки (МДН) [3, 4].

Метою роботи є: вивчення впливу електромагнітної обробки і розливки розплаву сірого чавуну при застосуванні магнітодинамічного міксер-дозатора моделі МД-6300 на властивості зразків гільз циліндрів тракторного двигуна.

Задачами роботи є:

- 1) критичний аналіз способів обробки сплавів в твердому і рідкому стані;
- 2) дослідження макро- і мікроструктури зразків гільз, отриманих ковшовою і електромагнітною розливкою;
- 3) дослідження твердості литих зразків, отриманих ковшовою і електромагнітною розливкою;
- 4) дослідження тимчасового опору розриву литих зразків, отриманих ковшовою і електромагнітною розливкою;
- 5) дослідження тимчасового опору згинанню литих зразків, отриманих ковшовою і електромагнітною розливкою;

- 6) дослідження відносного подовження литих зразків, отриманих ковшовою і електромагнітною розливкою;
- 7) узагальнення експериментальних даних і висновки.

1. МЕТОДИ МОДИФІКАЦІЇ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВІВ

1.1. Термічна обробка

Термічною обробкою називаються операції, які проводять з виробами перед чистою обробкою з метою зміни властивостей вихідного матеріалу. Властивості змінюють для збільшення або зменшення твердості і межі міцності, зміни зносостійкості, зняття внутрішніх напружень у матеріалі тощо.

Термічна обробка включає такі основні операції.

Загартування – нагрів доєвтектоїдної сталі вище точки A_{C3} на $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і подальше різке охолодження, і нагрів заєвтектоїдної сталі на $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище точки A_{C1} і подальше різке охолодження. В якості охолоджувального середовища може бути вода, масло, емульсія і розчини солей. При загартуванні аустеніт не встигає розпадатися на перліт, а перетворюється в мартенсит, який являє собою твердий пересичений розчин вуглецю в альфа-залізі. Загартована сталь набуває високої твердості і високої міцності. Однак при цьому сталь, маючи внутрішні напруження, стає крихкою.

Відпал – нагрів доєвтектоїдної сталі вище точки A_{C3} на $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а заєвтектоїдної сталі на $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище точки A_{C1} і подальше повільне охолодження, бажано разом із піччю. В умовах майстерні, де немає печі, а є горн, нагріту деталь залишають у гарячому шлаку або закривають у сухому відпрацьованому шлаку горна. Під час відпалу встигають пройти всі дифузійні процеси, завдяки чому знімаються всі внутрішні напруження, структура стає рівноважною, а отже м'якою. При відпалі зерно подрібнюється – сталь стає в'язкою. Відпал є підготовчою операцією перед загартуванням.

Відпуск – нагрів сталі нижче температури фазових перетворень, тобто нижче точки A_{C1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$). Загартована на мартенсит сталь, маючи високу твердість, має погану пластичність, високі внутрішні напруження і тому малопридатна для використання. Для покращення властивостей загартованої сталі проводять її відпуск. Відпущена сталь порівняно з невідпущеною менш напружена і менш

крихка. Залежно від температури нагріву розрізняють низький, середній і високий відпуск.

Низький відпуск полягає в нагріві до температури 150...200 °С. При цьому утворюється відпущений мартенсит, твердість якого майже не змінюється, але знижуються внутрішні залишкові напруження і підвищується пластичність. Низький відпуск проводять для ріжучого інструменту.

Середній відпуск. Деталі нагрівають до 350...500 °С, структура такої сталі складається з троститу відпуску. Твердість знаходиться в межах НВ 450–500. Середній відпуск застосовується для виробів з максимальними пружними властивостями при відносно високій твердості. До них належать пружини, ресори, ударний інструмент – зубило, штампи тощо.

Високий відпуск. У цьому випадку загартовані вироби нагрівають протягом розрахункового часу в інтервалі температур 500...650 °С. Твердість знижується до НВ 250...300. Знижуються внутрішні напруження, а пластичність і ударна в'язкість зростають. Після високого відпуску утворюється структура, що називається сорбітом відпуску. Високому відпуску піддають вироби, які працюють при знакозмінному навантаженні: шатуни, півосі, вали, пальці, шкворні тощо. Загартування з наступним високим відпуском часто називають покращенням сталі.

Охолодження виробів після відпуску можна проводити з будь-якою швидкістю, зазвичай охолоджують у воді.

1.2. Хіміко-термічна обробка: цементация, азотування, нітроцементация, ціанування

Поєднання високої твердості в поверхневому шарі деталей і в'язкої серцевини забезпечує їх високу зносостійкість і одночасно високу динамічну міцність. Для формування зазначених властивостей застосовують, залежно від необхідного рівня твердості на поверхні деталі та хімічного складу сталі, зокрема хіміко-термічну обробку (ХТО).

Хіміко-термічною обробкою називається обробка, що полягає у поєднанні термічного і хімічного впливу з метою зміни складу, структури і властивостей поверхневого шару сталі.

При ХТО відбувається насичення поверхневого шару сталі відповідним елементом (C, N, Al, Cr, Si та ін.) шляхом його дифузії із зовнішнього середовища при високій температурі. ХТО підвищує твердість поверхні, зносостійкість, кавітаційну і корозійну стійкість, створює на поверхні сприятливі залишкові напруження стиску, збільшує надійність і довговічність деталей машин.

При цементації здійснюють насичення поверхневого шару деталі атомами вуглецю. Для деталей використовують низьковуглецеві сталі з вмістом вуглецю 0,1–0,25%, що мають високу ударну в'язкість і низьку загартовуваність. Твердість цементованого шару після термічної обробки становить 60–64 HRC для вуглецевої сталі і 58–61 HRC для легованої сталі, що пояснюється підвищеною кількістю залишкового аустеніту в другій сталі.

При азотуванні здійснюється насичення поверхневого шару деталі атомами азоту. Азотуванню піддають готові деталі без подальшої механічної обробки. Процес проводять у спеціальних печах у середовищі аміаку, який при підвищенні температури дисоціює з утворенням атомарного азоту. Азот дифундує в сталь (або інший метал чи сплав), насичуючи тверді розчини і утворюючи тверді сполуки (нітриди) з Fe, Ti, а також з легуючими елементами.

Залежно від призначення і температури азотування використовують два види процесу:

1. азотування для підвищення твердості і зносостійкості легованих сталей при температурах 500–540 °C протягом 24–60 год з метою отримання шару товщиною 0,3–0,6 мм з твердістю 900–1100 HV;
2. антикорозійне азотування вище евтектоїдного перетворення (600 °C) протягом кількох годин з метою отримання шару товщиною 0,01–0,03 мм зі зниженою твердістю порівняно з низькотемпературним азотуванням.

Високотемпературне азотування застосовують для феритних і аустенітних сталей, тугоплавких металів (Ti, Mo, Nb, V та ін.).

Під ціануванням (нітроцементациєю) розуміють процес одночасного насичення сталі вуглецем і азотом. Ціанування сталевих деталей здійснюють обробкою їх у розплавлених ціаністих солях або в газовому середовищі, що являє собою суміш цементуючого (наприклад, вуглеводнів) і азотуючого (наприклад,

аміаку) газів. Також застосовується тверде ціанування, наприклад у суміші $K_4Fe(CN)_6$ з содою і деревним вугіллям.

Змінюючи температуру процесу, можна регулювати співвідношення між кількістю вуглецю і азоту в утвореному шарі. При зниженій температурі (560–600 °C) переважає насичення азотом, при підвищеній (820–950 °C) – вуглецем.

Ціанування застосовується переважно для підвищення зносостійкості ріжучого інструменту (у 1,5–2 рази). Процес високотемпературного ціанування протікає значно швидше за цементацію. При цьому досягається вища зносостійкість, втомна міцність деталей і менша вартість процесу, ніж при цементації.

1.3. Борування, алітування, хромування та силіціювання

Борування – насичення поверхневого шару металевих деталей бором. До борування вдаються головним чином з метою підвищення поверхневої твердості виробів (до HV 20000 МПа), їх зносостійкості (особливо абразивної), рідше – корозійної стійкості і теплостійкості. Боруванню піддають вироби із заліза, сплавів на його основі, а також тугоплавких металів.

Зміцнення поверхневого шару при боруванні відбувається внаслідок утворення високотвердих боридів заліза, однак слід враховувати, що боровані шари дуже крихкі.

Алітуванням називається хіміко-термічна обробка, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару сталей і сплавів алюмінієм при нагріванні в порошковому алітувальному середовищі, яке містить джерело алюмінію (порошок чистого алюмінію або сплавів Fe–Al, Ni–Al, Co–Al), галогенідний активатор (NH_4Cl , NaF, AlF_3) та інертний наповнювач (Al_2O_3 або SiO_2).

Як правило, алітування виконують у герметичних контейнерах при температурі 900–1050 °C. Найбільш широко процес алітування застосовують для захисту жароміцних нікелевих сплавів від високотемпературного окиснення.

Висока жаростійкість алюмінідних шарів забезпечується формуванням на їх поверхні під час високотемпературного відпалу або в процесі експлуатації щільної тонкої захисної оксидної плівки Al_2O_3 .

Введення другого елемента (хрому – хромоалітування, кремнію – алюмосиліціювання) суттєво підвищує захисні властивості алітованого дифузійного шару.

Дифузійне хромування застосовується для підвищення окалиностійкості (до 800 °С), корозійної стійкості в середовищі пари, у прісній і морській воді та в кислотах, особливо в азотній кислоті.

Хромування виробів із вуглецевої сталі підвищує їх твердість і зносостійкість. Дифузійний шар при хромуванні вуглецевої сталі містить карбіди хрому. Твердість шару досягає HV 13000 МПа, товщина шару зазвичай становить 0,1–0,2 мм.

Хромуванню піддають деталі паросилового обладнання, а також деталі, що працюють на зношування в агресивних середовищах. Для підвищення зносостійкості штамів застосовується комбіноване насичення сталей хромом і азотом.

При **силіціюванні** здійснюється дифузійне насичення поверхні сплаву кремнієм при температурі 950–1100 °С у відповідному середовищі.

Силіційований шар має високу стійкість до корозії в морській воді, у кислотах (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl) при кімнатних і підвищених температурах; окалиностійкість – до 800 °С (на аустенітних сталях до 1000 °С), жаростійкість і підвищену зносостійкість (після попереднього проварювання в маслі при 175–200 °С).

Силіціюванню піддають будь-які сталі, чавуни, тугоплавкі метали, а також вироби, що працюють у морській воді та слабких кислотах.

1.4. Лазерна обробка сплавів

Лазерна обробка є одним із найсучасніших методів поверхневого зміцнення металів і сплавів, який базується на використанні висококонцентрованого потоку енергії лазерного випромінювання. Завдяки високій щільності енергії лазерний

промінь забезпечує локальний нагрів поверхні без істотного впливу на внутрішні шари матеріалу.

У процесі лазерного зміцнення поверхневий шар сталі нагрівається до температур, що перевищують критичні точки фазових перетворень, а іноді – до температур плавлення. Після припинення дії лазера відбувається надшвидке охолодження (10^4 – 10^6 К/с) за рахунок тепловідводу в глиб матеріалу. Це призводить до формування нерівноважних структур із підвищеною твердістю.

Основним механізмом зміцнення є утворення дрібнодисперсного мартенситу з високою густиною дефектів кристалічної решітки. У залежності від режимів обробки можуть також формуватися бейнітні або навіть аморфні структури. Важливою особливістю є виникнення залишкових стискуючих напружень, які підвищують опір втомному руйнуванню.

Зона лазерного впливу поділяється на:

- зону плавлення (при високих енергіях);
- зону гартування (основна зона зміцнення);
- зону термічного впливу.

Глибина зміцненого шару зазвичай становить від 0,1 до 2 мм і залежить від параметрів обробки: потужності лазера, швидкості переміщення променя, часу впливу.

Лазерне зміцнення має ряд переваг:

- локальність обробки;
- висока швидкість процесу;
- мінімальні деформації;
- відсутність гартівних середовищ;
- можливість автоматизації.

Внаслідок обробки твердість поверхні зростає у 1,5–3 рази, покращуються зносостійкість і втомна міцність.

Особливості та перспективи полягають в тому, що лазерне зміцнення відзначається високою точністю та керованістю процесу, що дозволяє формувати задані властивості поверхні. На відміну від традиційних методів, воно забезпечує мінімальні теплові деформації та високу продуктивність.

Перспективи розвитку пов'язані з:

- поєднанням лазерної обробки з легуванням;
- створенням наноструктурних поверхонь;
- застосуванням у адитивних технологіях;
- використанням автоматизованих систем керування процесом.

Ці напрямки відкривають можливості для створення матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками.

1.5. Іонно-імплантаційне модифікування поверхні

Іонно-імплантаційне модифікування поверхні є сучасним фізичним методом поверхневого зміцнення матеріалів, який полягає у введенні прискорених іонів (N^+ , C^+ , B^+ , Ar^+ та інших) у поверхневий шар твердого тіла. Процес здійснюється у вакуумі за допомогою іонного пучка з точно контрольованими параметрами енергії, дози та напрямку руху частинок, що забезпечує високу точність обробки та керованість властивостей поверхні.

Під час іонної імплантації іони, проникаючи в кристалічну ґратку матеріалу, поступово втрачають свою енергію внаслідок пружних і непружних зіткнень з атомами мішені. Це призводить до зміщення атомів із вузлів кристалічної ґратки та утворення різноманітних дефектів структури, зокрема вакансій, міжвузлових атомів і дислокацій. За високих доз опромінення можливе значне накопичення дефектів, що призводить до часткової або повної аморфізації поверхневого шару.

Глибина проникнення іонів залежить від їх енергії, маси, кута падіння, а також фізико-хімічних властивостей матеріалу, зокрема густини та атомної структури. Як правило, вона становить від десятків нанометрів до кількох мікрометрів, що дозволяє змінювати лише поверхневий шар без впливу на об'ємні властивості деталі.

У результаті іонного опромінення в поверхневому шарі можуть відбуватися складні структурні перетворення, зокрема утворення пересичених твердих розчинів, нових хімічних сполук і фаз, а також формування нанокристалічних або аморфних структур. Одночасно відбувається накопичення внутрішніх напружень, які суттєво впливають на механічні властивості матеріалу.

Зміна структури безпосередньо призводить до покращення експлуатаційних характеристик. Зокрема, спостерігається підвищення твердості поверхневого шару, зростання зносостійкості, покращення корозійної стійкості та підвищення опору втомному руйнуванню. Такі ефекти обумовлені як дефектною структурою, так і можливим утворенням зміцнених фаз.

Важливою особливістю іонно-імплантаційного методу є його низькотемпературний характер, що дозволяє уникнути значного нагрівання виробу та зберегти вихідні властивості основного матеріалу. На відміну від традиційних термічних методів обробки, імплантація не викликає макроскопічних деформацій і короблення деталей.

Метод також відзначається високою точністю керування процесом, можливістю дозованого введення легуючих елементів і формування унікальних нерівноважних структур. Це робить його особливо ефективним для створення функціональних поверхневих шарів із заданими властивостями.

Разом із перевагами, іонна імплантація має певні обмеження, зокрема невелику глибину модифікованого шару та високу вартість обладнання, а також складність контролю процесу на технологічному рівні. Проте її потенціал є надзвичайно високим і активно застосовується у створенні наноструктурованих матеріалів, у мікро- та наноелектроніці, авіаційній техніці, машинобудуванні та біомедичних технологіях.

Сучасні тенденції розвитку цього методу пов'язані зі створенням наноструктурованих поверхонь, комбінуванням іонної імплантації з іншими методами обробки, такими як лазерне або термічне зміцнення, а також застосуванням у мікро- та наноелектроніці, біомедичних матеріалах і високотехнологічному машинобудуванні. У перспективі іонно-імплантаційні технології дозволяють створювати матеріали з керованими властивостями на

нанорівні, що відкриває широкі можливості для інженерії поверхні нового покоління.

2. МЕТОДИ ОБРОБКИ СПЛАВІВ У РІДКОМУ СТАНІ

2.1. Вібрація сплаву при кристалізації

Позитивний вплив вібрації на кристалізацію сплавів пов'язаний із можливістю активного керування процесами затвердіння розплаву, формуванням структури та зменшенням дефектів лиття. Вібрація, що передається розплаву або формі під час кристалізації, змінює умови тепло- і масопереносу, а також механізм зародження і росту кристалів.

У звичайних умовах затвердіння сплавів супроводжується формуванням дендритної структури, виникненням температурних і концентраційних градієнтів, а також розвитком ліквідаційних процесів. Вібраційний вплив сприяє інтенсифікації перемішування розплаву, що призводить до вирівнювання температури і концентрації компонентів у всьому об'ємі. Це зменшує макро- і мікроліквідацію, а також сприяє більш однорідному розподілу легуючих елементів.

Одним із ключових ефектів вібрації є значне підвищення кількості центрів кристалізації. Механічні коливання сприяють як активації гетерогенних зародків, так і утворенню нових центрів кристалізації за рахунок руйнування оксидних плівок та інших бар'єрів на межах фаз. Крім того, під дією вібрації відбувається відламування гілок дендритів, які переносяться потоком розплаву і стають додатковими зародками кристалізації. У результаті формується дрібнозерниста рівноосна структура замість грубозернистої стовпчастої.

Вібрація також суттєво впливає на ріст кристалів. Завдяки зменшенню товщини дифузійного шару біля фронту кристалізації прискорюється масоперенос, що змінює кінетику росту фаз. Це призводить до зменшення міждендритних відстаней і загального подрібнення структури. Одночасно пригнічується направлений (стовпчастий) ріст кристалів, що позитивно впливає на ізотропність властивостей матеріалу.

Іншим важливим ефектом є покращення теплообміну. Вібрація сприяє інтенсивнішому відведенню тепла від фронту кристалізації, що забезпечує більш

рівномірне охолодження та зменшує температурні градієнти. Це, у свою чергу, знижує ризик утворення внутрішніх напружень, тріщин та деформацій.

Вібраційний вплив також позитивно впливає на дефектність литого металу. Зокрема, зменшується пористість і кількість усадочних раковин, оскільки покращується підживлення рідкою фазою зон кристалізації. Крім того, вібрація сприяє видаленню газових включень і запобігає їх накопиченню в структурі.

У результаті всіх зазначених процесів формуються більш щільні, однорідні та дрібнозернисті структури з покращеними механічними характеристиками. Підвищуються міцність, пластичність, ударна в'язкість і втомна стійкість матеріалу. Також покращуються технологічні властивості, зокрема оброблюваність і зносостійкість.

Вібрація є ефективним засобом керування процесами кристалізації сплавів, оскільки вона одночасно впливає на зародження, ріст кристалів, тепло- і масоперенос, а також на формування дефектів. Це робить її важливим інструментом отримання матеріалів із заданими структурою та властивостями.

2.2. Прозвучування сплаву при кристалізації

Вплив прозвучування на кристалізацію сплавів пов'язаний із дією акустичних хвиль на розплав, що призводить до інтенсифікації фізичних процесів у рідкій фазі та змінює механізм формування структури під час затвердіння. Найбільш ефективним є застосування ультразвукових коливань, які викликають у розплаві складні гідродинамічні явища, зокрема кавітацію та акустичні потоки.

Під час проходження звукових хвиль у розплаві виникають циклічні зміни тиску, що призводять до утворення і колапсу мікропорожнин — кавітаційних бульбашок. Їх руйнування супроводжується локальними мікроударними хвилями, високими температурами і тисками в мікрооб'ємах. Це сприяє руйнуванню оксидних плівок, агломератів домішок і дендритних утворень, а також активації поверхонь, що значно полегшує зародження нових кристалів.

Одним із ключових ефектів прозвучування є різке збільшення кількості центрів кристалізації. Кавітаційні явища та інтенсивне перемішування розплаву сприяють утворенню додаткових гетерогенних зародків і рівномірному їх розподілу в об'ємі. У результаті формується дрібнозерниста рівноосна структура, що значно відрізняється від грубої дендритної структури, характерної для звичайного лиття.

Акустичні потоки, що виникають під дією звукових хвиль, забезпечують ефективне перемішування розплаву, зменшуючи температурні та концентраційні градієнти. Це призводить до зниження ліквідації, більш рівномірного розподілу легуючих елементів і стабілізації фронту кристалізації. Крім того, зменшується товщина дифузійного шару, що прискорює масоперенос і змінює кінетику росту кристалів.

Прозвучування також впливає на ріст дендритів. Під дією кавітаційних імпульсів і гідродинамічних потоків відбувається руйнування гілок дендритів, які можуть переноситися в розплаві та слугувати новими центрами кристалізації. Це призводить до подрібнення дендритної структури та переходу до більш компактної і рівномірної морфології зерен.

Важливим ефектом є покращення дегазації розплаву. Кавітація сприяє виділенню розчинених газів і їх видаленню з об'єму, що значно знижує пористість і кількість газових включень у затверділому металі. Одночасно зменшується кількість неметалевих включень завдяки їх диспергуванню та видаленню.

Покращення теплообміну також є наслідком акустичного впливу. Перемішування розплаву сприяє більш рівномірному розподілу температури, зменшенню локальних перегрівів і забезпечує більш рівномірне затвердіння. Це знижує рівень внутрішніх напружень і запобігає утворенню тріщин.

У результаті прозвучування формуються більш щільні, однорідні та дрібнозернисті структури з покращеними експлуатаційними характеристиками. Зокрема, підвищуються твердість, міцність, пластичність і втомна стійкість матеріалу. Також покращуються технологічні властивості, такі як оброблюваність і зносостійкість.

Прозвучування є ефективним методом керування процесами кристалізації сплавів, оскільки поєднує вплив кавітації, акустичних потоків і термодинамічних ефектів, що дозволяє отримувати матеріали з високою однорідністю структури та заданими властивостями. Це робить його перспективним напрямом у сучасному матеріалознавстві та ливарних технологіях.

2.3. Продувка сплаву інертними газами

Продувка інертними газами значно впливає на кристалізацію сплавів, що пов'язано із очищенням розплаву, покращенням його однорідності та створенням сприятливих умов для формування якісної структури під час затвердіння. Найчастіше для цієї мети використовують інертні гази, такі як аргон або гелій, які не вступають у хімічну взаємодію з компонентами сплаву і не змінюють його склад.

Під час продувки газ вводиться в розплав у вигляді дрібних бульбашок, які піднімаються крізь об'єм металу. У процесі їх руху відбувається інтенсивна взаємодія з рідкою фазою, що призводить до видалення розчинених газів, таких як водень, кисень або азот. Це пояснюється тим, що інертний газ створює градієнт парціального тиску, внаслідок чого розчинені гази дифундують у бульбашки і виносяться на поверхню. У результаті значно зменшується газонасиченість розплаву та ризик утворення пористості в затверділому металі.

Важливим ефектом продувки є очищення розплаву від неметалевих включень. Під час руху газових бульбашок дрібні включення (оксиди, сульфідні та інші домішки) адсорбуються на їх поверхні та виносяться разом із ними у шлак або на поверхню розплаву. Це призводить до зменшення кількості дефектів і підвищення чистоти матеріалу.

Продувка також викликає перемішування розплаву, що сприяє вирівнюванню температурних і концентраційних градієнтів. Це зменшує ліквідаційні процеси і забезпечує більш рівномірний розподіл легуючих елементів. У результаті кристалізація відбувається більш стабільно, а структура формується більш однорідною.

Вплив на процес кристалізації проявляється також у зміні умов зародження та росту кристалів. Завдяки очищенню розплаву та зменшенню кількості домішок створюються більш сприятливі умови для контрольованого зародження фаз. Крім того, перемішування сприяє рівномірному розподілу центрів кристалізації в об'ємі, що може призводити до формування більш дрібнозернистої структури.

Покращення теплообміну є ще одним важливим наслідком продувки. Рух бульбашок і перемішування рідкого металу сприяють більш рівномірному розподілу температури та ефективнішому відведенню тепла під час затвердіння. Це знижує ймовірність утворення термічних напружень, тріщин і деформацій.

Зменшення газовмісту і кількості включень безпосередньо впливає на механічні властивості матеріалу. Зокрема, підвищуються міцність, пластичність і втомна стійкість, оскільки усуваються концентратори напружень, пов'язані з порами та включеннями. Також покращуються експлуатаційні характеристики, зокрема корозійна стійкість і надійність роботи деталей.

Продувка інертними газами є ефективним методом обробки розплавів, який поєднує процеси дегазації, очищення та гомогенізації. Вона забезпечує формування більш чистої, однорідної та щільної структури матеріалу, що безпосередньо впливає на підвищення його властивостей. Завдяки цьому метод широко використовується в сучасних ливарних і металургійних технологіях як важливий елемент керування якістю сплавів.

2.4. Вакуумування сплавів

Позитивний вплив вакуумної обробки на кристалізацію сплавів пов'язаний із зниженням газонасиченості розплаву, очищенням від домішок і створенням стабільних умов для формування якісної структури під час затвердіння. Вакуумна обробка здійснюється шляхом зниження тиску над розплавом або в спеціальних вакуумних установках, що дозволяє значно змінити рівновагу між розчиненими газами та рідкою фазою металу.

Одним із основних ефектів вакуумування є інтенсивна дегазація розплаву. При зниженні зовнішнього тиску розчинені в металі гази (передусім водень, кисень,

азот) втрачають стабільність у розчиненому стані і виділяються у вигляді бульбашок. Ці бульбашки піднімаються до поверхні і видаляються з розплаву, що суттєво зменшує газонасиченість матеріалу. У результаті знижується ймовірність утворення газової пористості та внутрішніх дефектів у затверділому металі.

Вакуумна обробка також сприяє зменшенню кількості неметалевих включень. За умов пониженого тиску полегшується виділення летких домішок і продуктів реакцій, а також покращується спливання включень на поверхню розплаву. Це призводить до підвищення чистоти металу і зменшення кількості структурних неоднорідностей.

Зниження вмісту газів і домішок позитивно впливає на процес кристалізації. У більш чистому розплаві кристалізація відбувається стабільніше, без утворення дефектів, пов'язаних із газовими виділеннями або включеннями. Це сприяє формуванню щільної і однорідної структури з меншою кількістю концентраторів напружень.

Вакуум також впливає на термодинамічні умови затвердіння. Зменшення тиску змінює рівновагу фаз і може впливати на температуру кипіння та випаровування деяких компонентів, що особливо важливо для сплавів із леткими елементами. Контроль цих процесів дозволяє отримувати матеріали з точнішим хімічним складом.

Крім того, вакуумна обробка сприяє покращенню теплообміну в умовах контрольованого середовища. Відсутність газового середовища знижує ймовірність окиснення поверхні розплаву, що також позитивно впливає на якість затверділого металу.

У результаті вакуумування формуються більш чисті, щільні та однорідні структури з покращеними механічними властивостями. Зокрема, підвищуються міцність, пластичність і втомна стійкість матеріалу, а також покращується його надійність в експлуатації.

Вакуумна обробка є ефективним методом підготовки розплаву перед кристалізацією, який забезпечує дегазацію, очищення і стабілізацію умов затвердіння. Це дозволяє отримувати матеріали високої якості з мінімальною

кількістю дефектів і заданими властивостями, що робить вакуумні технології важливим інструментом сучасної металургії та матеріалознавства.

2.5. Легування та модифікування сплавів

Модифікування та легування сплавів полягає у цілеспрямованій зміні складу розплаву з метою керування процесами зародження, росту кристалів і формування структури матеріалу. На відміну від фізичних методів впливу, ці підходи базуються на введенні в розплав певних елементів або сполук, які змінюють термодинамічні та кінетичні умови кристалізації.

Легування передбачає введення елементів, які розчиняються в основному металі та змінюють його фазовий склад і властивості. Легуючі елементи впливають на температуру ліквідусу і солідусу, розширюють або звужують області існування фаз, а також змінюють характер кристалізації. Вони можуть сприяти утворенню твердих розчинів або нових фаз, що визначає кінцеву структуру сплаву. Крім того, легування впливає на швидкість дифузійних процесів і стабільність кристалічної ґратки, що позначається на морфології зерен.

Модифікування має дещо інший характер і спрямоване передусім на зміну структури без істотної зміни хімічного складу основи. Воно здійснюється шляхом введення невеликих кількостей спеціальних добавок — модифікаторів, які впливають на механізм зародження кристалів. Такі добавки можуть виконувати роль додаткових центрів кристалізації, знижуючи енергію утворення зародків і збільшуючи їх кількість у розплаві.

У результаті модифікування значно підвищується кількість центрів кристалізації, що призводить до формування дрібнозернистої рівноосної структури. Це особливо важливо для сплавів, схильних до утворення грубої дендритної або стовпчастої структури. Крім того, модифікатори можуть впливати на морфологію фаз, наприклад, змінювати форму евтектичних складових з голчастої або пластинчастої на більш компактну і рівномірну.

Обидва процеси — легування і модифікування — суттєво впливають на ліквідаційні явища. Завдяки зміні умов кристалізації зменшується макро- і

мікроліквація, покращується розподіл компонентів і знижується хімічна неоднорідність матеріалу. Це забезпечує більш стабільне формування структури і зменшує ймовірність виникнення дефектів.

Вплив на ріст кристалів проявляється у зміні швидкості та напрямку росту дендритів. Легуючі елементи можуть гальмувати або прискорювати ріст окремих фаз, тоді як модифікатори сприяють подрібненню структури за рахунок збільшення кількості зародків. У результаті формується більш однорідна і щільна структура з дрібними зернами та зменшеними міждендритними відстанями.

Такі структурні зміни безпосередньо впливають на властивості матеріалу. Підвищуються міцність, твердість і зносостійкість, а також покращуються пластичність і втомна стійкість. Це пояснюється як дрібнозернистою структурою, так і утворенням зміцнюючих фаз або твердих розчинів.

Отже, модифікування та легування є ефективними методами керування процесами кристалізації сплавів на хімічному рівні. Вони дозволяють цілеспрямовано формувати структуру матеріалу, змінювати фазовий склад і досягати необхідного комплексу властивостей. Завдяки цьому ці методи широко застосовуються в металургії та матеріалознавстві для отримання сплавів із заданими характеристиками та високою якістю.

2.6. Обробка сплавів електричним і магнітним полем

Обробки розплавів електричним і магнітним полем і вплив її на процеси кристалізації пов'язаний із можливістю безконтактного керування гідродинамікою, тепло- і масопереносом, а також умовами зародження і росту кристалів. Ці методи належать до електрофізичних способів впливу і дозволяють суттєво змінювати структуру матеріалу ще на стадії рідкого стану.

Дія електричного струму або електричного поля в розплаві призводить до виникнення електроміграційних процесів, що впливають на розподіл компонентів і домішок. Крім того, проходження струму через провідний розплав супроводжується виділенням тепла, що дозволяє додатково регулювати

температурне поле та умови кристалізації. В окремих випадках електричні поля можуть впливати на орієнтацію зародків і стабільність фронту кристалізації.

Найбільш суттєвий ефект досягається при використанні магнітного поля. Взаємодія електричного струму, що протікає в розплаві, з магнітним полем призводить до виникнення електромагнітних сил (сил Лоренца), які викликають інтенсивний рух рідкого металу. Це явище лежить в основі електромагнітного перемішування, яке забезпечує вирівнювання температурних і концентраційних градієнтів, зменшення ліквідації та формування більш однорідної структури.

Під дією магнітного поля змінюється характер кристалізації. Електромагнітні потоки руйнують стовпчастий ріст дендритів і сприяють формуванню рівноосної дрібнозернистої структури. Одночасно зменшуються міждендритні відстані та підвищується щільність матеріалу. Важливим є також вплив на розподіл неметалевих включень і газових бульбашок, які можуть переміщуватися під дією потоків і видалятися з об'єму розплаву.

Електромагнітна обробка сприяє покращенню теплообміну та стабілізації фронту кристалізації. Завдяки безконтактному характеру впливу вона не викликає забруднення розплаву і дозволяє точно керувати процесом. У результаті формується більш однорідна структура з покращеними механічними властивостями, зокрема підвищеною міцністю, пластичністю і втомною стійкістю.

Особливе місце серед електромагнітних методів займають установки магнітодинамічного типу, зокрема міксери і дозатори розплаву. Їх робота базується на створенні керованих електромагнітних потоків у рідкому металі, що забезпечує ефективне перемішування та транспортування без механічного контакту. Такі установки, оснащені індуктором, створюють змінне магнітне поле, яке індукує струми в розплаві та генерує рух металу.

Особливо високою ефективністю відзначаються системи, в яких поряд з індуктором застосовується додатковий електромагніт. Така комбінація дозволяє більш точно керувати структурою потоків, інтенсифікувати перемішування і стабілізувати процес дозування розплаву. У результаті досягається висока однорідність температури і складу, зменшується ймовірність утворення дефектів і забезпечується стабільна якість металу.

Використання магнітодинамічних міксерів і дозаторів відкриває широкі можливості для автоматизації процесів лиття і підвищення їх ефективності. Вони забезпечують безконтактну обробку розплаву, мінімізують втрати матеріалу і дозволяють отримувати сплави з високими та стабільними властивостями. Завдяки цьому такі установки є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасних ливарних і металургійних технологій.

3. МАГНІТОДИНАМІЧНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОБРОБКИ ЧОРНИХ І КОЛЬОРОВИХ СПЛАВІВ

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

Компоновка електромагнітного насоса (ЕМН) з ливарними агрегатами показана на рис. 3.1. Відсутність зв'язку з піччю (схема 1) полегшує умови заміни насоса, знижує вимоги до надійності і ресурсу його вузлів, дозволяє використовувати роздавальні печі і обслуговувати одним ЕМН декілька ливарних машин. В цьому відношенні найбільш ефективна компоновка 1.1, але вона визиває певні складності при першому запуску ЕМН в роботу, утримання металу в ньому між заливками, потребує гермитизації заборного металопровода і каналу насоса. Для пуску використовують: розрідження повітря в каналі за допомогою приєднаного до кінця зливного металопровода ежектора; короткочасне занурення ЕМН нижче рівня металу; електромагнітний стартер – додатковий занурюваний ЕМН, призначений для заповнення основного насоса. Стартером може служити і нижня частина основного ЕМН.

Для насосів, розміщених на рівні металу у ванні, не потребується спеціальних заходів для запуску і періодичного ввімкнення. Ці ЕМН займають меншу частину корисного об'єму печі, ніж занурюванні. Але застосування обох компоновок ускладнює зв'язок ЕМН з ливарною машиною, їх тепловий захист. Тому вони зазвичай використовуються для порівняно низькотемпературних кольорових сплавів. Наливні ЕМН застосовують в якості регуляторів подачі металу в ливарну форму (як правило, з каналом одноразового використання) для тугоплавких сплавів і спеціальних сталей.

Найбільше розповсюдження отримали компоновки 2 (рис. 3.1) – ЕМН, жорстко зв'язані з піччю. Хоч окремі варіанти потребують додаткових засобів для підтримки рівня металу в ЕМН (витіснення стисненим газом, поворот печі і т.п.), тиск, який має створювати сам насос, і довжина зливних металопроводів в них менші. При нижньому розміщенні ЕМН в ряді випадків додатково використовують для підігріву і перемішування металу в резервуарі. Деякі варіанти спрощують заміну зливного металопровода і підігрів металу в ньому, але двосторонній контакт з рідким металом ускладнює службу кераміки. Стопорні заливочні установки не знайшли поки застосування із-за складності утримання металу у зв'язаному стані, окислення його відкритою поверхнею в робочій зоні, небезпеки прориву металу із роздаточної ємності при ЕМН із робочого стану.

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 перемішувати 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

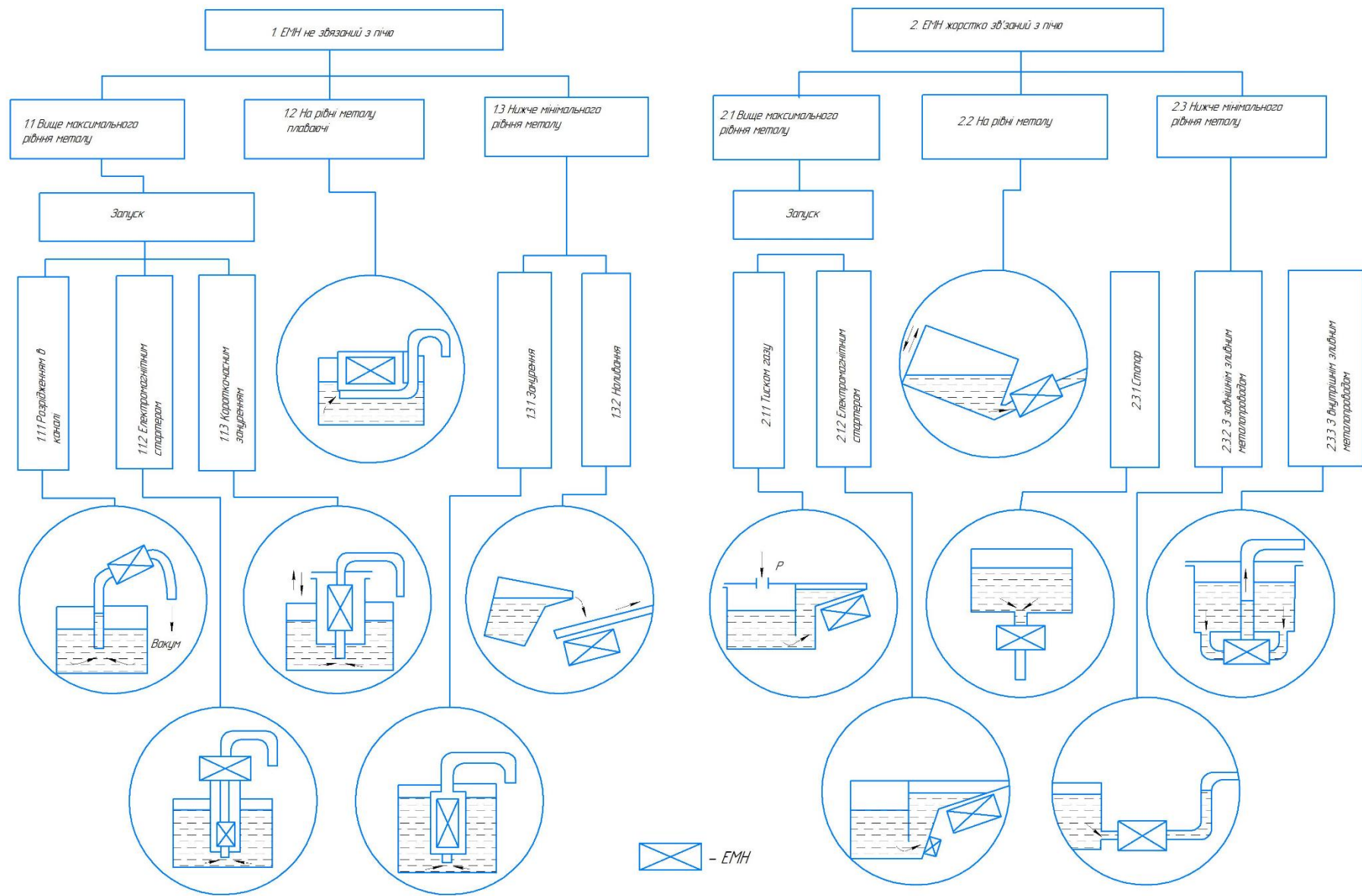


Рис. 3.1 – Варіанти компоновки МДН з ливарними агрегатами

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.

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 накінецьника.

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. 3.2) метал в ній підігрівається. Теплообмін між ванною і каналом здійснюється за рахунок теплової і електромагнітної конвекції металу (так само, як в індукційних каналних печах).

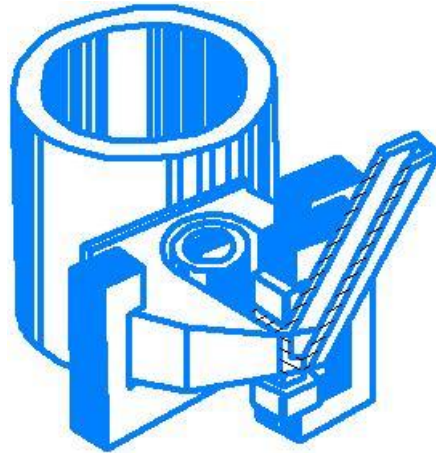


Рис. 3.2 – Схема насоса МДН-3, суміщеного з піччю

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 компоновки. Дуже короткий зливний маталопровід виконано в футеровці стінки каналу. Незважаючи на те що при нахилі каналу в бік тигля ускладнюється мосообмін 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-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.

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. 3.3).

Кількість електромагнітів і зливних металопроводів, а отже, і робочих зон може бути різною – від одного до трьох. Більш ефективно 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 (змінюю

установки реле часу) або швидкість подачі металу (нахилом установки або зміною напруги живлення електромагніта).

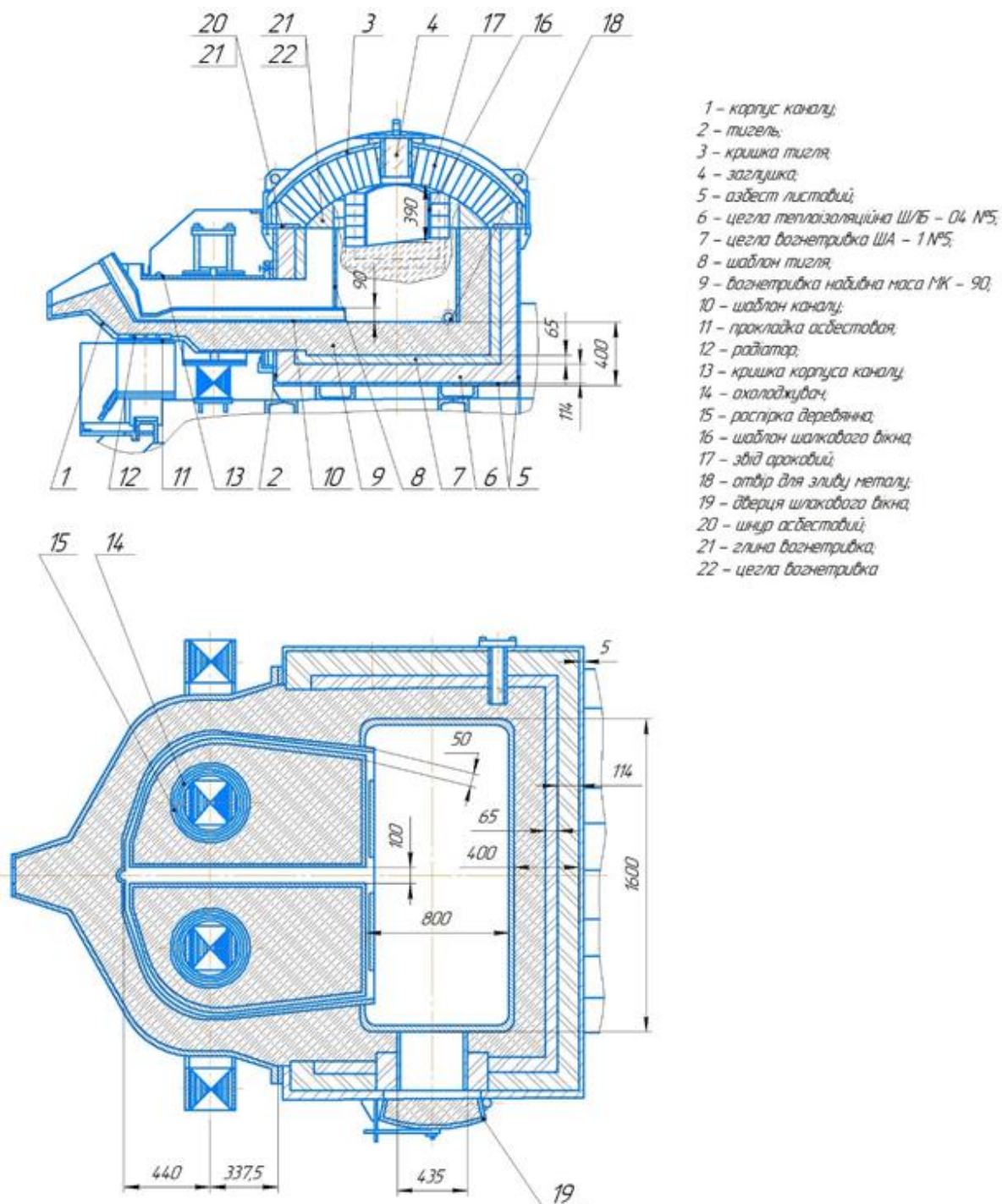


Рис. 3.3 – МДН -6Ч

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. 3.1.

Таблиця 3.1 – 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

4. ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТОДИНАМІЧНОГО МІКСЕРА МОДЕЛІ МД-6300 ДЛЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ТА ЕФЕКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ СІРОГО ЧАВУНУ

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.

Технічна характеристика магнітодинамічного міксер-дозатора для перегріву і розливки чавуну показана в табл. 4.1.

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 міксеру знаходиться в окремому приміщенні площею 20 м². Застосування міксеру дозволяє повністю виключити ручну працю при розливанні металу, підвищити продуктивність праці, поліпшити якість металу і знизити брак литва, поліпшити умови праці.

На рис. 4.1 показана схема розміщення магнітодинамічного міксер-дозатора на дільниці заливки форм у чавуноливарному цеху.

Таблиця 4.1 – 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 розливі, (кВт·год)/т	20	15	12,5	10
-при витримці (кВт·год)/т	60	50	40	40
Живлення	Змінний трифазний струм напругою 380/220 В, частотою 50Гц			

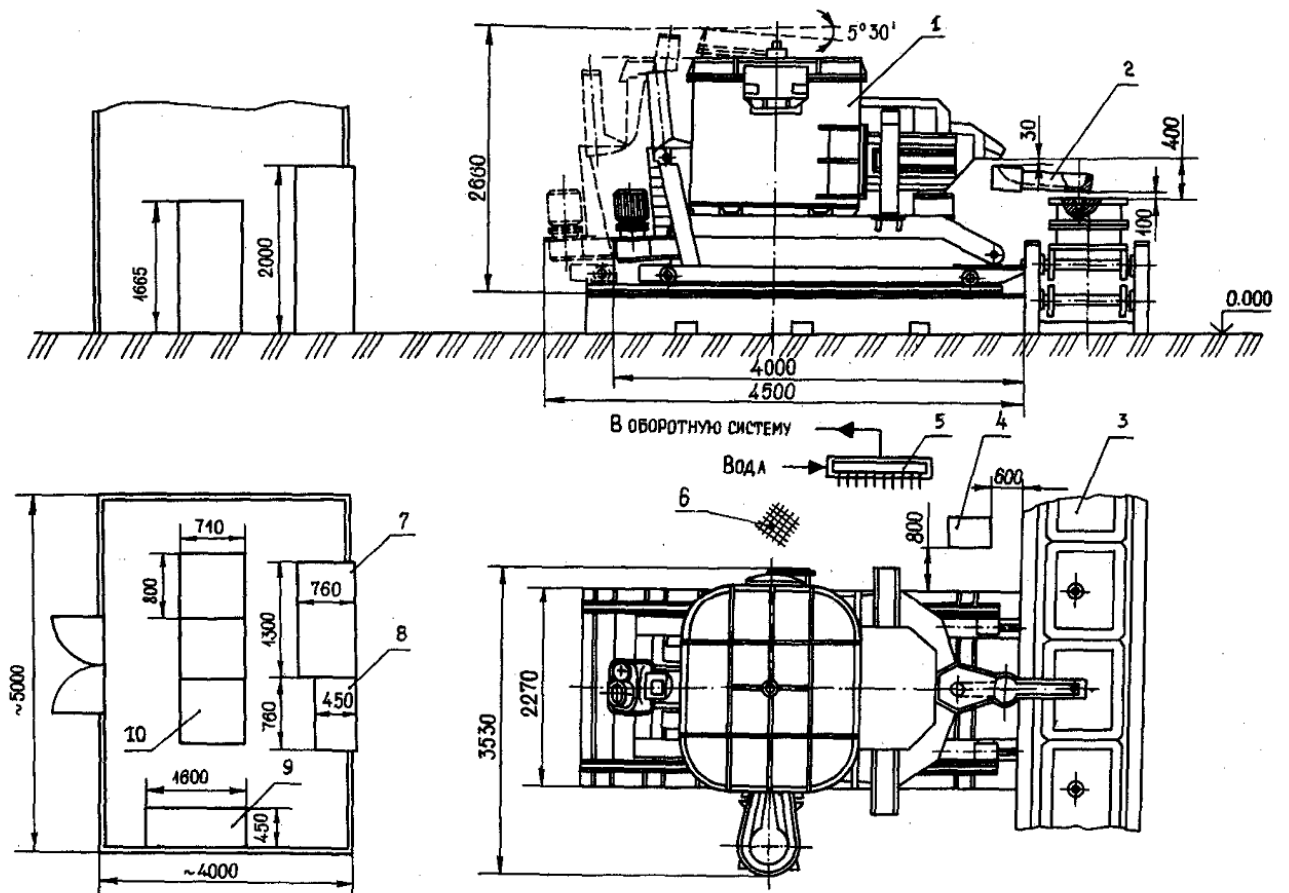


Рис. 4.1 – Схема розміщення магнітодинамічного міксер-дозатора на ділянці заливки форм у чавуноливарному цеху

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 компоновка застосовані при литті гільз циліндрів тракторних двигунів.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ТА 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.

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 (виплавка 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. 5.1), а також подрібнюється структура металевої основи (перліту, рис. 5.2). Це забезпечує ізотропію основних властивостей

(твердості, тимчасового опору розриву і вигину) по поверхні і по перетину вилівка при одночасному їх збільшенні на 5-10% (рис. 5.3 і рис. 5.4).

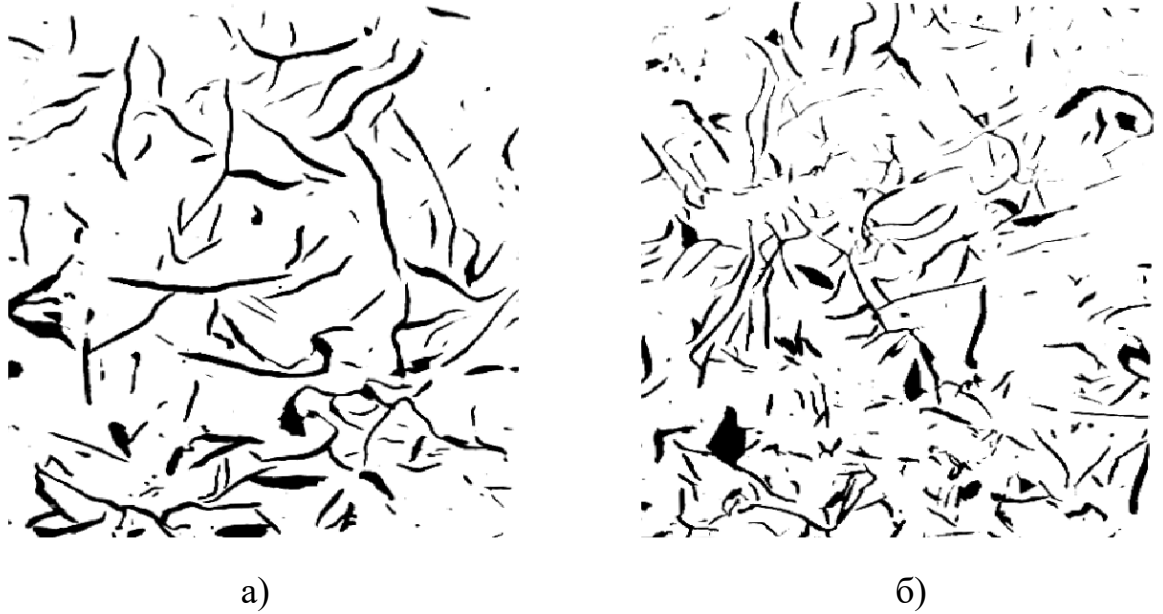


Рис. 5.1 – Форма пластинчастого графіту в сірому чавуні
а) – традиційна розливка; б) – електромагнітна розливка

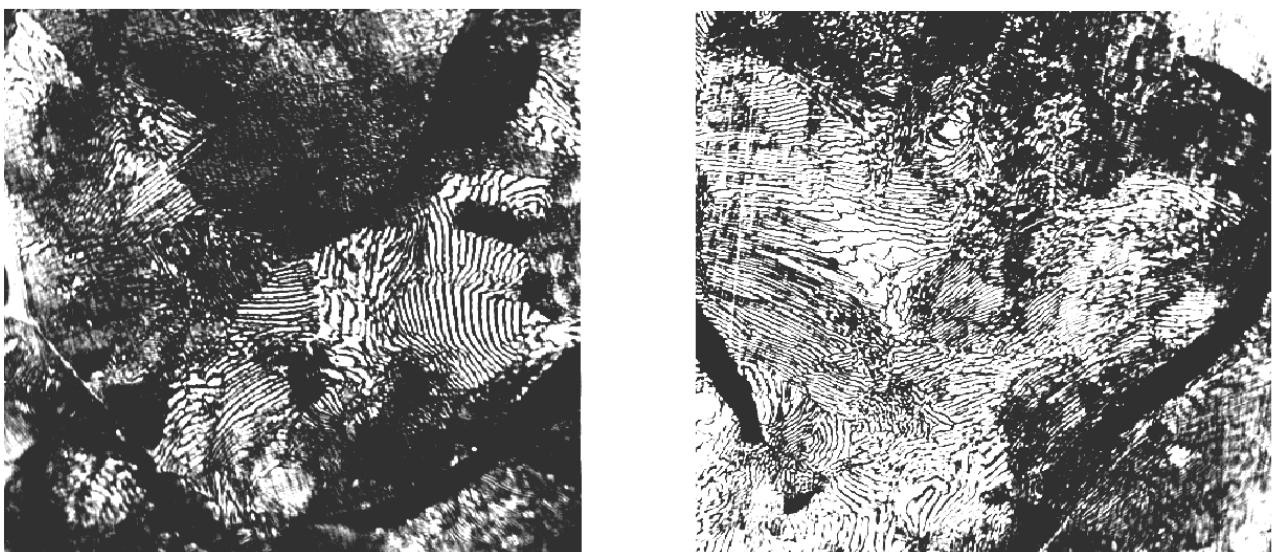


Рис. 5.2 – Форма перліту в сірому чавуні
а) – традиційна розливка; б) – електромагнітна розливка

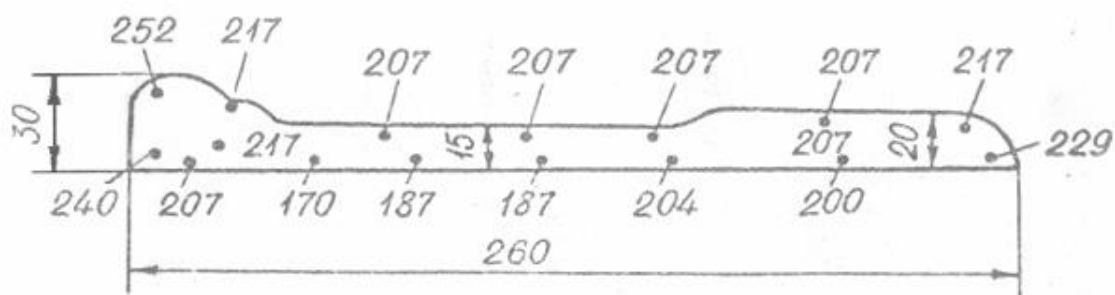


Рис. 5.3 – Зміна твердості чавуну по перетину зразка
(традиційна розливка)

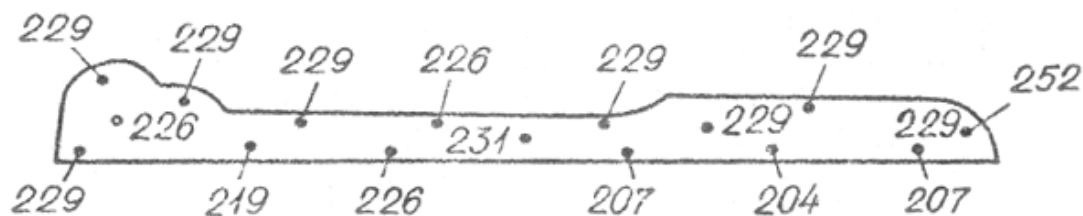


Рис. 5.4 – Зміна твердості чавуну по перетину зразка
(електромагнітна розливка)

Основною причиною підвищення механічних властивостей чавунних виливків, отриманих після магнітогідродинамічної обробки та електромагнітного розливання за допомогою магнітодинамічного міксер-дозатора, слід вважати зміну термочасових умов обробки розплаву. У періоди коротких виробничих пауз і між циклами розливання метал витримується в міксері-дозаторі при стабільній і відносно високій температурі, близькій до температури розливання. Така витримка супроводжується безперервним інтенсивним перемішуванням розплаву під дією електромагнітних сил, що забезпечує його гомогенізацію за хімічним складом, температурою та структурою в рідкому стані. У результаті створюються однакові умови кристалізації виливків, що сприяє формуванню дрібнозернистої та однорідної структури литого сплаву [3, 4].

Як показав досвід промислового застосування магнітодинамічного міксер-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. 5.5).

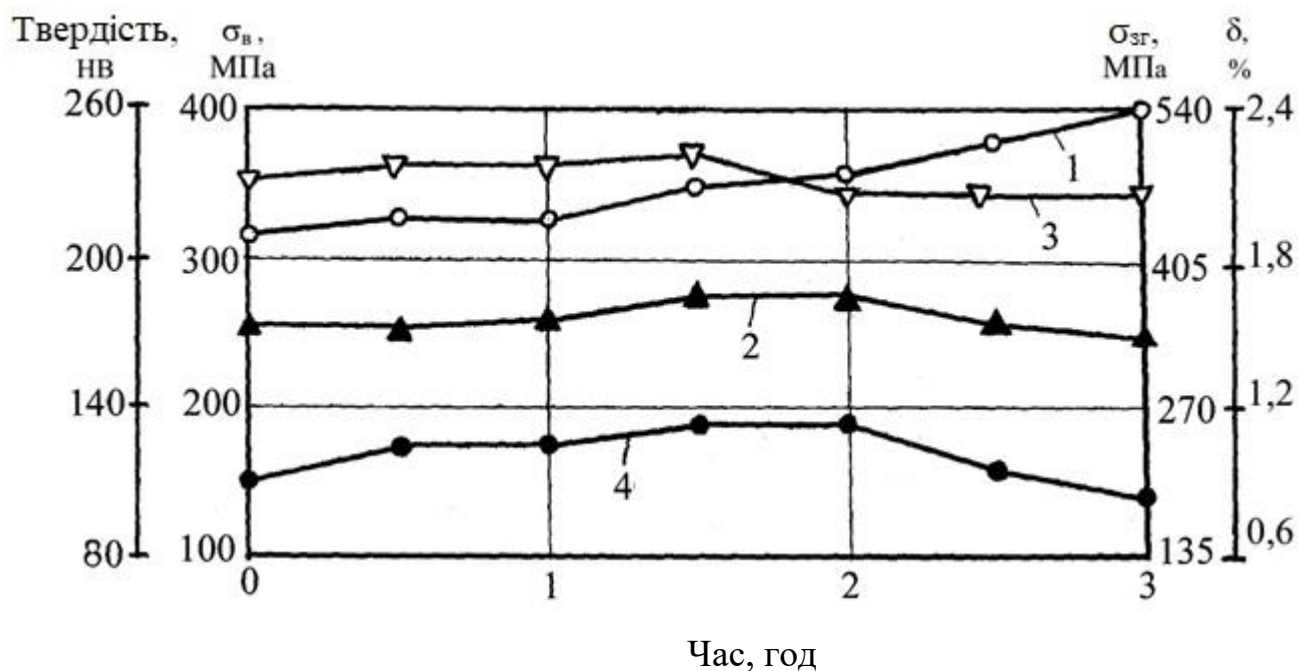


Рис. 5.5 – Зміна механічних властивостей чавуну в залежності від часу витримки в магнітодинамічному міксері-дозаторі

- 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 5.1.

Таблиця 5.1 – 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 зумовлений особливостями його рідкого стану. Відомо, що під час тривалої витримки у чавуні зменшується кількість центрів кристалізації, що пов'язано з розчиненням вільного вуглецю в перегрітому розплаві, а також із коагуляцією та спливанням неметалевих включень. У результаті це сприяє кристалізації відбіленого чавуну. Виливки, отримані з такого металу, характеризуються підвищеною твердістю. Саме тому тривалу витримку чавуну при високій температурі в магнітодинамічному міксері-дозаторі застосовувати не рекомендується. Загалом тривалість технологічної витримки чавуну між циклами розливання в міксері не повинна перевищувати двох годин. Якщо виникає необхідність збільшення цього часу, доцільно здійснювати обробку чавуну модифікаторами (наприклад, феросиліцієм), що сприяє утворенню додаткових центрів кристалізації в металі та усуненню відбілу у виливках, або ж переходити до режимів тривалої витримки при знижених температурах. Як показали дослідження, у такому випадку істотних змін хімічного складу, а відповідно і зниження рівня властивостей, не відбувається; крім того, досягається економія енергоресурсів.

Висновок

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

Встановлено зменшення розмірів графітових включень, подрібнення структури металевої основи і підвищення 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., Меньяло 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.