

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**“ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ З  
ХРОМОНІКЕЛЕВОГО ЧАВУНУ”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-63

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

Тарас ОНИСИК  
(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н. доцент Роман ШЕРЕМЕТА  
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.  
“12” вересня 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу студенту  
**Онисику Тарасу Васильовичу**

1. Тема роботи: **«Дослідження надійності прокатних валків з хромонікелевого чавуну»**

Керівник роботи: Шремета Роман Богданович, к.т.н., доцент

Затверджена наказом по університету від 12.09.2024 року № 616/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 06.12.2024 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. АНАЛІЗ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ;

2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ;

3. ПРОЦЕСИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РУЙНУВАННЯ ВАЛКІВ З ХРОМОНІКЕЛЕВОГО ЧАВУНУ;

4. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА ТА ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧОГО ШАРУ ВАЛКІВ;

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ;

6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ;

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

## 5. Перелік ілюстративного матеріалу:

*Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку microsoft powerpoint: мета та завдання роботи; підвищення терміну служби валків; ушкодження валків; сколювання робочого шару валка гарячої прокатки; руйнування і графітизація цементиту; розвиток процесів зневуглецювання і окислення навколо включень графіту; вигоряння тонких включень цементиту при взаємодії з окисним середовищем; мікроструктура чавуну: відношення кількості введеного модифікатора до обробленої маси і часу витримки металу робочого шару; вміст високовуглецевої фази в структурі валків з хромонікелевого чавуну; залежність кількості графіту і вмісту цементиту в структурі чавуну; річний економічний ефект від виробництва і реалізації прокатних валків; Висновки та пропозиції.*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3, 4,6	Шеремета Р.Б. к.т.н., доц. кафедри машинобудування			
5	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання: 12.09.2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Аналіз та характеристика прокатних валків»</i>	12.09.24- 23.09.24	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Загальна методика дослідження»</i>	24.09.24- 03.10.24	
3.	<i>Виконання розділу: «Процеси, що впливають на руйнування валків з хромонікелевого чавуну»</i>	04.10.24 14.10.24	
4.	<i>Виконання розділу: «Технологічний процес виробництва та відновлення робочого шару валків»</i>	15.10.24- 05.11.24	
5.	<i>Виконання розділу: «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях»</i>	06.11.24- 18.11.24	
6.	<i>Виконання розділу: «Економічна ефективність роботи»</i>	19.11.24- 27.11.24	
7	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	28.11.24- 06.12.24	

Студент \_\_\_\_\_ Тарас ОНИСИК  
(підпис)Керівник роботи \_\_\_\_\_ Роман ШРЕМЕТА  
(підпис)

УДК 629.979

Дослідження надійності прокатних валків з хромонікелевого чавуну. Онисик Т.В. Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024.

92 с. текст. част., 37 рис., 24 табл., 17 джерел інформації.

Проведено аналіз та характеристику прокатних валків, чавунних листопрокатних валків. Вплив хімічного складу на властивості та теплового оброблення на якість і властивості.

В процесі виконання кваліфікаційної роботи використані експериментальні методи окремих технологічних процесів виробництва валків, планування експерименту, статистичної обробки даних, стендові, лабораторні та промислові дослідження із застосуванням методик, викладених у відповідній нормативно технічній документації.

У лабораторних і промислових умовах вивчали вплив хімічного складу, способів вилівка, застосовуваних модифікаторів Reseed® і Superseed®75 для валкових сплавів, а також ефективність використання вакуумування і продувки газами для підвищення якості виливків, впливу термічної обробки на властивості валків.

Виконані в роботі дослідження спрямовані на створення ефективних і менш витратних технологій виробництва валків з хромонікелевого чавуну, що забезпечують підвищення їх працездатності в процесі експлуатації.

## ЗМІСТ

УДК	
ЗМІСТ .....	5
ВСТУП .....	7
1. АНАЛІЗ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ .....	9
1.1 Характеристика чавунних листопрокатних валків .....	9
1.2 Вплив хімічного складу на властивості .....	12
1.3 Вплив теплового оброблення на якість і властивості .....	16
Висновки за розділом.....	18
2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	20
2.1. Матеріал і методи досліджень .....	20
2.2 Умови плавки, модифікування і розливання чавунів.....	22
2.3 Визначення фізико-механічних властивостей .....	24
2.4. Визначення експлуатаційної надійності прокатних валків. ....	26
Висновки за розділом.....	28
3. ПРОЦЕСИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РУЙНУВАННЯ ВАЛКІВ З ХРОМОНІКЕЛЕВОГО ЧАВУНУ .....	29
3.1. Причини і характер відмов робочих валків станів гарячої прокатки .....	29
3.2. Процеси, що впливають на інтенсивність руйнування робочої поверхні прокатних валків .....	33
Висновки за розділом.....	38
4. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА ТА ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧОГО ШАРУ ВАЛКІВ .....	39
4.1. Вплив хімічного складу робочого шару на властивості і структуру двошарових валків .....	39
4.2. Вплив технологічних параметрів вилівка на структуру металу .....	43
4.3 Вплив модифікаторів нового покоління Superseed® 75 і Reseed® на структуру і властивості металу листопрокатних валків. ....	46
4.4. Застосування шлакових сумішей для валкових розплавів .....	54
4.5. Відновлення й виробництво валків електрошлаковим наплавленням .....	66
Висновки за розділом.....	73

	6
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ....	74
5.1 Охорона праці.....	74
5.2 Аналіз умов праці.....	74
5.3 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	80
6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ.....	74
Висновки за розділом.....	88
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	89
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	91

## ВСТУП

Робота присвячена вирішенню проблеми, спрямованої на підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну з метою забезпечення підвищених механічних та експлуатаційних властивостей з урахуванням їх виробництва, ремонту, експлуатації, а також обґрунтування використання ефективних матеріалів з оптимальним легуванням і модифікуванням, надійним контролем якості при їх виготовленні та використанні.

Актуальність роботи та її доцільність обумовлені необхідністю підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну.

Протягом останніх років хромонікелевий чавун знайшов широке застосування для виготовлення сортопрокатних валків, у тому числі, з литими струмками, і робочого шару – листопрокатних як стаціонарного, так і відцентрового виливка.

Вітчизняні і закордонні розробки, що стосуються виробництва, застосування та підвищення терміну служби валків показують, що реалізація проблеми підвищення їх стійкості проводиться в декількох напрямках. Головні з них: розробка нових і оптимізація застосовуваних складів валкових чавунів і їх модифікування; удосконалення технології і параметрів виливки та термообробки; розробка надійних методів контролю і основних оцінних критеріїв їх якості.

Для підвищення експлуатаційної стійкості валків використовують різні способи модифікування чавуну. Це забезпечує подрібнювання зерна, зниження забруднення металу неметалічними включеннями, отримання зносостійкого робочого шару, графіту компактної або кулястої форми, знижує схильність до формування гарячих тріщин.

У сучасному виробництві застосовують модифікатори нового покоління Reseed® Inoculant, Superseed®75, Superseed®50, які можуть бути ефективні при виробництві валків і забезпечити зниження ступеня легування розплаву, формування необхідної форми графіту, здрібнювання зерна,

зниження шкідливих домішок, збереження розплаву зі збільшеною витримкою в ковші без ефекту демодифікації.

**Мета і завдання досліджень:** Метою є підвищення довговічності різної номенклатури прокатних валків з хромонікелевого чавуну за рахунок розробки нових підходів до теоретичних, експериментальних та технологічних основ їх виробництва, ремонту, експлуатації, а також обґрунтування використання ефективних матеріалів з оптимальним легуванням, модифікуванням і позапічною обробкою розплавів при їх виготовленні. Для досягнення сформульованої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- проаналізувати технологічні параметри виробництва та підвищення терміну служби валків з хромонікелевого чавуну різних виконань;
- визначити відмови валків і найбільш значущі експлуатаційні фактори, що впливають на довговічність;
- дослідити можливість підвищення експлуатаційних характеристик хромонікелевого чавуну за рахунок оптимізації хімічного складу, введення мікролегуючих домішок, модифікаторів;
- визначити економічну ефективність застосування нових розробок при їх реалізації у виробництво.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі теоретичних та експериментальних досліджень виробництва і ремонту хромонікелевих валків виконані інноваційні розробки ефективних матеріалів, технології їх виробництва й експлуатації. Запропонована технологія зниження витрати при виробництві валків та економія енергоресурсів регламентованим охолодженням їх вилівка у формі шляхом попереднього її нагрівання до  $t=190-210$  °С, що забезпечує досягнення оптимальних показань коерцитивної сили та виключити використання термообробки.



## 1. АНАЛІЗ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВАЛКІВ

### 1.1 Характеристика чавунних листопрокатних валків

Чавунний прокатний валок - це одна з найбільш складних деталей вироблюваних методом литва. Робоча поверхня валка має структуру білого чавуну (чи половинчастого чавуну з кулястим або пластинчатим графітом), при цьому серцевина - сірого чавуну з пластинчатим або кулястим графітом. Разом з фізичними і хімічними властивостями вживаних сплавів, процеси, що протікають в період твердіння валка, є визначальний в отриманні якісних валків з високими експлуатаційними властивостями.

Залежно від структури робочого шару валки поділяються на відбілені та з невираженим відбілом або з половинчастого чавуну, серцевина ж валка це - сірий чавун. Модифікування (введення домішок) є значним фактором управління структурою чавунних виливків. В реальних виробничих умовах, коли задані швидкість охолодження виливків, склад чавуну та температура розплаву, цей фактор є єдиним в руках технолога.

Виготовити прокатний валок високої якості з високими механічними і експлуатаційними властивостями, рівномірно розподіленими по перерізу валка, лише підбором хімічного складу чавуну при існуючих технологіях виробництва двошарових валків, представляється у край скрутним [5].

Асортимент чавунних валків, що виготовляються нині, представлений сіма укрупненими типами [5].

Характеристика, склад і властивості робочого шару листопрокатних валків наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 Характеристика листопрокатних валків [5]

Призначення (тип)	Позначення типу	Вид	Основні розміри бочок, мм	
			Діаметр	Довжина
Листопрокатні	Л	Г ладкі, масивні	400-1200	750-4000

Можна виділити наступні основні експлуатаційні проблеми і чинники, які впливають на якість прокату і вихід з робочого стану валків:

- при прокатуванні на валки циклічно впливає температура прокатуваного металу, це призводить до вигину, нерівномірного прогрівання валків і, як наслідок, прокат піддається ударним навантаженням в ньому виникають напруги в результаті дії контактного стискування валків;

- при прокатуванні відбувається прослизання валків, внаслідок чого прокатуваний метал чинить абразивну дію на робочу поверхню валків і призводить до її зносу [6].

Такий різноманітний характер взаємодії робочих і опорних валків з прокатуваною смугою обумовлює різні, частенько суперечливі вимоги до матеріалу робочого шару, серцевини і шийок валка [7].

Робочі двошарові прокатні валки для гарячого прокатування листа відливають в стаціонарних комбінованих формах та відцентровим способом лиття. Основним матеріалом для виготовлення таких валків є хромонікелевий і хромо-нікелево-молибденовий чавун.

Нині широке поширення серед конструкційних матеріалів отримав високоміцний чавун (ВЧ). Валки з ВЧ знайшли широке застосування у багатьох прокатних станах, як серед вітчизняних підприємств, так і зарубіжних.

Аналіз тенденцій розвитку вальцеливарного виробництва показав, що основні напрями - оптимізація хімічного складу ливарних сплавів і методів їх отримання.

Відомо, що модифікування розплаву комплексними модифікаторами з вмістом рідкісноземельних металів - один з найбільш ефективних методів набуття високих механічних і експлуатаційних властивостей деталей машин і устаткування, працюючих в умовах постійних високих навантажень, це доведено проведеними дослідженнями численних авторів при отриманні прокатних валків і інших високонавантажених виливків [7].

Рідкісноземельні елементи - група з 17 елементів, що включає лантан, скандій, ітрій і лантаніди. Усі ці елементи - метали сріблясто-білого кольору, притому усі мають схожі хімічні властивості. Згідно промислової

класифікації металів до РЗМ відносяться хімічні елементи з номерами 57-71 Періодичної системи Д.И. Менделєєва, що мають однакову кількість електронів на зовнішній оболонці атомів і відповідно схожі фізико-хімічні властивості. До рідкоземельних металів також відносять близькі до них перехідні метали третьої групи - ітрій і скандій.

У природі РЗМ зустрічаються у вигляді мінералів, загальний зміст РЗМ в земній корі складає 10-2мас.%, що значно більше, ніж молібдену, нікелю, вольфраму. У липні 2011 року дослідницька група з Японії виявила на дні Тихого океану великі поклади рідкоземельних матеріалів. Знахідка підтверджена зразками ґрунту, витягнутими з дна на глибинах від 3500 до 6000 м в 78 місцях. За оцінками фахівців, знайдені поклади містять від 80 до 100 млрд. метричних тонн рідкоземельних матеріалів, що значно більше поточних глобальних запасів на рівні 100 млн. тонн.

Уперше при виробництві чавуну і сталі Лунд застосував церій. У 1948-1950 рр. Морроу (Morroughn) із співробітниками показав можливість застосування церію для отримання ЧШГ [8].

Літературний огляд показав, що дані по модифікуванню робочого шару прокатних валків виконання ЛПХНд-71 комплексним модифікатором, що містить РЗМ, і про вплив модифікування на їх структуру і властивості - відсутні. Таким чином, представляє інтерес визначити вплив комплексного модифікатора зі змістом РЗМ на властивості робочого шару прокатних валків.

Також в літературі і патентній документації існує велика кількість вдосконалених складів валкових чавунів з підвищеними експлуатаційними властивостями. Проте аналіз патентної документації і літературних даних показав, що дані про вплив додаткового легування диспрозієм, гафнієм і модифікування комплексом РЗМ на властивості і структуру таких чавунів відсутні. Видається науковий інтерес досліджувати і визначити вплив цих елементів і їх комплексну дію на валкові чавуни з різною структурою.

Проведений аналіз стійкості чавунних прокатних валків показав, що значна частина (до 30%) валків виходить з ладу передчасно по полуму, що,

очевидно, пояснюється їх низькою міцністю. Не менш ефективним методом підвищення міцності литих валків є проведення релаксаційної низькотемпературної відпустки з метою зняття ливарної напруги по перерізу валка. Численними авторами розглянута і обґрунтована доцільність і ефективність термічного оброблення прокатних валків, огляд робіт яких приведений нижче, проте дані про обґрунтовані режими обробки двошарових листопрокатних валків в літературі відсутні.

Практичне визначення параметрів заливання, охолодження і виявлення величини залишкової внутрішньої напруги, що є невід'ємною умовою розробки обґрунтованого режиму комплексної обробки для двошарових листопрокатних валків, на сьогодні, в лабораторних умовах, технічно не представляється можливим. Також важливо відмітити, що методики і можливості доступних комп'ютерних САПР і САД програм, що дозволяють провести комп'ютерне моделювання процесу заливки і охолодження прокатного валка методом промивання, на сьогодні також відсутні.

З вищезгаданого визначено три напрями досліджень для підвищення експлуатаційних характеристик литих листопрокатних двошарових валків, які представляють науковий інтерес, а саме комплекс заходів складається з: а) визначення впливу комплексної обробки розплаву комплексним модифікатором, що містить РЗМ та релаксаційної відпустки, на структуру, механічні і експлуатаційні властивості валків; б) розробка методики моделювання заливання і охолодження валків методом промивання, використовуючи доступні можливості комп'ютерних систем моделювання ливарних процесів.

## **1.2 Вплив хімічного складу на властивості**

Карбіди є найважливішою складовою зносостійких чавунів, яка у поєднанні з іншими фазами визначає експлуатаційні характеристики виливків. Кристалізація доєвтектичних чавунів відбувається з утворенням надмірного аустеніту спочатку, а потім кристалізацією аустеніту і цементиту.

Кристали первинного цементиту мають форму пластин, це пояснюється силами міжатомного зв'язку і анізотропією його кристалічної будови. Комплексний характер міжатомного зв'язку і шарувата структура цементиту обумовлюють анізотропію властивостей у білому чавуні.

По впливу елементів на структуру чавуну легуючі елементи поділяються на ті, що утворюють із залізом:

- тверді розчини заміщення - кремній, марганець, хром, фосфор і інші компоненти;

- розчини впровадження - вуглець, водень і азот.

Природа матричної фази евтектики в істотній мірі визначає властивості білого чавуну.

Для отримання аустенітно-карбідної структури в хромистих чавунах потрібний вміст хрому більше 23%, аналогічну структуру в марганцевих чавунах можна отримати при вмісті марганцю 7-10%. Цим для зносостійких чавунів пояснюється необхідність підтримувати високі концентрації карбідотворювальних елементів.

Сірка і фосфор - постійні домішки в чавуні, утворюють наступні з'єднання із залізом:  $\text{FeS}$ ,  $\text{FeS}_2$ ,  $\text{FeS}_3$ . Такі з'єднання значною мірою впливають на структуру і властивості чавуну. Сірка істотно зменшує зносостійкість, негативно впливає на фізико-механічні властивості і збільшує схильність до утворення тріщин в чавуні. При вмісті сірки від 0,2 до 0,4% відзначається максимально низьке значення динамічної міцності. Також при підвищеному вмісті сірки (більше 0,2%) в доевтектичному білому чавуні спостерігається збільшення кількості структурно-вільного цементиту і укрупнення розмірів сульфідів марганцю, що призводить до підвищеної крихкості литих деталей.

Структура, яка утворюється в процесі твердіння Fe - P - C сплавів, істотно відрізняється від залізо вуглецевих сплавів евтектичного типу. Фосфід  $\text{Fe}_3\text{P}$  і кристали розчину утворюють евтектику, яка має високу твердість при низьких температурах.

Вуглець з марганцем зв'язується в карбіди  $\text{Mn}_3\text{C}$ ,  $\text{Mn}_7\text{C}_3$  і  $\text{Mn}_{23}\text{C}_6$ ,

причому карбід  $Mn_3C$  ізоморфен з карбідом  $Fe_3C$  і утворює з ним тверді розчини. Марганець стабілізує аустеніт і цементит у білих чавунах. Морфологічний аналіз карбідо-аустенітної евтектики білих чавунів з вмістом марганцю більше 23% показав, що є присутнім комплексний тригональний карбід.

Марганець в ще більшій мірі, чим нікель знижує евтектоїдне перетворення - сплавів і сприяє їх аустенітизації. Структура чавуну, що містить 5-6% Mn, при звичайних швидкостях охолодження - мартенситна, при 8-10% - складається з аустеніту і карбідів. Вміст марганцю більше 7% різко гальмує графітизацію. Марганцевий аустеніт порівняно з нікелевим, при їх однаковій твердості, більше схильний до наклепання, гірше піддається механічному обробленню і має менші значення ударної в'язкості [8].

Виходячи з кінетичних діаграм кристалізації зносостійкого чавуну, що містить 0,76-4,68% Mn, до 2,94% Si і до 4,26% C видно, що з підвищенням вмісту марганцю понад 0,76%, зона початку утворення цементиту повністю перекриває лінію початку виділення графіту, прибираючи область існування сірих чавунів. Якщо вміст C+Si підвищений, тоді в товстостінних виливках виділяється силікокарбід і зменшується кількість цементиту. Марганець збільшує кількість центрів утворення кристалів і швидкість зростання кристалів цементиту з евтектичної рідини.

У білих чавунах, що використовуються для виробництва швидкозношуваних деталей, щоб уникнути графітоутворення в товстостінних виливках вміст кремнію не повинен перевищувати 0,6...0,9%, а вміст карбідоутворювальних елементів підвищується до 16,34%. У білих чавунах найчастіше в якості карбідоутворювального елемента використовують хром [3].

Підвищення зносостійкості чавуну на 30% було досягнуто при введенні в сплав 0,38% титану і наступною 6-ти годинною аустенітизацією з 1050°C.

Легування чавуну молібденом, ніобієм, цирконієм, і іншими елементами є одним з найбільш ефективних методів підвищення механічних властивостей чавунів.

При легуванні ніобієм утворюється тугоплавкий карбід, який має

гранецентровану кубічну решітку. Відомо, що ніобій збільшує міжатомні зв'язки, внаслідок чого, підвищується тривала міцність сплаву. Додаток ніобію до залізовуглецевих сплавів звужує і зрушує аустенітну область у бік вищих температур, також переміщує евтектоїдну точку у бік великого вмісту вуглецю.

Концентрація ніобію для перлітових чавунів рекомендується в межах 0,03-0,06%, а для білих чавунів - не більше 0,3% для збільшення зносостійкості за рахунок наявності карбідів ніобію в матриці.

При введенні в чавуни доевтектичного складу усі ці елементи підвищують міцність і стійкість ледебуриту і переміщують криві ізотермічного перетворення аустеніту управо, що підвищує стійкість аустеніту в зносостійких виливках. Окрім вищезгаданого, очевидно, що хімічний склад сплаву, розміри виливків і умови їх охолодження, зумовлюють міру легуваності металевої основи чавуну, його фізико-механічні і експлуатаційні властивості. Крім того, ці елементи - активні карбідоутворювальні метали.

Кінетичні діаграми кристалізації чавуну дозволяють детально аналізувати роль легуючих елементів і домішок в процесах структуроутворення.

Класифікація легуючих елементів, які здатні збільшити відбілюваність чавуну, розташовані в наступному порядку у міру зростання їх дії: марганець, молібден, хром, ванадій, телур.

Також збільшити відбілюваність здатні спеціальні модифікувальні добавки: магній, церій і інші РЗМ [8]. При кристалізації білого чавуну значний вплив здатні чинити елементи, які мають більшу, ніж залізо спорідненість до вуглецю, як наприклад: титан, цирконій, ніобій, ванадій. При легуванні цими елементами розплавів доевтектичного складу рідка фаза, внаслідок утворення карбідів, обідняється вуглецем. Карбіди при мікролегуванні цими елементами здатні утворюватися тільки при пониженому вмісті азоту в чавуні, інакше вони зв'язуються в нітрид, що мало впливає на переохолодження розплаву.

### 1.3 Вплив теплового оброблення на якість і властивості

Теплове оброблення - це процес обробки сплавів з метою зміни їх структури, а отже і властивостей, що полягає в нагріві до певної температури, витримці при цій температурі і наступному охолодженні із заданою швидкістю. У ливарному виробництві теплове оброблення застосовується для надання металу комплексу механічних і експлуатаційних властивостей.

Залишкова напруга в чавунних валках, що виникає в процесі кристалізації, зберігається до введення їх в експлуатацію [9]. Напруга, що виникає в процесі експлуатації валків, працюючих в умовах високих температурних навантажень, тисків і швидкостей, у поєднанні із залишковою внутрішньою напругою нерідко призводять до руйнування валка.

У зносостійких хромистих чавунах наявність навіть невеликої кількості м'яких продуктів розпаду в структурі основи призводить до різкого зниження зносостійкості чавуну. Пригнічення перлітового перетворення при литті пов'язане з необхідністю легування сплавів значною кількістю дорогих і дефіцитних елементів. Але наявність великої кількості таких елементів не дозволяє отримати необхідну структуру у виливках з великим перерізом унаслідок повільного охолодження їх у формі. Проте цей же чавун після загартування на повітрі, навіть у виливках з товщиною стінки до 180 мм, не має продуктів перлітового розпаду.

Для успішного пригнічення перлітового і проміжного перетворень критично важливою є критична швидкість загартування, тому що при недостатньому прожарюванні не представляється можливим забезпечити необхідну структуру металевої основи чавуну і, як наслідок, високу зносостійкість.

Прожарювання сплаву - одно з основних властивостей, що визначають зносостійкість литва та можливість отримання мартенситної структури основи при охолодженні литих деталей на повітрі. Застосування загартування дозволяє отримати мартенситно-аустенітну структуру при меншому легуванні чавунів дефіцитними і дорогими легуючими елементами.

Збільшення вмісту кремнію в чавуні різко знижує прожарювання, в



структурі основи збільшується кількість продуктів дифузійного розпаду. Підвищення вмісту кремнію з 0,55 до 1,18% в чавуні удвічі зменшує переріз виливків, що мають мартенситну структуру. Тому М.Є.Гарбер рекомендує вміст Si не більше 0,7% для забезпечення задовільної прожарюваності в цих чавунах.

Нікель - один з основних легуючих елементів у білих зносостійких хромистих чавунах, вводиться з метою пригнічення перлітового перетворення. Використовуваний на вітчизняних підприємствах чавун ИЧ290Х28Н2 містить до 3%, який у поєднанні з 30% вмістом хрому сильно стабілізує аустеніт і знижує температуру мартенситного перетворення, що призводить до отримання аустенітно-феритної металевої основи і зниження зносостійкості цього чавуну. З метою надання чавуну максимальної в'язкості рекомендується вилиток піддати термічному обробленню, такі чавуни застосовуються в умовах високих ударних навантажень і дії корозії.

При дослідженні - чавунів з'ясували, що вміст хрому від 13,6 до 17,0% збільшує прожарюваність чавунів, вже при 25% знижується, а при 29% металева основа плити завтовшки 30мм складається тільки з феритно-карбідної суміші. Підвищення хрому з 12 до 17% призводить до підвищення його вмісту в твердому розчині, що сприяє стабілізації аустеніту і збільшенню прожарюваності, схожа картина спостерігається і в хромомарганцевих чавунах.

Чавуни з однаковим вмістом хрому, кремнію і марганцю за різного вмісту хрому, істотно відрізняються своєю прожарюваністю. Так, наприклад, чавун зі вмістом 13% хрому і 3,43% марганцю, має твердість HRC60 при перерізі не більше 75 мм, а чавун з 18,6% хрому за такого ж вмісту марганцю має твердість HRC60 навіть при перерізі 400 мм. Подальше підвищення вмісту хрому до 24% призводить до зменшення твердості в усьому діапазоні товщин.

Ефективним методом підвищення прожарюваності чавунів є збільшення температури загартування. Підвищення температури призводить до розчинення первинних карбідів, які знаходяться в металевій основі, і збільшення

в аустеніті легуючих елементів.

Відпуск - часто необхідна операція теплового оброблення, метою якої є зняття внутрішньої напруги, утвореної після загартування.

Дослідження впливу теплового оброблення на властивості подрібнювальних тіл, у край обмежені, мабуть, через особливості конструкції і розміри цього виливка. Подрібнювальні тіла, як правило, отримують на карусельно-кокільних кулеливарних машинах, тому представляє великий науковий інтерес дослідження впливу різних середовищ, що охолоджують, на властивості таких виливків після витягання їх з кокільних форм.

Основною метою роботи було проведення наукового обґрунтування з подальшим лабораторним і промисловим випробуванням нових перспективних рішень з удосконалення технологічних процесів виготовлення виливків зі зносостійких білих чавунів різного ступеня легованості, шляхом розробки та визначення впливу модифікаторів, що містять рідкісноземельні метали (РЗМ), а також індивідуальний або спільний з термічним обробленням вплив на процеси структуроутворення, фізико-механічні та експлуатаційні властивості зносостійких чавунів, що працюють при високих навантаженнях в процесі експлуатації.

Це призведе до вдосконалення існуючих процесів виготовлення виливків металургійного та гірничорудного призначення за наступними напрямками:

1. Застосування комплексного модифікування чавунних розплавів різної легованості.
2. Розробка раціональних технологічних процесів виготовлення виливків.

### **Висновки за розділом**

1. Аналіз сучасного стану виробництва виливків зі зносостійких чавунів і відповідної науково-технічної літератури виявив, що роботи по розробці теоретичних основ і практичного комплексу методів отримання виливків

з комплексно модифікованих зносостійких чавунів є актуальними і спрямованими на рішення значної науково-технічної задачі.

2. Яскравими представниками високо навантажених деталей гірської і металургійної промисловості, що виготовляються з чавунів різного ступеня легуваності є: подрібнювальна куля, двошаровий листопрокатний валок та корпус насоса багеру.

3. Аналіз діючих технологій виробництва виливків із зносостійких білих чавунів на металургійних підприємствах України показав, що якість одержуваних виливків недостатньо висока та є необхідність в удосконалення технологічних процесів їх одержання.

4. Пропонується провести обґрунтування (з подальшим лабораторним і промисловим випробуванням) та удосконалення раціональних технологічних процесів виготовлення виливків з різних зносостійких білих чавунів за наступними напрямками:

- для литих подрібнювальних куль з низьколегованих чавунів використання та комплексне урахуванням впливу технологічних параметрів виробництва таких як матеріал та конструкція ливарної форми, модифікування розплаву, час витримки виливка у формі, температура вибивання, середа охолодження;

- для литих двошарових прокатних валків із середньо легуваних чавунів використання та комплексне урахуванням впливу технологічних параметрів виробництва таких як модифікування розплаву та теплова обробка литих заготовок;

- для виливків з високохромистих чавунів з підвищеними міцністними і експлуатаційними характеристиками використання зменшеного вмісту легувальних елементів у складі чавунів під впливом комплексного модифікування розплавів.

## 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Матеріал і методи досліджень

У роботі досліджували хромонікелеві чавуни, застосовувані для виготовлення валків сортових і листопрокатних станів, відлиті методом стаціонарного і відцентрового виливка. Хімічний склад досліджених матеріалів представлений у табл.2.1.

Валки сортопрокатні (СПХН) і листопрокатні (ЛПХНд) стаціонарного виливка відрізняються зниженою концентрацією легуючих компонентів Cr і Ni (див. табл.2.1). Це пов'язано з тим, що при їхнім виробництві з промиванням у серцевині необхідно не допустити влучення компонентів у цю зону. Крім того, валки стаціонарного виливка мають у робочому шарі підвищену концентрацію фосфору, що забезпечує високу рідкотекучість металу робочого шару.

Величину зношування на валках визначали інструментальним методом з використанням універсальних (мікрометричних з точністю виміру не більш 0,01мм) і спеціальних вимірювальних інструментів. Вибір вимірювальних інструментів визначався діапазоном вимірів. Виміри виконували на валках, після їхньої механічної обробки. Виміри величини зношування робили не менш трьох раз по двом діаметрально протилежним площинам.

Вимір форми валків із гладкою бочкою перевіряли перевіркою лінійкою ШД-2500. При проведенні вимірів лінійку встановлювали на крайові ділянки бочки і пересували по ній повзун з закріпленим на ній важільним індикатором годинного типу ІЧ-25, за показниками якого викреслювали діаграму профілю бочки.

Для електронномікроскопічних досліджень дисперсних складових мікроструктури і закономірності зношування прокатних валків використовували мікроскоп В6-5134 фірми «Tesla». Об'єкти, що досліджували в електронному мікроскопі, виготовляли методом двоступінчастих вугільних відбитків.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад досліджуваних матеріалів

№ п/п	Марка матеріалу	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
Стационарний виливок									
1	СПХН-46	2,54-3,37	0,6-1,11	0,44-0,77	0,40-1,13	0,73-1,66	–	0,02-0,1	0,15-0,30
2	СПХНМ-48	2,7-3,4	0,6- 1,2	0,4-0,8	0,5-1,0	0,7-1,4	0,2-0,4	0,2	0,1
3	ЛПХНД-63	2,5-3,5	0,3-1,1	0,3-1,0	0,3-1,2	1,5-4,0	–	0,1	0,55
Відцентровий виливок									
4	ЛПХНД-70 (ТУУ 27.1-26524137-1291-2007)	2,6-3,2	0,2-0,7	0,3-1,0	0,6-1,2	3,5-4,3	–	≤ 0,5	≤0,1
5	ЛПХНД-71	2,5-3,5	0,3-1,0	0,4-1,5	0,4-1,4	2,0-4,5	–	0,1	0,55
6	ЛПХНД-72	2,6-3,2	0,2-0,7	0,3-1,0	0,6-1,2	3,5-4,3	–	≤ 0,5	≤0,1
7	ЛПХНД-74	2,6-3,2	0,2-0,7	0,3-1,0	0,6-1,2	3,5-4,3	–	≤ 0,5	≤0,1
8	ЛПХНМдц-71 (ТУУ 27.1-26524137-1291-2007)	2,9-3,5	0,6-1,0	0,5-1,0	1,75-2,0	4,2-4,6	0,3-0,5	до 0,1	до 0,1
	ЛПХНМдц-71	2,92-3,25	0,94-0,98	0,51-0,53	1,70-1,73	4,18-4,24	0,26-0,28	0,035-0,044	0,081-0,088
9	ЛПХНМдц-73(ТУУ 27.1-26524137-1291-2007)	2,9-3,5	0,6-1,0	0,5-1,0	1,75-2,0	4,3-4,6	0,3-0,5	до 0,1	до 0,1
0	ЛПХНМдц-73	2,89-3,04	0,89-0,99	0,54-0,66	1,51-1,79	4,2-4,37	0,046-0,35	0,029-0,046	0,072-0,124

## 2.2 Умови плавки, модифікування і розливання чавунів

Лабораторні та промислові плавки проводили в ливарному цеху ПАТ «Марганецький рудоремонтний завод» в індукційній і дуговій електропечах місткістю 60, 2000 і 3000 кг, а також в лабораторних умовах в індукційній і силітовій печах.

Модифікування розплавів здійснювали в окремому ковші місткістю 60 кг, розрахункові кількості модифікаторів завантажували на дно ковша перед випуском розплаву з плавильного агрегату. Після витримки протягом 15...20 хв. і транспортування здійснювали розливання готового розплаву. З кожної плавки заливали два комплекти зразків: стандартного хімічного складу і модифіковані.

Контроль температури металу в печі і ковші здійснювали за допомогою хромель-алюмелевих датчиків температури занурення, встановлених на приладі визначення температури розплавленого металу «Термокон-1».

Після модифікування і витримки, при досягненні температури розплаву 1320°C, метал заливали в заздалегідь підготовлені ливарні форми для отримання різних зразків: а) діаметром 30 і висотою 250мм, б) діаметром 70 і висотою 150 мм (рис. 2.1 і 2.2) або куль діаметром 80 мм.

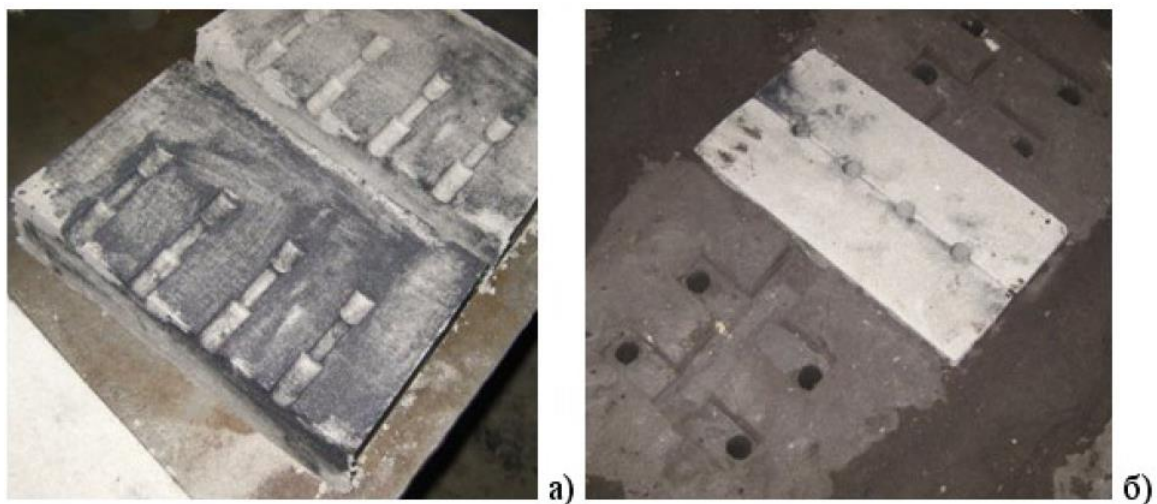


Рисунок 2.1 - Підготовка ливарної форми до заливання:

а - ХТС стрижень з порожниною, що повторює форму зразків для механічних випробувань; б – стрижнева ливарна форма в складеному вигляді



Рисунок 2.2 - Литі зразки, які одержані в стрижневій і піщаній ливарних формах

Для визначення механічних властивостей зносостійкого високохромистого чавуну відливали зразки згідно ГОСТ1497-84. Вибивання зразків здійснювали після охолодження їх до температури 70...30°C.

Для визначення властивостей і структури дослідного сплаву для виробництва прокатних валків відливали зразки циліндричної форми діаметром 20...50 і висотою 130...200 мм в кокільній і піщаній формах, що забезпечувало швидкості охолодження, які мають місце в реальній валковій ливарній формі, - від 1,0 до 6,0 град/с. Детальне дослідження структури і властивостей матеріалу до-слідних валків до і після теплового оброблення здійснювали на зразках, відібраних при механічному обробленні відповідно до схеми (рис.2.3).

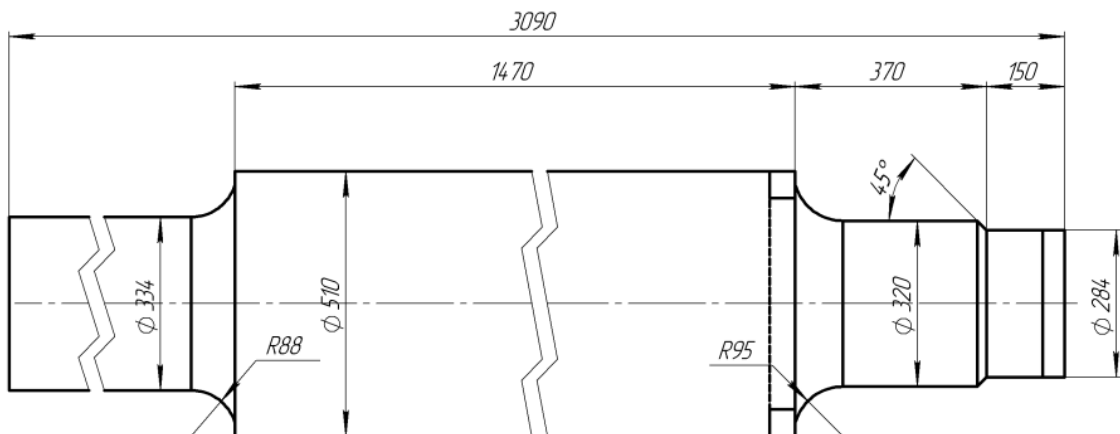


Рисунок 2.3 - Схема відбору зразків для випробовування механічних властивостей, хімічного аналізу та металографічних досліджень від натурних

зразків - прокатних валків

### 2.2.1 Метод теплового оброблення

У лабораторних умовах термічне оброблення проводили на установці, яка включала муфельну піч і систему автоматичного контролю (рис. 2.4), а також на установці ВДТА-8М. У промислових умовах термічне оброблення здійснювали в камерній печі з висувним сподом.

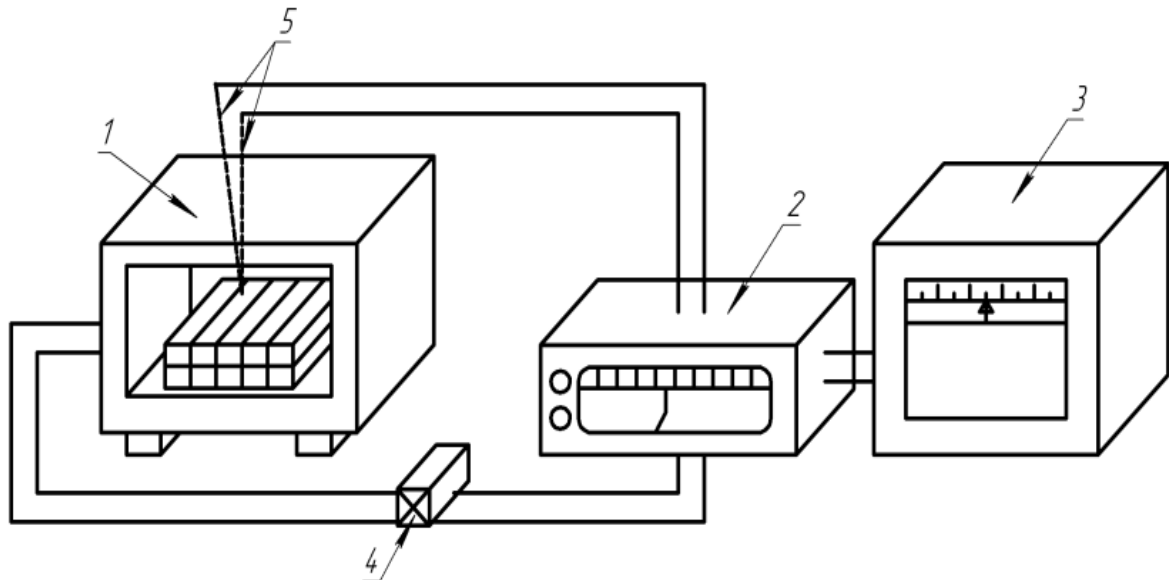


Рисунок 2.4 - Схема установки для проведення термічного оброблення:  
1 - муфельна піч; 2 – регулюючий пристрій; 3 – вимірювальний прилад; 4 – магнітний запускач; 5 – датчик температури ПП

### 2.3 Визначення фізико-механічних властивостей

Твердість БЧ за Роквеллом визначали за ДСТУ ISO 6508-1:2013, використовуючи алмазний конус з кутом при вершині  $120^\circ$  (шкала С). Визначення твердості за Брінеллем здійснювали за ДСТУ ISO 6506-1:2007 на приладі ТШ-2М і динамічному твердомірі ТДМ-1 за допомогою сталюї кульки діаметром 10 мм при навантаженні 29420 Н.

Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50 Н. Межу міцності при розтягу  $\sigma_B$  зразків діаметром 6 мм і міцності при вигині зразків розмірами 10x10x55 мм визначали за ГОСТ 1497-73 і ГОСТ 14019-80, відповідно, на універсальній машині МУП-50. Величину меж міцності розраховували як середню трьох випробувань. Ударну в'язкість чавунів



визначали на зразках без надрізу за ГОСТ 9454-78 на машині МК-30А.

### *2.3.1 Металографічний аналіз*

Мікроскопічне дослідження проводили на оптичних металомікроскопах МІМ-7, МІМ-8М, Neophot 21 і Axiovert 200М МАТ з програмним забезпеченням Axiovision 4.6, при збільшеннях 50...500. Шліфи досліджували до і після травлення. В якості основного травильника використовувати 2%-ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь). Кількість структурних складових визначали точковим методом Глаголева в 20...195 полях зору при збільшенні 400, що забезпечувало абсолютну похибку 1% і достовірність 0,9544. Будову матриці чавунів оцінювали за ГОСТ 3443-87, аномальність перліту - за шкалою.

Макроструктуру зразків досліджували методом растрової електронної мікроскопії з використанням мікроскопу МРЕМ-100М, при прискорюючій напрузі 10...30 кВ у вторинних електронах при збільшеннях від 300 до 10000.

### *2.3.2 Визначення ударостійкості*

Оцінку працездатності виливків, що підлягають ударним навантаженням, здійснювали за показником ударостійкості. Ударостійкість визначали на спеціальній установці за кількістю ударів при падінні зразка - кулі діаметром 80 мм з висоти 6,5 м з частотою 150 ударів/год. Для прискорених випробувань застосовували спеціальний копер, в якому руйнування зразка прово-дилося вантажем масою 101 кг, який падав з висоти 0,5 м з частотою 10 уда-рів/хв до руйнування виливка [11].

### *2.3.3 Визначення зносостійкості*

Зносостійкість дослідних високо хромистих сплавів досліджували на установці типу стенду ЛПЗ-М, розробленого ВНІПТ «Вуглемаш» (рис. 2.5).

Принцип роботи стенду полягав в тому, що підготовлені зразки розміщували в чаші і обертали в середовищі, що складається з кварцового піску і води в співвідношенні 2:1. Подібне середовище дозволяє оцінити зносостійкість сплаву в умовах гідроабразивного зношування при експлуатації багерних насосів. Зразки перед випробуванням знежирювали чотирьоххлористим вуглецем і зважували на демпферних вагах моделі ВЛА-

200М.

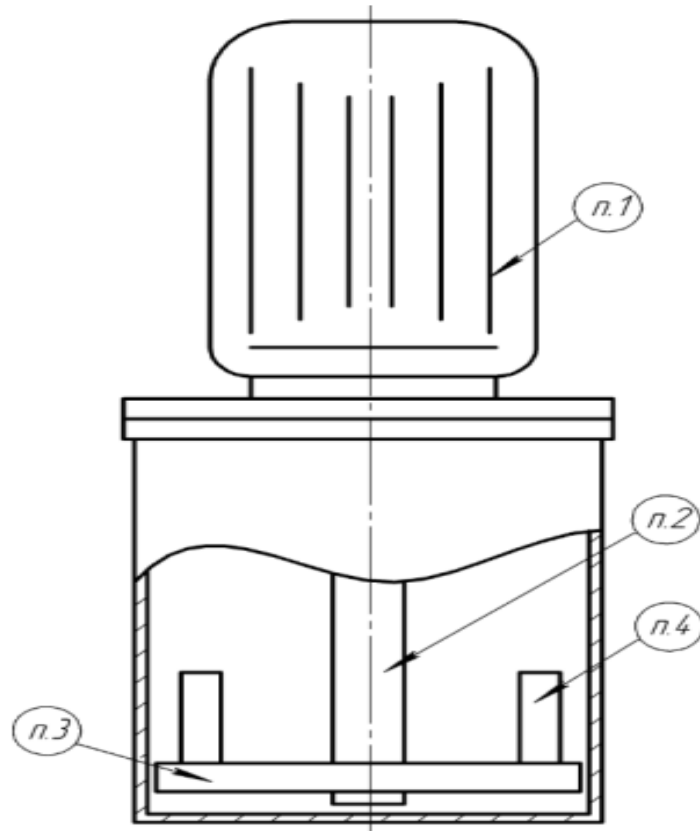


Рисунок 2.5 - Установка типу стенда ЛПЗ-М для випробування на гідроабразивний знос: п.1 - електродвигун; п.2 - вал; п.3 - диск для кріплення зразків; п.4 – зразки, закріплені на диску

Зносостійкість досліджуваних валкових чавунів визначали на установці СМЦ-2 при терті ковзання з зусиллям 70 МПа.

#### **2.4. Визначення експлуатаційної надійності прокатних валків.**

У роботі були визначені наступні показники, що впливають, експлуатаційної надійності прокатних валків:

- середнє число установок;
- середній наробіток за установку;
- середньоквадратичне відхилення наробітку за установку;
- середня витрата робочого шару за установку;
- середнє знімання робочого шару;
- середній ресурс;
- середній початковий діаметр;

- коефіцієнт списання валків по зношуванню;
- коефіцієнт експлуатаційної надійності;
- відсоток списання валків по відмовах: руйнуванню бочки, шийки, тревів, відшаруванням, сітці розпалу, викришкам, тріщинам, припіканням, зношуванню.

На початку досліджень необхідно визначати частки  $d(k)$ , що характеризують структуру розподілу відмов прокатних валків за відповідними причинами. Якщо  $n_k$  - кількість елементів масиву  $A^k$ , тоді

$$n_1 + n_2 + \dots + n_{14} = N \text{ і } d(k) = \frac{n_k}{N} \quad (2.1)$$

Для знаходження середнього наробітку за встановлення  $t(k)$  при відмові через  $k$  доцільно використовувати залежність:

$$t(k) = \sum_{n(lk)} \frac{a(n)}{n_k} \quad (2.2)$$

де  $l_k$  - безліч індексів валків, які відмовили по  $k$ -ой причині.

Среднєквдратичне відхилення  $\delta_k$  визначалося як

$$\delta_k = \frac{[a(n) - t(k)]^2}{(n_k - 1)}. \quad (2.3)$$

Далі, масив  $A$  можливо впорядковувався в порядку зростання чисел  $a(n)$  (для масиву зберігалися старі позначення).

Обчислювалися показники:

$$R = \text{int}(1 + 3.32 \cdot \lg N) + 1. \quad (2.4)$$

$$R_k = \text{int}(1 + 3.32 \cdot \lg N) + 1. \quad (2.5)$$

де  $\text{int}$  – функція цілої частини, наприклад,  $\text{int}(5,2)=5$ ,

$N_k$  – кількість валків, що відмовили з  $k$ -ої причини.

При виконанні досліджень необхідно підраховувати кількість валків  $N(r)$  масиву  $A$  в межах, що мають наробіток від  $b(r-1)$  до  $b(r)$ , і валків  $N_k(r)$  – від  $b_k(r-1)$  до  $b_k(r)$ , що відмовили за причиною  $k$  відповідно. У ряді випадків може виникнути інтерес до даних про кількість валків, що відмовили за причиною  $k$ , але, що напрацювали від  $b(r-1)$  до  $b(r)$  тонн. Їх потрібно одержувати й обробляти за наведеними нижче залежностями.

Значення функції інтенсивності відмов валків внаслідок причини  $\lambda_k(r)$  підраховувати за формулою:

$$\lambda_k(r) = \frac{N_k(r+1)}{([N_k - \sum_{i=1}^r N_k(i)]b_k)}, \quad (2.6)$$

$$r = 1, 2, \dots, R_k, k = 10, 11, 12.$$

Середня інтенсивність відмов  $\lambda_k$  має вигляд:

$$\lambda_k = \sum_{r=1}^{R_k} \lambda_k(r) / R_k. \quad (2.7)$$

Значення параметра потоку відмов за причиною  $k$  при наробітку  $r = \omega_k(r)$  виражається наступною формулою:

$$\omega_k(r) = \frac{N_k(r)}{N_k b}, k = 1, 2, \dots, 14; k \neq 10, 11, \quad (2.8)$$

Середня величина параметра потоку відмов  $\omega_k$  має вигляд:

$$\omega_k = \sum_{r=1}^{R_k} \omega_k(r) / R_k. \quad (2.9)$$

Для оцінки середнього наробітку прокатних валків між відмовами  $t_{cp}$  застосовувати залежність:

$$t_{cp} = \sum_{k=1}^{14} t(k) / 14. \quad (2.10)$$

Коефіцієнт експлуатаційної надійності  $K_{ен}$  відображає відносну ефективність прокатних валків за одну установку і якість їх виготовлення. Зношування прокатних валків є природнім процесом – наслідком їх експлуатації.

### Висновки за розділом

1. Характер і обсяг експериментальних робіт визначалися поставленими завданнями дослідження. Основним завданням було визначення впливу модифікаторів, що містять РЗМ, на процеси структуроутворення, а також індивідуальне або спільне з термічним обробленням і оптимізацією технологічного процесу виробництва вплив на фізико-механічні та експлуатаційні властивості зносостійких чавунів.

2. В процесі виконання поставлених завдань були застосовані стандартні методи: металографічний, хімічний, рентгеноспектральний, визначення механічних властивостей.

3. Всі дослідження проводили з використанням сертифікованих приладів та методів дослідження та контролю якості придатного литва при здавальному контролі.

### **3. ПРОЦЕСИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РУЙНУВАННЯ ВАЛКІВ З ХРОМОНІКЕЛЕВОГО ЧАВУНУ**

#### **3.1. Причини і характер відмов робочих валків станів гарячої прокатки**

Аналіз експлуатаційної стійкості хромонікелевих валків показав, що їхній ресурс суттєво залежить від виконання, типорозміру і стану, умов експлуатації.

Основними причинами порушення працездатності прокатних валків є: зношування, ушкодження бочки та руйнування робочого шару (відшаровування і викрошки), руйнування шийок і трєфів, відкол торців бочки, а також інші дефекти металу, формовані при литті.

Прискорене зношування валків виникає внаслідок непродуктивної витрати (зішліфування, обточування) частини робочого шару для видалення дефектів (тріщин, включаючи сітку розпалу, викрошок, зони підвищеного зношування). Передчасне зношування виникає внаслідок зниження твердості, неоднорідності формованої структури, нижче рівня вимог, що обмежуються нормативно-технічною документацією, а також по досягнутому діаметру бочки, який є не достатнім для продовження експлуатації валка.

При ушкодженні валків металом, що прокочується, на поверхні бочки утворюються вм'ятини, навари, раковини (рис. 3.1) – механічні ушкодження, які супроводжуються порушенням умов експлуатації, що приводять до глибинних порушень якості робочого шару.

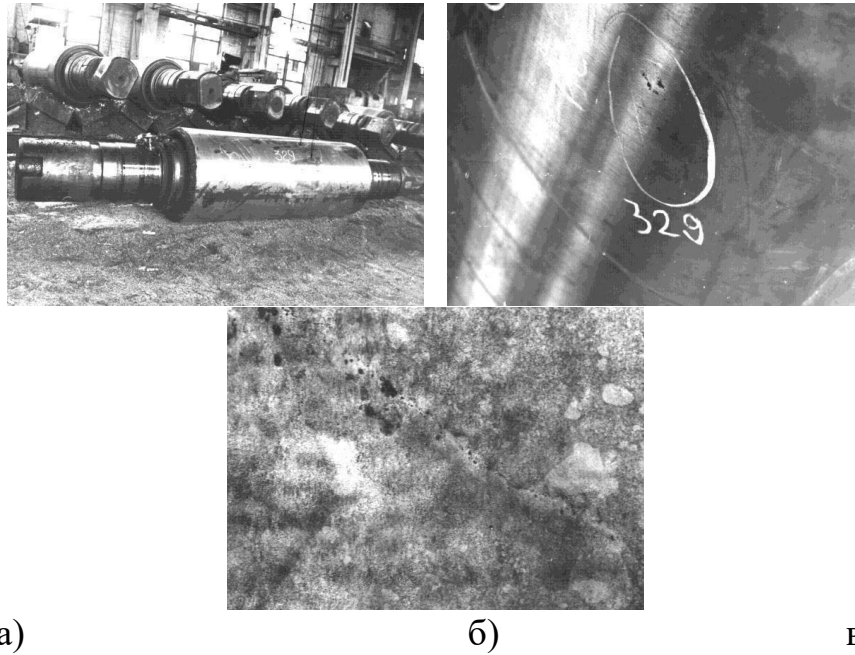


Рисунок 3.1 - Ушкодження валка, стану 1700 гарячої прокатки  
 а,б – раковини; в – сірчаний відбиток, що виявив у зонах локалізації  
 пошкоджуваності наявність пор, ланцюжка сульфідів і неоднорідність  
 розподілу сірки



Рисунок 3.2 - Викришування на валку гарячої прокатки по сітці  
 тріщин

Найпоширенішими видами дефекту бочки валків є тріщини. Утворення і розвиток сітки тріщин на бочці валка залежить від чистоти обробки поверхні, температури металу, що прокочується, величини тиску, інтенсивності охолодження та швидкості ковзання металу по робочій поверхні.

Відколи (рис. 3.3 і 3.4), як і викришування на робочій поверхні валка, являють собою місцеве відділення металу без наявності зони руйнування від втомлення. Цей вид дефекту відноситься до крихкого руйнування і виникає внаслідок високої локальної концентрації напруг у поверхневому шарі при неякісній механічній обробці.

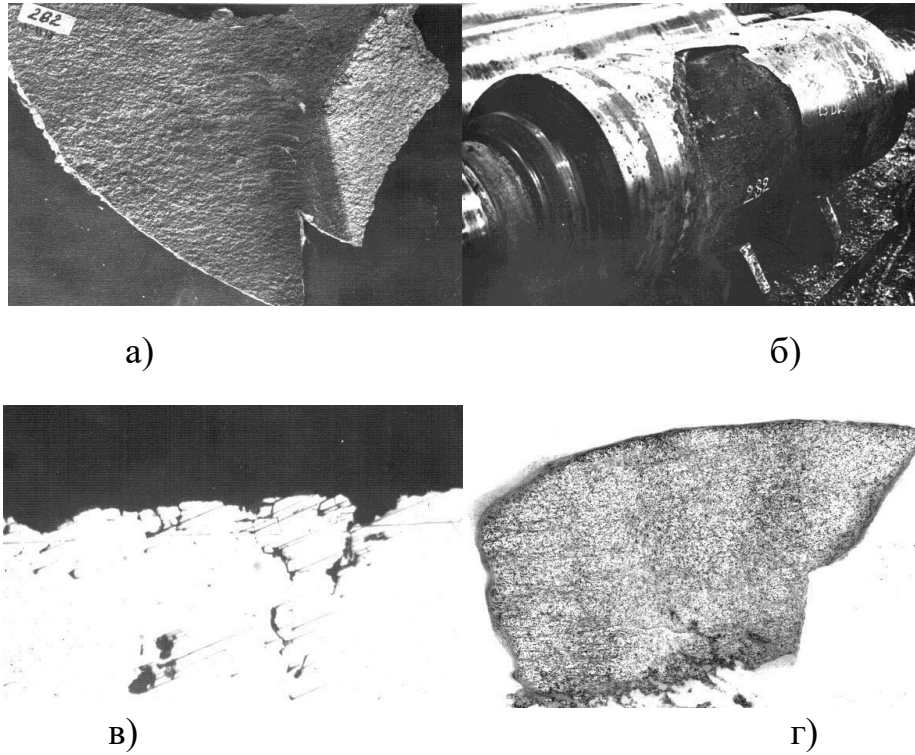


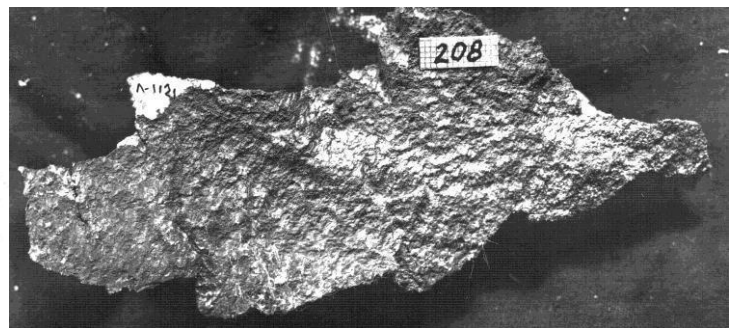
Рисунок. 3.3 Сколювання робочого шару валка стану 1700 гарячої прокатки.  
 а,б – сколювання глибиною від 15 до 80 мм; в , г – виявлені скупчення  
 сульфідних включень, пористість і тверді неметалічні включення



а)



б)



в)

Рисунок 3.4 - Пошкодження валка виконання ЛПХНд-71 стану 1700 гарячої  
 прокатки, що пройшов 56 переточувань.

а – сколювання біля торця бочки; б – грубокристалічний злом серцевини;  
в – неоднорідність розподілу сірки в структурі валка

Відколи та викришування є основною причиною перевалок і, у ряді випадків, конкурують навіть із загальним зношуванням. На поверхні бочки вони спостерігаються через порушення технологічних режимів при перешліфовці

Відшаровування - результат недостатньої контактної-втомної міцності робочого шару валків з його серцевиною. Причинами зниження контактної-втомної міцності є відхилення в структурі металу, незварюваності шарів. Це, головним чином, наявність зон з неоднорідною будовою, коли мартенсит і грубі скупчення цементиту розташовуються по площинах зрушення.

Відшарування у двошарових валках звичайно не перевищують глибини робочого шару. До виникнення відшаровувань, у більшості випадків призводять тріщини, що утворюються на поверхні бочки та розбудовуються вглиб валка до деякої критичної зони (7 -17 мм). У процесі експлуатації вони збільшуються в розмірах і займають усе більшу площу.

Крихке руйнування валків (рис. 3.5) часто відбувається в початковий період експлуатації. Бувають випадки їх руйнування навіть і до установки в кліть через великі залишкові напруги після термообробки.

У кліті валки руйнуються при порушенні режиму експлуатації.



Рисунок 3.5 - Руйнування робочих валків виконання ЛПХНд-70 стану 1700  
гарячої прокатки.

Валок, що наведено на рис. 3.5 характеризується малою товщиною робочого шару (8-10 мм), руйнування валка відбулося після двох закладок. У



валку виявлені відхилення (зональна ліквіація) по хімічному складу (концентрація нікелю знижено на 2,5%, а хрому на 0,5%)

До інших дефектів валків можна віднести «плямисту твердість», наваристий вигин шейки.

Передчасні відмови валків у період експлуатації визначаються двома основними причинами: їх незадовільною якістю та порушеннями умов експлуатації.

Незадовільна якість литих валків із чавунів, насамперед, пов'язане з відхиленнями хімічного складу, підвищеним вмістом шкідливих домішок (рис. 3.6), засміченням розплавів компонентами, що не обумовлені нормативно-технічною документацією, не ефективним модифікуванням, порушенням температурних режимів плавки і заливання, не якісною підготовкою ливарної форми, не дотриманням технологічних регламентів охолодження валків у формі та параметрів їх термообробки, не достатньою глибиною робочого шару і формуванням у ньому дефектів, не однорідністю структури металу, зональною ліквіацією компонентів.

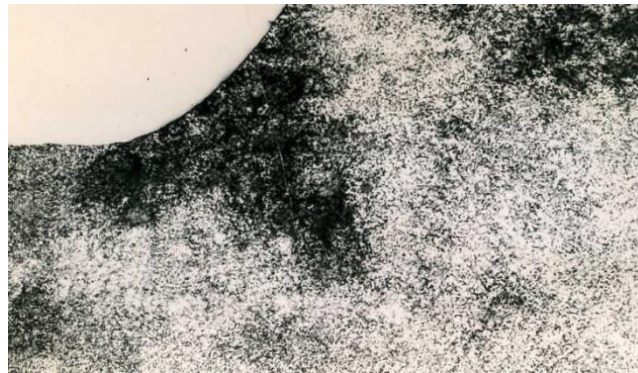


Рисунок 3.6 - Концентрація сірки в зоні переходу бочки до шийки валка (сірчаний відбиток по Бауману)

### **3.2. Процеси, що впливають на інтенсивність руйнування робочої поверхні прокатних валків**

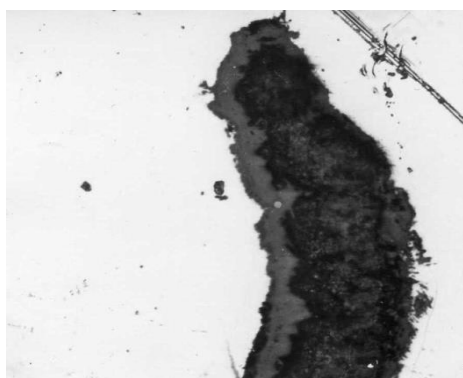
Зношування робочої поверхні прокатних валків визначається сортаментом виробленої продукції і умовами їх експлуатації, а також структурними змінами металу на поверхні тертя, що обумовлене при гарячій

прокатці такими факторами як: контактний тиск; матеріал валка та хімічний склад заготовки, що прокочується; довжина розкату; температура прокатки заготовок і валків; швидкість прокатки; величина ковзання металу, який прокочується, у зоні деформації відносно поверхні валків; стан поверхні смуги; стан поверхні валків і їх твердість.

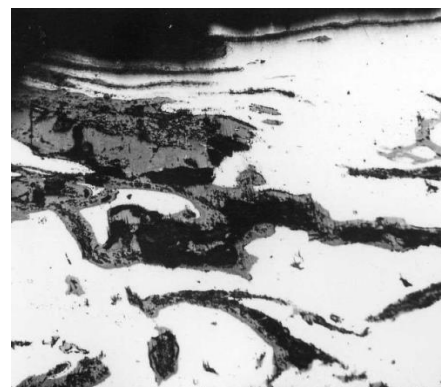
При прокатці в поверхневому шарі валків відбувається складний комплекс, теплових і хімічних процесів, які приводять до корінних змін його структури і властивостей. Створюються області макро- і мікрорельєфу, мають місце зміцнення, втрата міцності, формуються структури відпустки і вторинного загартування.

Аналіз структурних змін, що відбуваються у робочому шарі валків із хромонікелевого чавуну, які експлуатуються у чистових та передчистових клітках сортових станів показав, що за рахунок формування троостомартенситу йде зміцнення їх поверхні. Мікротвердість робочого шару становить Н50 – 740-950. Товщина такого шару невелика, тому що на глибині 0,1мм лінії  $\alpha$ -Fe гострі.

У результаті досліджень мікроструктури нелегованого і низьколегованого чавуну з пластинчастим графітом після експлуатації в умовах термоциклічного впливу було виявлено розвиток процесу графітизації в зоні внутрішнього окиснення (рис. 3.7). Встановлено, що інтенсивність



а



б

а×100; б×1000

Рисунок 3.7 - Графітизація в зоні внутрішнього окиснення

Виділення графіту відбувається шляхом нашарування на вже існуючі включення, що приводить до рівномірного їхнього стовщення або зміни форми – появи «пір'якообразних» включень (рис. 3.8).

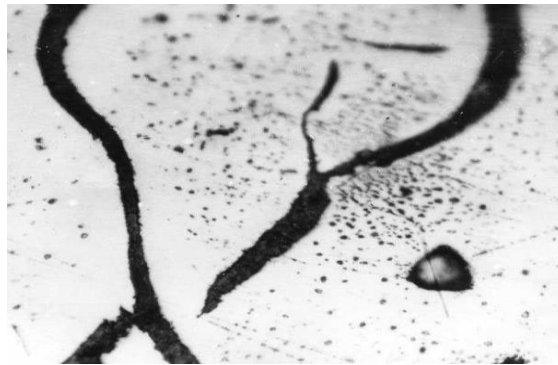


Рисунок 3.8 - Ріст включень графіту при експлуатації валків в умовах дії високих циклічних питомих тисків і підвищених температур,  $\times 100$

Графіт виділяється також у тріщинах при руйнуванні цементиту і у порах (рис. 3.9).

Інтенсивність розвитку графітизації на границях цементитних кристалів при експлуатації валків з хромонікелевого чавуну й навколо неметалічних включень.



а



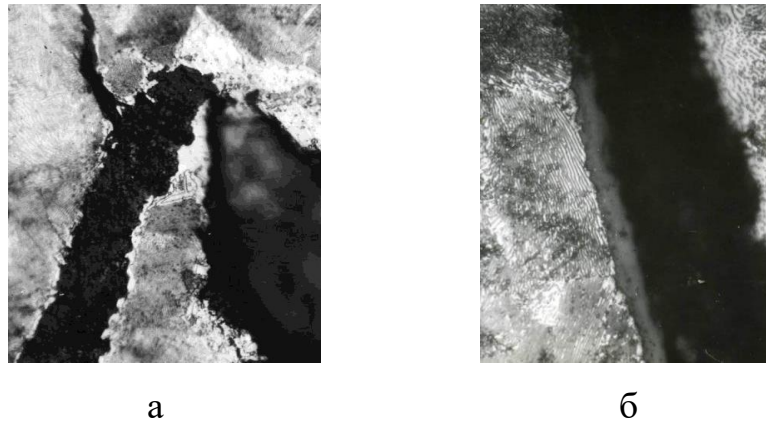
б

а $\times 100$ ; б $\times 500$

Рисунок 3.9 - Руйнування і графітизація цементиту

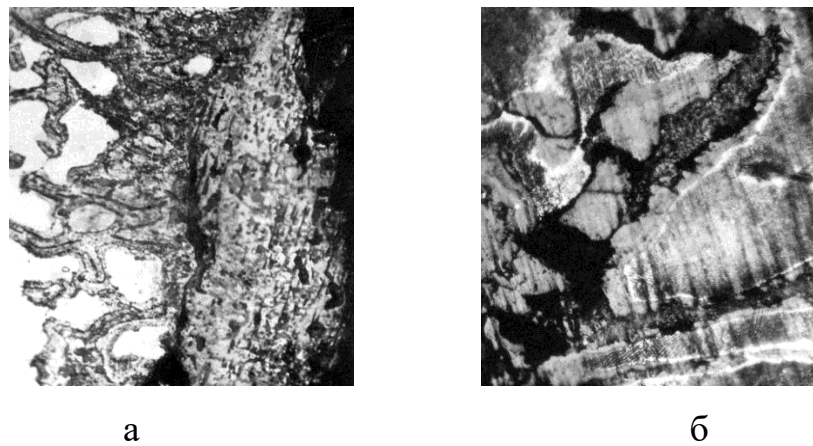
Помітне окиснення і у границь феритних зерен. У результаті, на ділянках матриці, які збіднюються вуглецем, навколо графіту з'являється феритна облямівка (рис. 3.10), що повторює рельєф включення, окисел часто описує форму графіту. Якщо графітизація не відбувається, то окисненню передують: дроблення і сфероїдизація, часткове або повне зникнення (вигорання) тонких пластин цементиту (рис. 3.11).

Відмінністю є лише ефект більш інтенсивного деформування цементиту і виділення на дислокаційних стінках вуглецю, що приводить до окиснення, руйнування та викришування цієї фази (рис. 3.12).



а×300, б×1000

Рисунок 3.10 - Розвиток процесів знеуглецьовування (а) і окиснення (б) навколо включень графіту;



а - у зоні внутрішнього окиснення, ×1000; б - у поверхні тертя, × 500

Рисунок 3.11 - Вигорання тонких включень цементиту при взаємодії з окисним середовищем

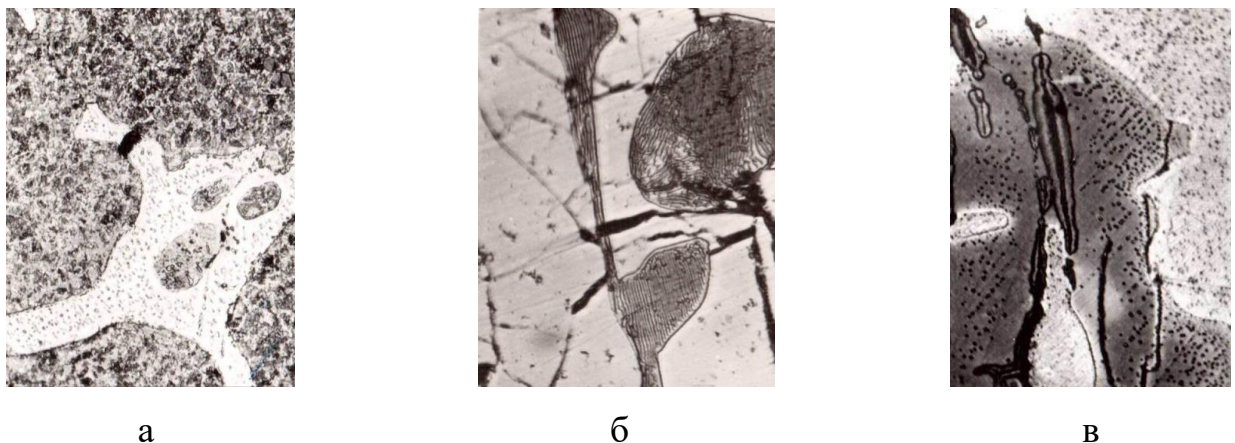


Рисунок 3.12 - Структура карбідної фази після експлуатації валка, ×1000

При надходженні активно-корозійної атмосфери можливо вибіркоче окиснення окремих ділянок перліту.

Процеси відновлення на поверхні тертя супроводжуються повним і частковим зникненням включень графіту (див. рис. 3.11). Залежно від інтенсивності протікання реакцій при термоциклічному впливі, вдавалося спостерігати появу переривчастих включень графіту і замість суцільних окислів – окремі крапкові, що формують ніздрювату структуру.

Утворення тріщин може бути пов'язане і з  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетвореннями, наявністю фаз з одмінними коефіцієнтами термічного розширення, напругами і деформаціями, обумовленими градієнтом температур. Наявність  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворень на поверхні прокатних валків пов'язане як з роботою в умовах циклічної зміни температур, так і – дією великих питомих тисків. Крім того, фазові переходи полегшуються розвитком областей локальних деформацій.

Дослідження робочої поверхні хромонікелевих валків, виконані за допомогою двоступінчастих вугільних відбитків показали, що якість механічної обробки впливає на механізм зародження і розвитку тріщин. При механічній обробці можлива поява тріщин і на границі цементит – пластична матриця. У процесі експлуатації можливо подальший розвиток субмікротріщин, що виникли при обробці.

Котрелловської взаємодії, так і по вакансійному механізму. Це відбувається за рахунок деформації, у результаті напруг I і II роду. Пори виникають на границі розділу фаз матриця – включення або з'являються по границях зерен. Згідно з теорією утворення пор, формозміна визначається структурними перетвореннями і інтенсивністю дифузійних процесів (рис. 3.9, б).

На утворення тріщин в більшій мері впливають напруги, що розбудовуються, і деформації. При цьому провідним фактором є температурні градієнти. Процес обумовлений релаксацією термічних напруг, особливо, при жорстких режимах експлуатації з великими швидкостями прокатки (нагрівання та охолодження).

Важлива також роль температурної післядії, що обумовлена процесами релаксації напруг і повзучості. Фізичні причини цього явища пов'язані зі зміною концентрації вакансій, модулів пружності ( внаслідок фазових перетворень), з взаємодією дислокацій та іншими факторами.

### **Висновки за розділом**

1. Виконані дослідження експлуатаційної стійкості валків показали, що основними причинами порушення їх працездатності є: зношування, ушкодження бочки і руйнування робочого шару (відшаровування і викрошки), поломка шийок і трэфів, відкол торців бочки, а також дефекти металу, формовані при литті.

2. До експлуатаційних факторів, що виявляють вплив на ресурс валків відносяться: неефективне використання різних конструктивних типів і виконань валків, нераціональні системи їх охолодження, надмірні і нерівномірні навантаження, недотримання норм наробітку в міжремонтні періоди та ін.

3. Встановлено, що інтенсивність розвитку формозміни поверхні прокатних валків залежить від температурного режиму роботи і середовища, виду навантаження, структури та властивостей застосовуваного матеріалу, стабільності фаз і розподілу в них компонентів.

Особливий вплив на руйнування робочого шару виявляють, графітизація, окиснення,  $\alpha$ - $\gamma$  перетворення, що виникають та наявність неметалічних включень у металі.

Виявлені особливості структуроутворення можуть бути визначальними в пошкодженості карбідної фази і розвитку сітки розпалу робочого шару валків при експлуатації.

## 4. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА ТА ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧОГО ШАРУ ВАЛКІВ

### 4.1. Вплив хімічного складу робочого шару на властивості і структуру двошарових валків

Підвищення стійкості і надійності металургійного устаткування – прокатних валків, нерозривно пов'язане зі створенням і оптимізацією матеріалів, які відрізняються високою зносостійкістю, загальним наробітком і – у міжремонтний період, низькою схильністю до викришування робочої поверхні при експлуатації.

Задовольнити таким вимогам може сплав, структура якого складається із дрібних зерен карбідної фази з однорідним розподілом у ній розчинених компонентів. Такий матеріал при стаціонарному виливку забезпечує зниження спаду твердості по глибині робочого шару при збереженні деякого ступеня вибілу, достатньої зносостійкості і може знайти застосування при виробництві сортопрокатних валків з врізами калібрів.

Проведеними раніше дослідженнями були отримані кореляційні залежності (табл. 4.1) впливу хімічного складу на рівень твердості валків, що відливаються стаціонарним методом [22].

Таблиця 4.1. – Вплив хімічного складу валків із хромонікелевого чавуну виконання СПХН-46 стаціонарного виливка на розрахункову твердість і її склад

Кореляційні залежності	Коефіцієнт кореляції, R
На глибині 20мм HB=356-15,5C-15,5Si-36,8Mn+303,9P+59,7S	0,43
На глибині 50мм HB=368,4-28,3C-25,7Si- 31,0Mn+239,1P+44,4S+17,3Cr+5,8Ni	0,45

Примітка: розрахункову твердість оцінювали по співвідношенню структурних складових  $HB=(\%C \cdot K1 + \%P \cdot K2 + \%G \cdot K3) : 100$  де Ц, П, Г –цементит, перліт і графіт у чавуні відповідно, а K1, K2 і K3 – їхня частка в %.

Рівняння отримані при обробці експериментальних даних впливу, хімічного складу досліджуваного хромонікелевого чавуну сортопрокатних валків, мас. %:

2,54-3,37 C; 0,6-1,11 Si; 0,44-0,77 Mn; 0,02-0,10 S; 0,15-0,30 P; 0,40-1,13 Cr; 0,73-1,66 Ni; решта –Fe.

При стаціонарному виливку сортопрокатних валків не використовували додаткового модифікування присадками.

З наведених даних видно, що найбільший внесок у рівень твердості вносить вміст карбідоутворюючих компонентів - вуглецю і марганцю (в робочий шар глибиною 20мм), а також фосфор, який утворює фосфідну евтектику. Внесок інших компонентів приблизно однаковий. У робочому шарі металу на такій глибині вплив концентрації Ni і Cr не проявляється.

За більш повільної кристалізації вилівка (на глибині 50мм), відповідної до дна калібру, роль вуглецю зростає ще більше, оскільки виділяються грубі включення цементиту. На цій глибині хром і нікель, у даному концентраційному інтервалі, сприяють підвищенню твердості, а середній рівень її значень практично не змінюється, тобто не відзначається істотного спаду показань.

Проведені додаткові дослідження з вивчення впливу хімічного складу на твердість сортопрокатних валків [21] з литими струмками.

Мікроструктуру таких валків, відлитих із хромонікелевого чавуну (хімічний склад представлений у табл. 4.2), що призначені для чистових клітей крупносортного і рейкобалкового цехів, вивчали на темплетях, які були вирізані від шийок, струмків і гладких частин бочок валків. Досліджувані поверхні темплетів розташовувалися уздовж осі валка.

Таблиця 4.2 – Хімічний склад досліджуваних валків

№ валків	Призначення валків	Габарити валків, мм	Середній вміст елементів, %						
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
1	Балка №18	830x1200	2,96	0,57	0,62	0,29	0,09	1,76	0,86
2	Швелер №30	1057x1220	2,96	0,88	0,46	0,27	0,09	0,96	0,94



Мікроструктура чавуну складається з перліту, цементиту, графіту та перліто - карбідної евтектики. Карбідна фаза представлена евтектичним, вторинним, які випали з твердого розчину, і евтектоїдним цементитом, що входить до складу перліту. Характерні фотографії мікроструктур бочок валків наведені на рис. 4.1 і 4.2.

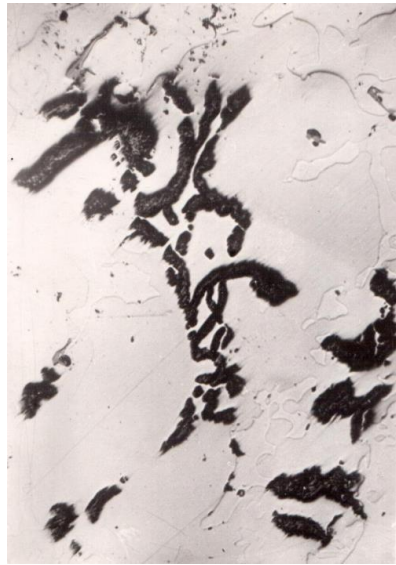
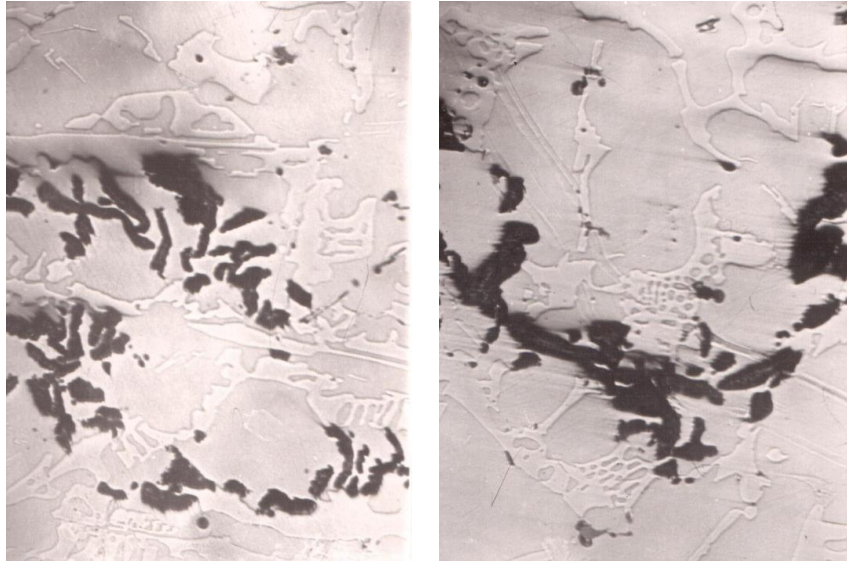
Форма включень графіту в міру видалення від поверхні валка до середини значно змінюється. На глибині 25 мм вони мають вид відносно коротких і розрізнених пластин, а на глибині 75-100 мм і до середини стають грубіше і довше, причому кількість їх також збільшується.

Для робочого шару валків рекомендований і чавун наступного хімічного складу, мас.% : 2,6-2,85 C; 0,4-0,55 Si; 0,3-0,5 Mn; 2,8-3,15 Ni; 0,7-0,8 Cr; 0,9-1,1 Cu; 0,1-0,2 V; 0,45-0,60 P; решта –Fe.

Цей матеріал має підвищену рідкотекучість, зносостійкість, термостійкість і поліпшену оброблюваність, однак він не може запобігти викришуванням країв бочки валків листопрокатних станів, знизити нерівномірність зношування по її довжині і забезпечити високий наробіток. У такому чавуні низька частка лише однієї мікролегуючої добавки – ванадію, що не забезпечує помітного здрібнювання зерна. Крім того, співвідношення Ni/Cr = 3,95-4,0. Це, у присутності графітоутворюючого компонента – міді, приведе до збільшеної частки графіту і знизить наробіток валка.

При цьому, співвідношення нікелю до хрому повинне становити 2,2-3,0, а частка мікролегуючих добавок - 0,3-0,6%. Таке співвідношення нікелю, хрому і мікролегуючих добавок забезпечує в робочому шарі валків формування дрібного зерна, рівномірний розподіл дрібних, компактних включень графіту та знижує схильність до сколювання країв бочки при експлуатації.

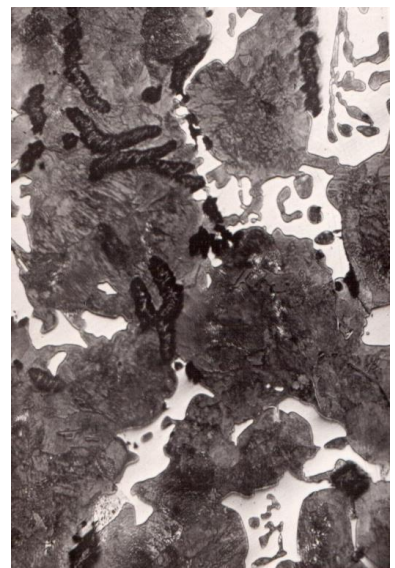
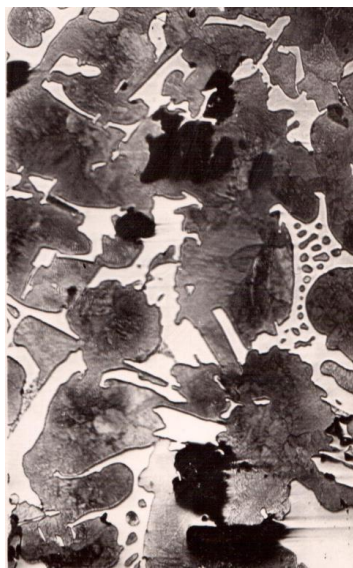
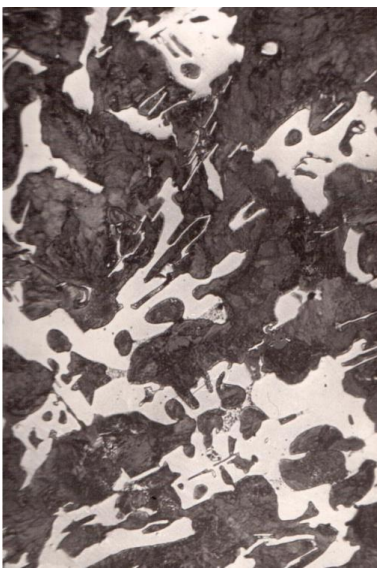
Добавка молібдену в кількості 0,2-0,5%, розчиняючись у карбідній фазі стабілізує її при експлуатації, зменшуючи схильність до пошкоджуваності.



а

б

в



г

д

е

Рисунок 4.1 - Мікроструктура чавуну валка №1 на різній відстані від необробленої поверхні: а, г - 25 мм; б, д - відстань 50 мм; в, е - 75 мм,  $\times 100$

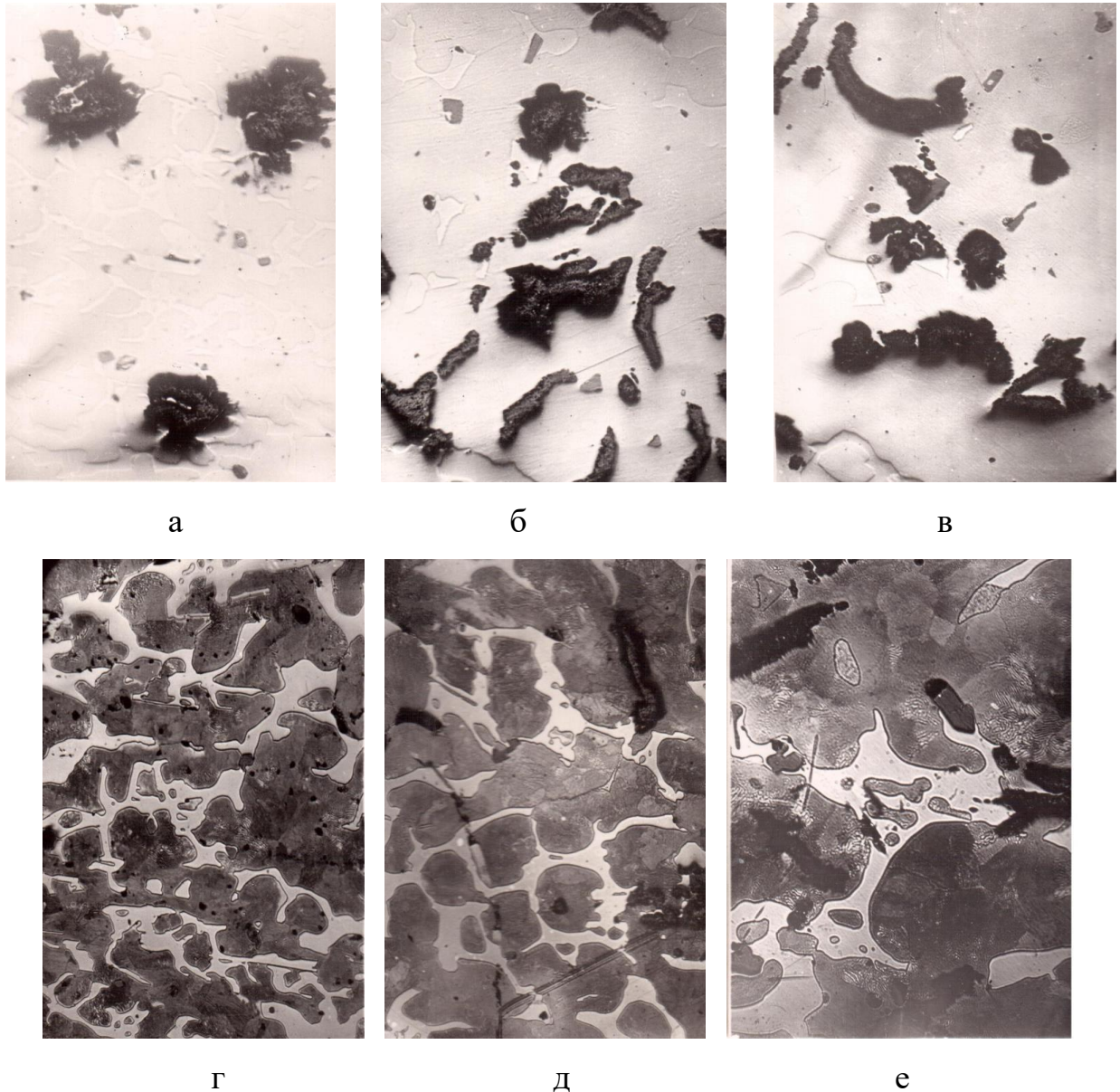


Рисунок 4.2 - Мікроструктура чавуну валка №2, на різній відстані від поверхні бочки:

а, г - 25 мм; б,д - 50 мм; в,е - 75 мм  $\times$  100

При долі молібдену менш 0,2 % цей компонент розчиняється в карбідній фазі, а більш 0,5% - утворює спеціальні карбіди, знижуючи частку графіту.

#### 4.2. Вплив технологічних параметрів вилівка на структуру металу

У клітках безперервних і напівбезперервних, широкосмугових, середньо- і товстолистових, а також дресирувальних станів широке застосування знаходять двошарові хромонікелеві валки.

Статистичними дослідженнями встановлено, що коерцитивна сила визначає структуру і напруги у виливка, тому доцільно використовувати цю характеристику при не руйнуючому контролі для оцінки якості валків при їхнім виробництві. Визначення твердості є здавальною характеристикою при виробництві валків.

Важливо встановити вплив технологічних параметрів виробництва двошарових валків виконань ЛПХНМд-71 і ЛПХНМд-73 на твердість і коерцитивну силу, щоб прогнозувати їхню якість.

За виливків валків трохи змінювався час і оберти в машині при заливанні, а також витримки порцій металу. Обробку основного металу робили телуром (Te), Superseed® 75( Sp) і Reseed® Inoculant (Rd). Кількість використаного телуру тільки при плавці валка №18 становило 20 г, а в інших - було однаковим – 15 г. Кількість модифікатора Superseed® 75( Sp) і Reseed® Inoculant (Rd) змінювали від 1 до 5 кг.

Вплив цих добавок, що модифікують, збільшує схильність чавуну до графітизації, тому для зниження такого ефекту використовували введення телуру.

Для визначення впливу параметрів виливка на експлуатаційну стійкість валків оцінювали рівень твердості (HS) і величину коерцитивної сили (Hc) у робочому шарі.

Статистичну обробку результатів спостережень проводили методом побудови рівнянь регресії.

При побудові рівнянь урахували параметри виливка основної порції металу і першої – що формує серцевину.

Параметри другої і третьої порцій серцевини не враховували, тому що вони, в основному, впливають тільки на структуроутворення серцевини бочки валка.

Отримані рівняння регресії мають такий вигляд:

$$H_c = 204,04 - 0,055T_k - 0,27T_{.m.o.} - 3,042M_o + 0,066B_{.z.o.} - 0,202B_{.v.o.} - 0,083O_{.v.o.} + 0,26T_{.m.p.} + 11,84M_{.п.} - 0,22B_{.z.п.} - 0,066B_{.v.п.} \quad (4.1)$$

$$R = 0,71$$

$$\begin{aligned}
 HS = & -166,42 + 0,047T_k + 0,082T_{\text{м.о.}} + 0,014M_{\text{о.}} + 0,151B_{\text{з.о.}} + 0,0963B_{\text{в.о.}} - \\
 & 0,006O_{\text{в.о.}} + 0,038T_{\text{м.п.}} - 0,01M_{\text{п.}} - 0,046B_{\text{з.п.}} + 0,045B_{\text{в.п.}} \quad (4.2) \\
 R = & 0,79
 \end{aligned}$$

де:  $T_k$  - температура металевої форми, °C;

$T_{\text{м.о.}}$  - температура основної порції металу, °C;

$M_{\text{о.}}$  - маса основної порції металу, т;

$B_{\text{з.о.}}$  - час заливання основної порції металу, с;

$B_{\text{в.о.}}$  - час витримки основної порції металу, с;

$O_{\text{в.о.}}$  - оберти при витримці основної порції металу, об/хв;

$T_{\text{м.п.}}$  - температура першої порції металу серцевини, °C;

$M_{\text{п.}}$  - маса першої порції серцевини, т;

$B_{\text{з.п.}}$  - час заливання першої порції металу серцевини, с;

$B_{\text{в.п.}}$  - час витримки першої порції металу серцевини, с.

Аналіз рівнянь регресії показує, що число обертів металевої форми (у досліджених межах) при заливанні основної порції металу, а також заливанні і витримці першої порції металу серцевини практично не виявляють впливу на рівень твердості і величину коерцитивної сили робочого шару валків.

Збільшення таких параметрів як: температура металевої форми, температура основної порції металу, маса основної порції металу, час витримки основної порції і кількість модифікаторів, що вводяться, Superseed® 75( Sp) і Reseed® Inoculant (Rd) (в оптимальній кількості) використовуваних при обробці рідкого розплаву, сприяють зниженню коерцитивної сили і підвищенню твердості валків.

Збільшення числа обертів металевої форми з 460 до 480 під час витримки основної порції металу незначно знижує коерцитивну силу й збільшує твердість робочого шару валків. Слід зазначити, що найбільш вагомий внесок у дроблення графіту, формованого в робочому шарі вносить частка введеного модифікатора.

### 4.3 Вплив модифікаторів нового покоління Superseed® 75 і Reseed® на структуру і властивості металу листопрокатних валків.

Як було показано раніше, застосування модифікаторів Superseed® 75 і Reseed® призначене, головним чином, для підвищення властивостей чавунів. Однак, враховуючи, що маємо справу не з білим чавуном, а – половинчастим, то було доцільним розглянути їхній вплив на формування як графіту, так і високовуглицевої фази - цементиту.

Хімічний склад досліджених валків відповідає технічним умовам на їхнє виготовлення (ТУ У27.1-26524137-1291-2007).

Аналіз представленої вибірки показує, що досліджувані валки мають близьку концентрацію хімічних елементів і домішок.

Обробку легованого металу в обсязі від 2,1 до 2,5т, призначеного для робочого шару, проводили в ковші сумарною часткою Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant від 1кг до 5кг.

У якості основного показника впливу сумарного змісту Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) на структуру робочого шару валків використовували коефіцієнт К, що представляє собою відношення кількості введеного модифікатора до обробленої маси металу та часу витримки металу робочого шару в ковші:

$$K = \frac{M_{\text{мод}}/M_{\text{мет}}}{\tau}, \quad (4.3)$$

де:  $M_{\text{мод}}$  - маса модифікатора, кг;

$M_{\text{мет}}$  – маса обробленого металу, т;

$\tau$  - час витримки металу робочого шару в ковші перед заливанням, год.

Розрахунки коефіцієнта К, представлені у табл. 5.3

Для проведення аналізу впливу показника К на структуру чавуну всі досліджувані проби від валків були розбиті на три групи.

Таблиця 4.3. – Розрахунки показника К, що представляє відношення кількості введеного в ківш модифікатора Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) до обробленої маси і часу витримки металу робочого шару в ковші

Значення коефіцієнта К	Кількість присадки, кг	Час витримки металу після заливання робочого шару, год.	Маса металу робочого шару, яка зазнала модифікування, т
4,2-6,6	1-1,5	0,1097-0,1138 (6'35"- 6'48")	2,0-3,2
8,7-13,3	2-3	0,1072-0,1139 (6'26"- 6'50")	2,05-2,13
14,5-21,6	4-5	0,1111-0,1130 (6'40"- 6'47")	2,1-2,5
Без обліку коефіцієнта К	відсутня	0,106-0,1140 (6'20"- 6'50")	2,1-3,1

Примітка: позначення ' – хвилини, а позначення "- секунди.

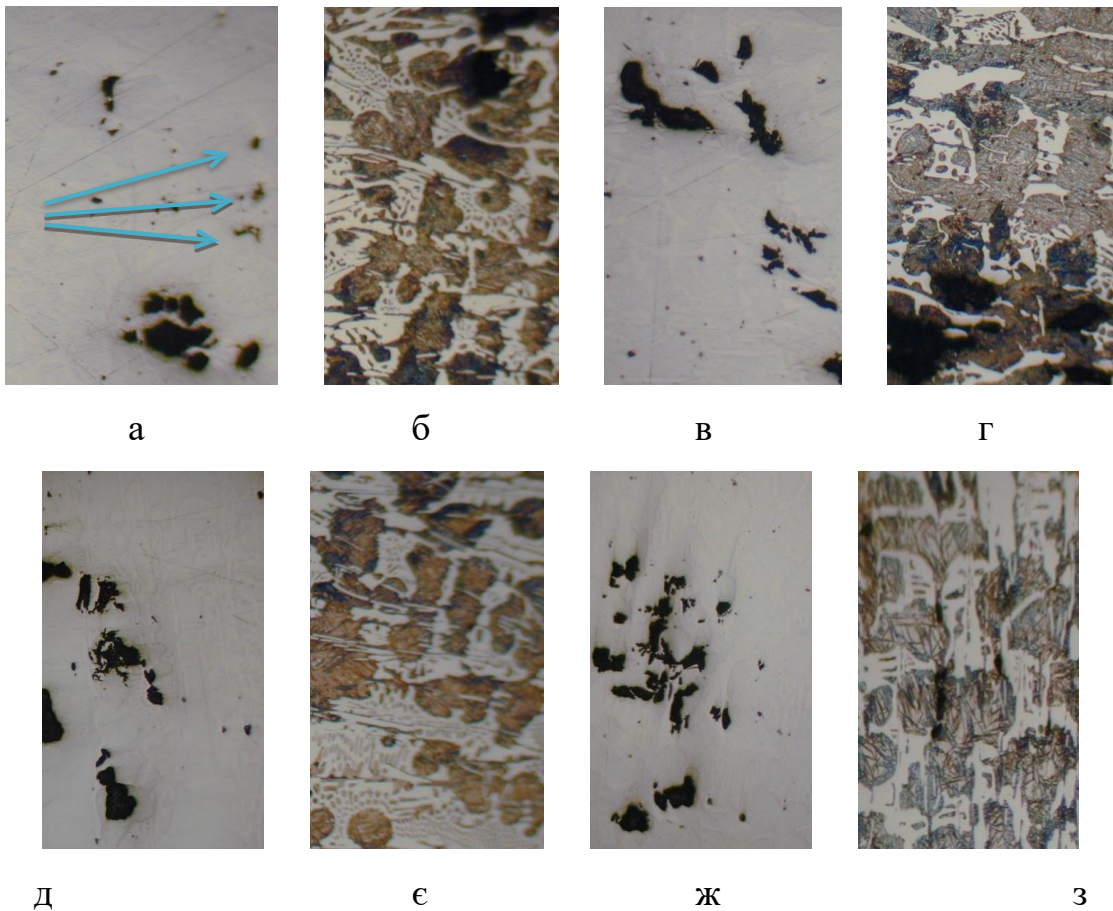
У роботі вивчали структуру валків після термічної обробки -відпал при 600°C для зняття напруг.

Аналіз структури робочого шару валків першої групи, оброблених 1 кг сумарною часткою присадки Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant показав, що в поверхневому шарі верхньої частини бочки є великі, у великій кількості неметалічні включення (зазначені стрілками, рис.4.3, а). Графіт має компакту форму. Розподіл включень графіту нерівномірний, спостерігається 5-7 шт у полі зору шліфа, розміром 45-60 мкм.

Починаючи з глибини 10 мм, відзначається формування вермикулярних і вкорочених пластинок графіту 10-12 шт у полі зору (див. рис. 4.3,в).

Аналіз структури верху бочки валка, обробленого 1,5 кг сумарною масою Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant показав, що робочий шар містить невелику кількість дрібних неметалічних включень (рис. 4.4, а). Графіт у поверхні вермикулярний і компактний, розміром 15-30мкм, 5-8шт. у полі зору шліфа. На глибині 10 мм спостерігаються включення вермикулярного графіту (рис. 4.4, в). На більшій глибині кількість і розміри графіту збільшуються. Спостерігається кристалізація грубих дендритів.

Мікроструктура верху бочки валка: мартенсит, бейніт, ледебурит, цементит до 35 % (рис. 4.4, б, г).



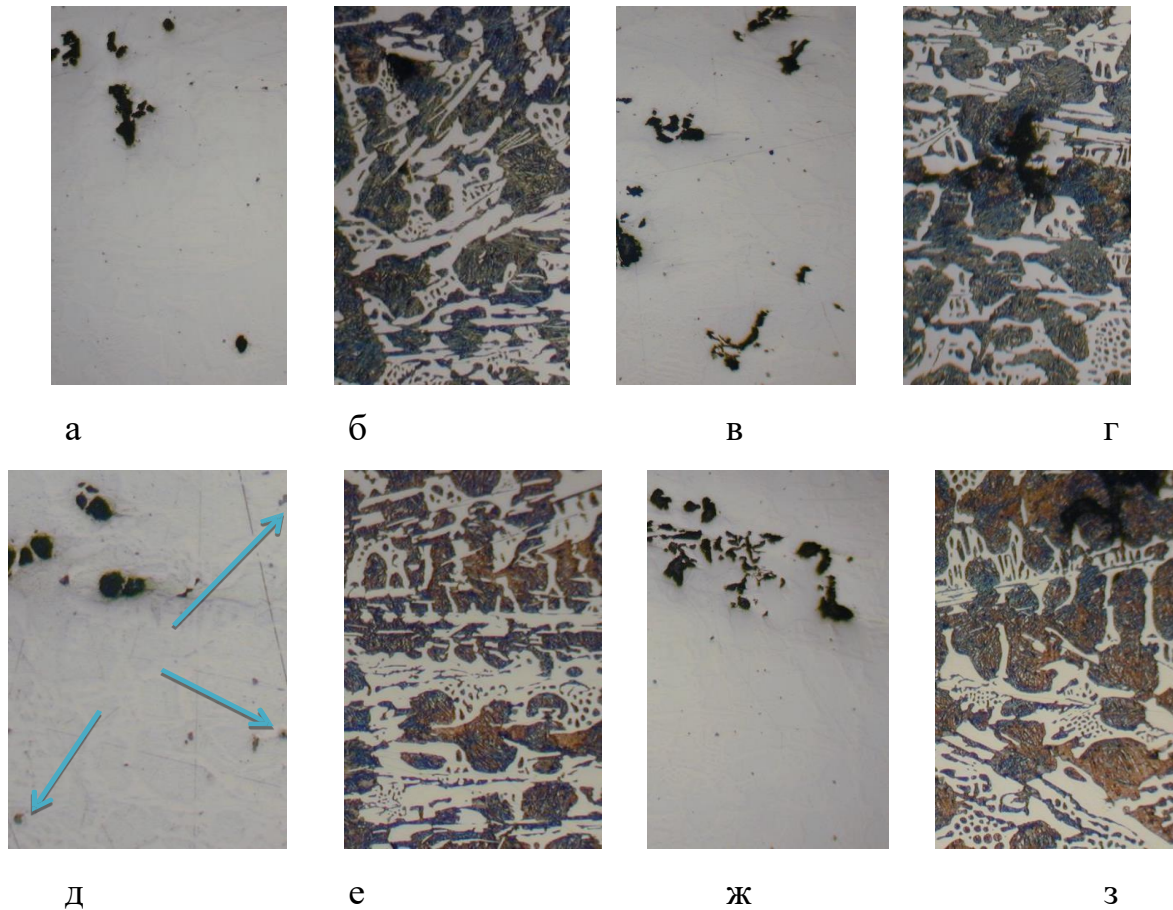
а,б,в,г –верх бочки; д,є,ж,з - низ бочки; а, б, д, є-на глибині 5мм; в, г, ж, з -на глибині 20мм,×100

Рисунок 4.3 - Характерна мікроструктура робочого шару валків, оброблених 1 кг сумарної частки Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant

Аналіз структури низу бочки валка, обробленого 1,5 кг сумарної маси Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant показав, що в робочому шарі утримуються великі неметалічні включення (див. Рис. 4.4,д). На глибини 10 мм спостерігаються колонії вермікулярного графіту (див. рис. 4.4,ж). На глибини 20мм формується пластинчастий графіт. Зерно дрібне, з ростом глибини збільшується, кристалізуються протяжні дендрити. Мікроструктура низу бочки валка: мартенсит, бейніт (незначна кількість), ледебурит, цементит 37 % (див. рис. 4.4, є, з).



Підводячи підсумок аналізу структурних складових у валках першої групи ( $K=4,2-6,6$ ) можна зробити наступний висновок: включення графіту на глибині робочого шару 5 мм переважно складаються з компактних включень.

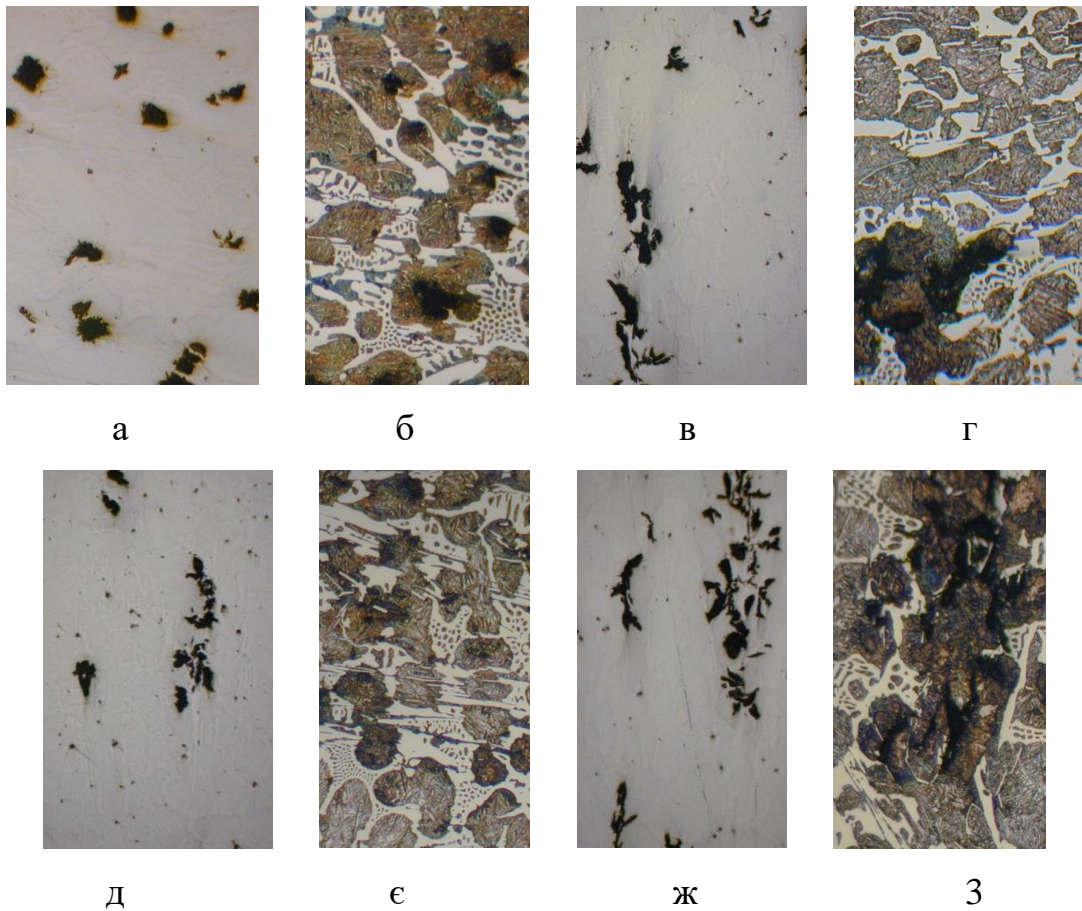


а,б,в,г -верх бочки; д,е,ж,з – низ бочки; а, б, д, е-на глибині 5мм; в, г, ж, з -на глибині 20мм, $\times 100$

Рисунок 4.4 - Характерна мікроструктура робочого шару валків, оброблених 1,5 кг сумарною часткою модифікаторів Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant

Дослідження структури валків другої групи з коефіцієнтом  $K=8,7-13,3$  проводили на валках, оброблених 2 кг і 3 кг (рис. 4.5 і рис. 4.6) сумарною масою Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant.

Аналіз структури верху бочки валка, обробленого 2 кг сумарної маси Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant показав, що в робочому шарі також є великі неметалічні включення (рис. 4.5, а).



а,б,в,г –верх бочки; д,є,ж,з - низ бочки; а, б, д, е-на глибині 5 мм; в, г, ж, з –  
на глибині 20 мм,×100

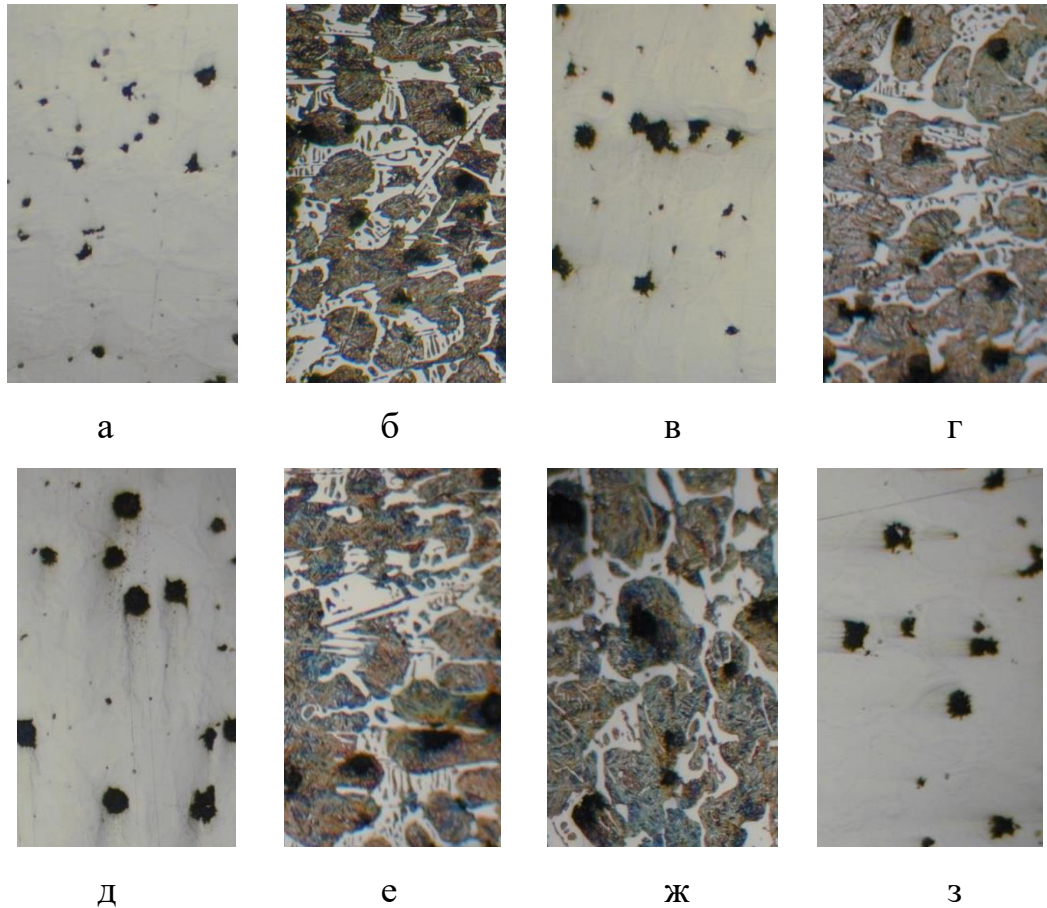
Рисунок 4.5 - Характерна мікроструктура робочого шару валків, оброблених  
2 кг сумарною часткою модифікаторів Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd)  
Inoculant

У поверхні виявлено компактний графіт з розміром включень до 45 мкм. У міру видалення від поверхні утворюється вермікулярний графіт, розмір і кількість включень значно збільшуються (рис. 4.5, в). Мікроструктура металу: мартенсит, бейніт, ділянки троостита, ледебурит, цементит 37 % (див.рис. 4.5, б, г).

У структурі робочого шару низу бочки переважає вермікулярний графіт (див.рис. 4.5, д, ж). З глибиною розміри включень збільшуються. Зерно укрупнюється в порівнянні з верхньою частиною бочки. Мікроструктура аналогічна верху бочки валка (див. рис. 4.5, є, з).

Мікроструктура верху бочки валка, обробленого 3 кг сумарною часткою Superseed® 75(Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant складається з

мартенситу, бейніту, ділянок трооститу, ледебуриту і містить цементит 30-32 %. У структурі верху бочки присутні неметалічні включення. Значна кількість графіту крапкової і компакної будови (рис. 4.6, а) виявлене по всій поверхні шліфа.



а,б,в,г -верхня частина бочки; д,е,ж,з - нижня частина бочки; а, б, д, е-на глибині 5 мм; в, г, ж, з -на глибині 20 мм,×100

Рисунок 4.6 - Характерна мікроструктура робочого шару валків, оброблених 3 кг сумарної маси Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant

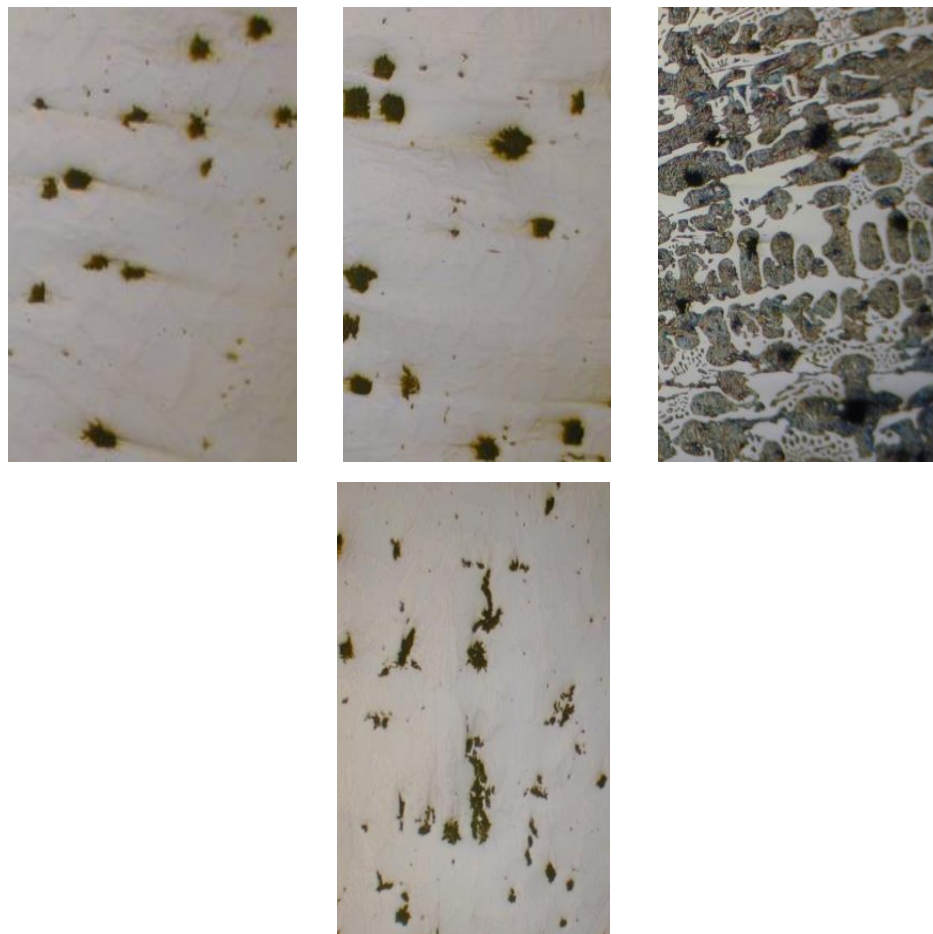
Величина зерна з глибиною робочого шару зростає. У поверхні спостерігається виражена груба дендритна будова (рис. 4.6, б).

У структурі низу бочки валка (див. рис. 4.6, д, ж) частка графіту трохи більша і його включення крупніше, ніж у верхній частині. Відзначається різний розмір дендритів, що кристалізуються: від дрібних до великих. Тому в цих зонах виявлені ділянки з різним вмістом цементиту, що характеризує одмінні умови кристалізації виявлених зон. Мікроструктура представлена

бейнітом, ділянками мартенситу з незначною часткою трооститу і цементитом (становить 30-32 %).

При введенні 3,0 кг модифікаторів проявляється крім компактного графіту і крапковий, незначно знижується частка карбідної фази. Відзначається мінімальна різниця між структурами низу і верху вилівка. Фазовий склад матриці відповідає присадці 2.0 кг модифікатора.

Аналіз валків третьої групи (рис. 4.7) показав, що в структурі втримується невелика кількість дрібних неметалічних включень.



а б в г

а, - на глибині 5 мм; б, в - на глибині 20 мм; г - на глибині 30 мм, ×100

Рисунок 4.7 - Характерна мікроструктура робочого шару валків, оброблених 4 кг сумарною часткою Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant

Графіт у поверхні компактний його розміри 15-25 мкм, з глибиною вони збільшуються. На глибині 20 мм спостерігається компактний графіт пластівчастої убік відводу тепла. Мікроструктура: мартенсит, бейніт, троостит, ледебурит, цементит (25-30 %).

Узагальнені дані по структуроутворенню – частці цементиту, графіту і величині зерна, які визначають рівень твердості валків, зроблених з обробкою металу їх робочого шару різною сумарною кількістю присадок, що модифікують, представлені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. – Вміст високовуглецевої фази в структурі валків з хромонікелевого чавуну

Сумарний вміст частки, модифікаторів-Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant при обробці металу робочого шару, кг	Частина бочки валка, яку досліджували	Форма включень графіту		Розмір включень графіту, мкм		Середня площа зайнята графітом, %	Середня площа зайнята цементитом, %
		на глибині 5мм від поверхні	на глибині 20мм від поверхні	на глибині 5мм від поверхні	на глибині 20мм від поверхні		
1	Верх	Компактна	Вермикулярна	45-60	25-60	3	36
	Низ	Компактна і вермикулярна	Вермикулярна	45-60	25-45	3	38
1,5	Верх	Компактна і вермикулярна	Вермикулярна	15-30	15-45	3	35
	Низ	Компактна	Вермикулярна	45-60	25-45	3	37
2	Верх	Компактна	Вермикулярна	30-45	30-60	4	37
	Низ	Вермикулярна	Вермикулярна	15-30	30-45	4	35
3	Верх	Крапкова і компактна	Компактна	до 15	15-45	4	32
	Низ	Компактна	Компактна	15-45	25-45	4	30
4	Верх	Шаровидна	Шаровидна	15-30	25-30	5	27
	Низ	Шаровидна	Шаровидна	15-30	25-30	5	30

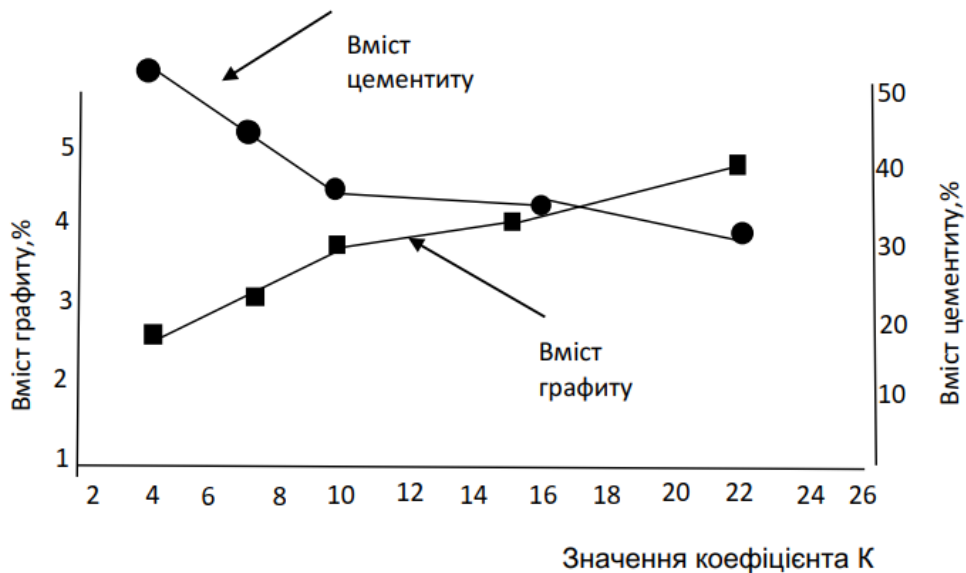


Рисунок 4.8 - Залежність кількості графіту і вмісту цементиту в структурі чавуну від коефіцієнта К (відносини кількості введеного в ківш модифікатора Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) щодо часу витримки основної порції металу)

Виходячи з аналізу, можна рекомендувати модифікування домішками Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) метал робочого шару валків виконань ЛПХНМд-71 і ЛПХНМд-73 у кількості 3-5 кг від маси металу робочого шару, рівної 2,1-2,5 т.

#### 4.4. Застосування шлакових сумішей для валкових розплавів

З найбільш ефективних технологій виробництва валків можна назвати позапічне рафінування металу обробкою шлаками. Особливо важливі технологічні прийоми, які, крім підвищення якості металу можуть забезпечити зниження витрати легуючих елементів.

Дослідження прокатних валків виконання ЛПХНД-72, які оброблювали екзотермічною шлакоутворювальною сумішшю (хімсклад, %: 15...18 – алюмінієвий порошок; 6...10 – натрієва силитра; 13...17 – марганцева руда; 16...24 – доменний шлак; 20...30 – плавиковий шпат; 12...25 – силікатна брила), показали поліпшення якості поверхні виливків, що дозволило

знизити припуски на механічну обробку валків. Недолік цих шлаків – підвищена температура їх плавлення.

Попередньо дослідження проводили на експериментальних виливках. Метал виплавляли в індукційній печі ємністю 200кг. З кожної плавки виготовляли по 3 виливки Ø250мм і висотою 500мм, одна з яких була вихідною. Шлакоутворювальну суміш присаджували в ківш при випуску металу з печі.

Досліджували 4 різних складу (табл. 5.5). При їхнім уведенні дотримували температурні режими, які відповідали повновагій плавки. Суміші застосовували для обробки сірого чавуну, що виплавляли в індукційній печі, який використовується для серцевини двошарових хромонікелевих валків і чавуну з кулястим графітом.

При розплавлюванні і доведенні металу за хімічним складу і температурі відбирали першу (контрольну) порцію металу і заливали технологічну пробу. По ходу плавки на дзеркало металу присаджували 4-5 разів шлакоутворювальну суміш з розрахунку наступного збільшення вмісту бору в металі по 0,010 % для поліпшення його засвоюваності. Після кожної присадки суміші і її розплавлювання перемішували метал, і після витримки через кожні 10 хв заливали технологічну пробу для визначення хімічного складу і механічних властивостей.

Для одержання даних про засвоєння бору в процесі доведення металу була проведена плавка з відбором проб після різної витримки обробленого металу в печі. Хімічний склад і механічні властивості металу експериментальних виливків наведені в табл. 4.6, вміст шкідливих домішок – у таблиці 4.7.

З табл. 4.7 випливає, що засвоєння бору із сумішей залежить від температури металу і ступеню його розплавлювання, а також способу введення. При обробці в ковші сумішшю №1 метал витримували на протязі 1хв. За температурою 1380 °С засвоєння бору було відносно низьким (не перевищувало 12,5 %). Низьке засвоєння

Таблиця 4.5 – Вміст шлакоутворювальних сумішей

№ плавки	Компоненти	Вміст суміші, %	Масова частка, %											Температура плавлення, °С
			SiO <sub>2</sub>	CaO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Оакт.	Ca	Si	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Борат кальцію	70	0,3	36	44	0,001	–	0,01	0,02	–	–	–	–	970
	Перборат натрію	30	–	–	22,6	–	–	–	–	20	10	–	–	620
2	Октоборат натрію	100	–	–	82	–	–	–	–	18	–	–	–	560
3	Октоборат натрію	80,5	–	–	82	–	–	–	–	18	–	–	–	560
	Ферро-силіцій 4%	19,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	45	–	1280-1350
4	Трехкальцієвий борат	75	14	43	23	2	15	3,5	12,0	–	–	–	–	1140
	Сілікокальцій	25	–	–	–	–	–	–	–	–	–	17	50	1150

Таблиця 4.6 – Хімічний склад чавуну, обробленого шлаковою сумішшю і властивості металу

№ проб	№ суміші	Спосіб введення домішки	Час витримки після обробки, хв	Механічні властивості		Вміст компонентів, %							
				твердість, НВ	Межа міцності при вигині, Бвиг, МПа	C	Si	Mn	P	S	B	Cr	Ni
1-0	–	–	–	190	310	3,5	0,95	0,53	0,21	0,16	0,0045	–	–
1-1	№2	піч	40	205	325	3,54	0,99	0,52	0,19	0,16	0,015	–	–
1-2	№2	піч	35	225	322	3,54	0,98	0,51	0,22	0,147	≥0,03	–	–
2-0	–	–	–	185	278	3,48	1,20	0,53	0,18	0,13	0,005	–	–
2-1	№3	піч	34	201	303	3,48	1,15	0,56	0,18	0,115	0,015	–	–
2-2	№3	піч и	40	194	283	3,48	1,43	0,53	–	–	0,024	–	–
3-0	–	–	–	185	335	3,3	1,0	0,48	0,137	0,095	0,0043	–	–
3-1	№4	піч	25	213	325	3,3	0,96	0,49	0,145	0,087	0,0106	–	–
3-2	№4	піч	15	247	351	3,3	0,93	0,50	0,125	0,087	0,0187	–	–
3-3	№4	піч	8	220	308	3,3	1,05	0,50	0,139	0,091	0,0194	–	–
4-0	–	–	–	246	265	3,37	0,80	0,57	0,12	0,053	0,0044	0,98	1,0
4-1	№1	кiвш	5,0	246	334	3,32	0,80	0,60	0,12	0,052	0,018	0,95	1,0



Таблиця 4.7 – Засвоєння бору і зміна вмісту шкідливих домішок у металі експериментальних виливків

№ проб	№ суміші	Присадження, %	Засвоєння бору			Зміна в металі				Температура металу при обробці, °С	Спосіб введення суміші й витримки, хв
			Введе но бору, г/кг	Вміст бору, г/кг	Ступінь засвоєння, %	фосфору		сірки			
						до/після обробки	%	до/після обробки	%		
4-0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1400	–
4-1	1	1,0	1,1	0,136	12,5	0,12/0,12	0	0,053/0,052	-1,9	1380	ківш(1)
1-0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1325	–
1-1	2	0,11	0,275	0,105	38,3	0,21/0,19	-9,5	0,16/0,16	0	1360	піч (40)
1-2	2	0,53	0,905	0,255	≥28,2	0,21/0,22	+5,0	0,16/0,147	+8,0	1300	піч (35)
2-0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1300	–
2-1	3	0,11	0,275	0,10	36,5	16/18	+12,5	0,13/0,115	-11,5	1320	піч (34)
2-2	3	1,0-Fesi	0,575	0,19	33,1	–	–	–	–	1325	пекти(40)
3-0	–	–	–	–	–	0,137	–	0,95	–	1310	–
3-1	4	0,48	0,347	0,063	18,2	0,37/0,145	+6,0	0,95/0,87	-8,5	1330	піч (25)
3-2	4	0,19– СК-15	–	0,144	20,0	0,137/0,125	-9,0	0,095/0,087	-8,5	1320	піч (15)
3-3	4	0,41– СК-15	–	0,151	20,8	0,137/0,139	+1,5	0,95/0,091	-4,0	1320	піч (8)

Це дозволяє рекомендувати її використання для обробки в ковші навіть ваграночного чавуну в промислових умовах.

З табл. 4.6 видно, що при витримці обробленого металу навіть на протязі 40хв. вміст бору в ньому практично не змінюється при введенні шлакової суміші в піч. Засвоєння цього компонента при обробці в ковші має тенденцію до зниження ступеня засвоюваності.

Механічні властивості металу (табл. 4.6) свідчать про те, що при обробці шлаковими сумішами вони підвищуються.

Для розплавлення суміші й забезпечення формування шлаків випуск металу з печі робили при температурі 1460-1480 °С порціями з інтервалом 2-3 хв.

Вміст бору, в основному, після обробки шлаками становив 0,012-0,016 %.

Статистичні дослідження показали, що обробка шлаковою сумішшю №1 дозволяє знизити концентрацію нікелю з 2,9 % до 2,7 % для виконання ЛПХНд-62 і з 4,1 до 3,51 % для – ЛПХНд-71 зі збереженням рівня властивостей (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Рівень механічних властивостей виливків з легованого чавуну

Тип чавуну	Модифікатор, що вводиться	Механічні властивості (середні значення)			
		Бвиг, МПа		Твердість, НS	
		до обробки	Після обробки	до обробки	Після обробки
ЛПХНд-62	– Суміш №1	275,2	–	65,3	–
		–	336,6	–	81,4
ЛПХНд-71	– Суміш №1	270,0	–	74,0	–
		–	335,2	–	83,9

Для вибору компонентів ШС, що забезпечують якість валків і економічну ефективність їх виробництва (зниження витрати легуючих елементів), необхідно:

- підібрати склад легкоплавких ШС;
- вивчити їхні властивості;

- визначити вплив на структуру і якість металу робочого шару валків виконання ЛПХНМД.

При дослідженні ШС, що забезпечують високу рідкотекучість і низьку температуру плавлення, урахували вимоги, пред'явлені до литих валків, матеріалу ливарної форми і її конструкції. Це надало можливість сформулювати вимоги до шлаків:

- температура плавлення повинна бути 850...1000 °С;
- час повного формування шлаків – 20...30 с.

Одночасно вони повинні:

- добре змочувати окисли, що містяться в металі, сприяючи їх видаленню;
- слабо взаємодіяти з поверхнею ливарної форми;
- мати достатню рідкотекучість;
- формувати шлаковий гарнісаж між виливком і поверхнею форми.

Досліджували наступний вихідний матеріал для ШС: датоліт, плавииковий шпат, силікатна брила, поварена сіль, технічна борна кислота, кальцинована сода [28]. Вибір датоліту, як компонента шлакоутворювальної суміші, був обумовлений тим, що він містить  $\text{SiO}_2$  і  $\text{CaO}$ , а також значну кількість окислів бору і має відносно невисоку температуру плавлення. Бор, як відомо, є елементом який модифікує чавун. Склад ШС, що досліджували для модифікування робочого шару валків наведений у табл. 4.9.

Різне співвідношення компонентів було обрано для оцінки ступеня задоволення властивостям, які повинні відповідати вище наведеним вимогам.

Хімічний склад використовуваного датоліту наступний: 34,7 %  $\text{CaO}$ , 34,44 %  $\text{SiO}_2$ , 15,32 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 0,75 %  $\text{MgO}$ , 1,07 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Підготовка шихтових матеріалів для шлакових сумішей – це просушка компонентів, їх здрібнювання до розмірів зерна не більш 2 мм, при ретельному перемішуванні. ШС сплавляли в корундових тиглях електропечі, після чого на спеціальній установці визначали їхню в'язкість (рис. 4.9,а,б) і температуру плавлення (рис. 4.10,а,б) [30].

Таблиця 4.9 – Досліджуваний складу шлакових сумішей

№ п/п	Склад з'єднань ШС, %										Домішки
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	3,03	44,21	6,2	20,58	15,3	-	-	-	-	5
2	1,6	21,45	23,5	18	20	15,3	-	-	-	-	-
3	11,76	2,11	24,2	10	22,32	12,54	8,27	-	-	-	6
4	13	3,5	26	5,8	22	13	8	-	-	0,7	6
5	-	2,57	32,6	9,21	17,98	22,95	11,34	-	сліди	3	-
6	1,5	14	43,27	16,9	6	10	-	1,5	-	0,2	-
7	0,73	14	44	15,2	4	8,8	-	4,8	-	7	-
8	-	21	35	19,7	6	15,6	-	1,5	-	0,4	-
9	-	25,31	32,28	27,74	0,38	8,41	-	-	1,79	1	4,86
10	1,5	20	35	16,5	4	8	-	1,02	-	0,1	-

Аналізовані шлаки відрізнялися вмістом і часткою вихідних матеріалів:

плавикового шпату – від 30 до 60 %, технічною борною кислотою – від 20 до 50 %, кальцинованою содою – від 5 до 50 % і датолітом – від 30 до 60 %.

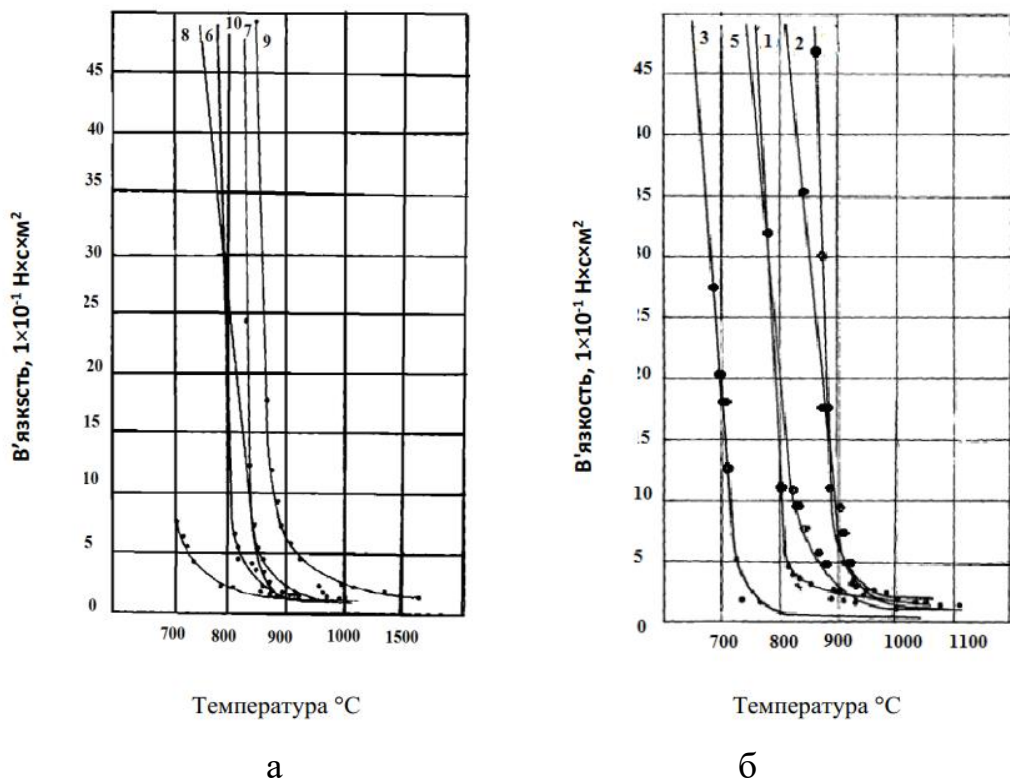


Рисунок 4.9 - Залежність в'язкості шлаків від температури (цифрами позначені композиції шлакових сумішей, які наведені в табл. 4.9)

Для зниження температури плавлення та підвищення рідкотекучості до складу шлаків вводили компоненти, що містять Na. Кращі результати були отримано при використанні 7...15 % повареної солі.

Дослідження показали, що температура плавлення ( $T_{пл}$ ) аналізованих ШС становила, в основному, 945...975 °С, шлаки 3 і 5 мали  $T_{пл} = 830...850$  °С, а шлаки 9 – 1050 °С. В'язкість шлаків при  $T_{пл}$  становила 0,8...5 Пуаз.

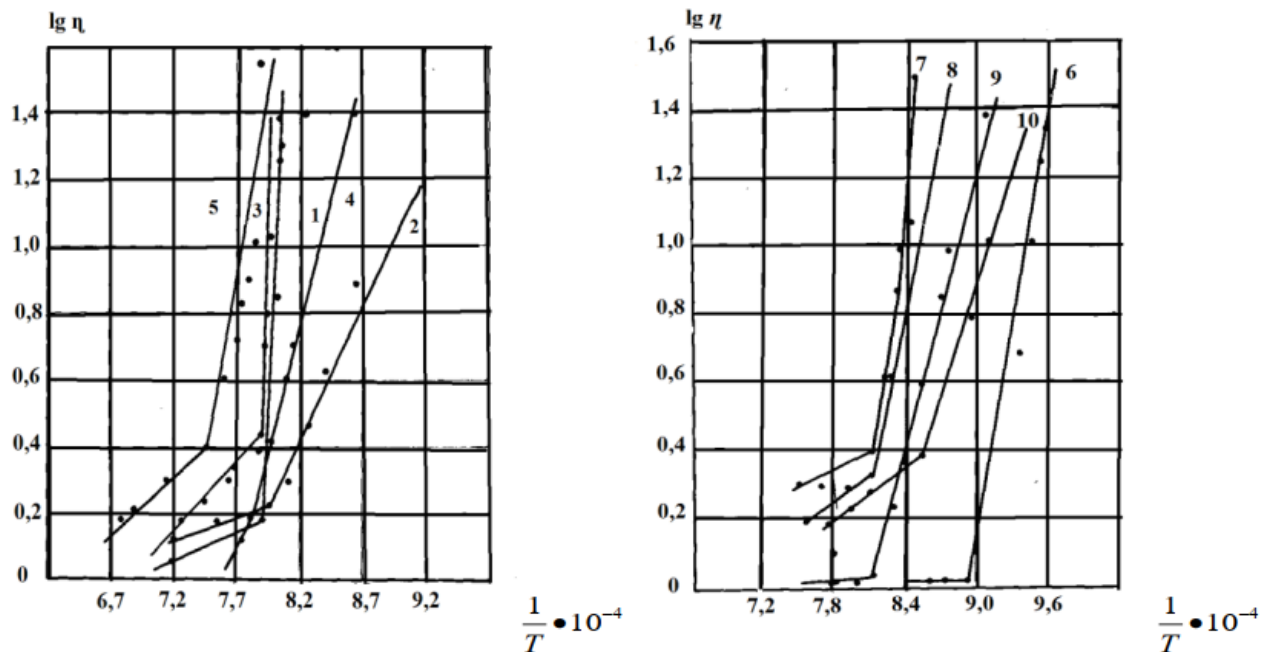


Рисунок 4.10 - Напівлогарифмічна залежність в'язкості шлаків від температури (цифрами позначені композиції шлакових сумішей, які наведені в табл. 4.9)

Вплив  $T_{пл}$  шлаку на утворення його твердої скоринки на поверхні чавуну досліджували методом математичного моделювання.

За теплообміном на поверхні шлаків верхній його шар втрачає теплоту випромінюванням і підігрівається з боку зіткнення з металом. Якщо температура поверхні шлаків вище  $T_{пл}$  тверда скоринка не утворюється.

За математичним моделюванням методом кінцевих різниць припускали, що шлаки перебувають в рідкому стані і конвективні потоки в ньому відсутні, а температура металу залишається постійною, теплота з поверхні губиться тільки випромінюванням. При цьому, початкова

температура шлаків відповідала рідкому чавуну. Теплофізичні константи шлаків постійні при зміні його температури.

Коефіцієнт теплопровідності шлаків прийняли рівним  $0,64 \text{ Вт/м}\times\text{К}$ , теплоємність –  $0,23 \text{ Дж/кг}\times\text{К}$ , початкова температура металу –  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , питома вага шлаків  $22000 \text{ Н/м}^3$ , товщина шару шлаків –  $20\text{мм}$ .

Крива охолодження поверхневого шару шлаків представлений на рис. 4.11, а розподіл температури в ньому для різних моментів часу – на рис. 4.12. Як видно з наведених даних, за термін часу, що дорівнює періоду заливання металу валка ( $\approx 2 \text{ хв}$ ), поверхня шлаків остигає до температури нижче  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

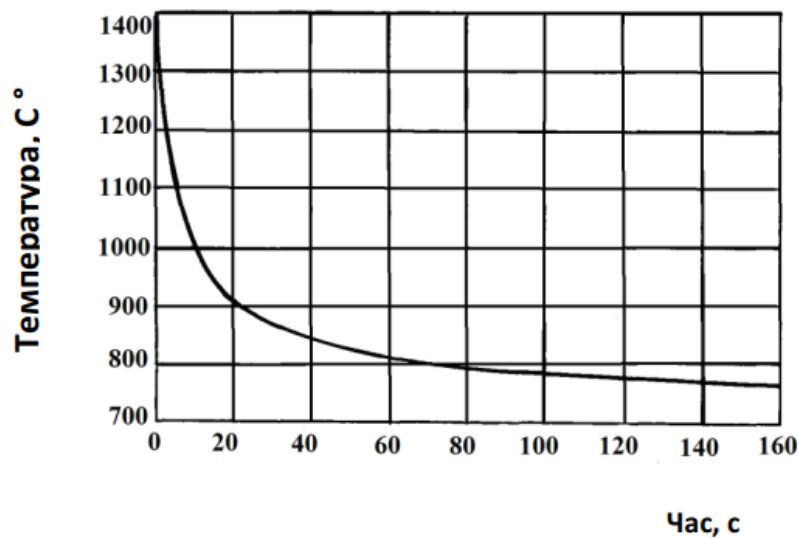


Рисунок 4.11 - Крива охолодження поверхневого шлаку



Рисунок 4.12 - Розподіл температури в шарі шлаків для різних моментів часу.

Для обробки чавуну застосовували легкоплавку суміш, що відрізняється, від звичайної, підвищеним вмістом бору й кальцію (табл. 4.10) [27]

Таблиця 4.10 – Хімічний склад досліджуваної шлакової суміші

Номер проби	Масова частка елементів, %					
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	37,8	28,1	1,02	3,2	9,0	4,95
2	35,6	25,8	0,80	2,5	10,4	5,8

При проведенні дослідних плавок сірого чавуну, що використовується для серцевини валків – ШС присаджували як у піч, так і в ківш ( залежно від температури плавлення шлакової суміші) перед випуском металу з вагранки в кількості з розрахунку одержання вмісту бору 0,013-0,022 %. За такого його вмісту забезпечувалося найбільше підвищення міцності нових властивостей металу.

Механічні властивості досліджуваного чавуну до й після обробки шлаковою сумішшю наведені в табл. 4.11.

Аналіз таблиці показує, що твердість чавуну після обробки шлаковою сумішшю склала 222-242 НВ. Межа міцності досягла 321-346 МПа. До обробки ці властивості не перевищували 200-215 НВ і Б<sub>В</sub>=283-312 МПа.

Таблиця 4.11 – Механічні властивості сірого чавуну до й після обробки шлаковою сумішшю

Номер проб	Твердість, НВ		Міцність, Б <sub>В</sub> , МПа	
	до обробки сумішшю	після обробки сумішшю	до обробки сумішшю	після обробки сумішшю
1	215	242	312	346
2	208	228	303	334
3	200	222	283	321

Досліджували можливість модифікування шлаками на основі відходів феросплавного виробництва метал для валків із хромонікелевого чавуну. Метал виплавляли в 5-т дуговій печі. Температура чавуну перед

випуском відповідала вимогам заводської технологічної інструкції і становила 1430-1450°C.

Шлакоутворювальні суміші присаджували на дно ковша. Порівняльно суміш вводили і у піч, перед випуском металу. Кількість суміші, що вводилась, спосіб її введення, а також хімічний склад металу наведені в табл. 4.12.

Таблиця 4.12. – Вплив кількості і способу шлакової суміші, що вводиться на хімічний склад металу

Умовний номер плавки	Загальна кількість суміші, % від маси металу	Відсоток суміші, що вводиться, у піч, кг/т	Вміст елементів, *%						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,7	0	3,4 –	0,74 0,74	0,56 0,56	0,159 0,149	0,069 0,052	0,64 0,64	0,85 0,85
2	0,7	0	2,68 2,70	0,86 0,87	0,44 0,50	0,230 0,180	0,089 0,080	0,74 0,89	1,13 0,91
3	1,0	0,50	3,40 3,42	0,44 0,89	0,52 0,84	0,260 0,164	0,091 0,080	0,79 0,79	1,29 1,38
4	1,0	0,70	3,36 3,52	0,51 1,25	0,41 1,09	0,220 0,191	0,082 0,082	0,77 0,74	0,81 0,78
5	1,0	0,70	3,42 3,44	0,54 1,02	0,31 0,98	0,140 0,137	0,069 0,060	0,83 0,98	1,74 2,02

\*Примітка: чисельник – до обробки, знаменник – після обробки

Для відбору проб шлаків плавку випускали в ківш зі шлакоутворювальною сумішшю трьома порціями із зупинками 1,5-2 хв. Динаміка зміни складу шлаків наведена в табл. 4.13.

З наведених даних видно, що зі збільшенням присадки шлакової суміші, що вводиться до 1,0% від маси металу, стабільно підвищується частка вуглецю, кремнію, марганцю, помітна тенденція до підвищення і легуючих елементів хрому та нікелю. Одночасно знижується вміст шкідливих домішок – P і S.



Таблиця 4.13 – Склад шлаків у пробах, що були відібрани по ходу випуску металу з печі

№ проби	Ca	SiO <sub>2</sub>	MnO	CaF <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	20,13	30,48	3,00	21,33	3,72	8,06	0,01	0,2
2	17,88	38,26	4,01	24,46	3,72	2,05	0,02	0,3
3	17,32	40,36	5,01	25,24	3,41	0,50	0,50	0,4

Механічні властивості та структуру металу досліджували на зразках, вирізаних з торців бочок валків (табл. 4.14). У якості контрольних, використовували валки поточного виробництва. Для зіставлення якості металу однієї плавки до й після обробки шлаками заливали спеціальні проби, з яких потім вирізали зразки для механічних випробувань (табл. 4.15).

Таблиця 4.14 – Механічні властивості чавуну валків виконання СПХН-49, оброблених шлаками

Розмір бочки валка, мм	Міцність, МПа			Твердість (НВ) на глибині від поверхні бочки, мм				Відносне зношування, %
	Бв	Бвиг	Бст	20	30	40	50	
450×1250	302	300	2250	363	363	341	315	0,70*)/0,50**)
430×800	263	275	1510	–	–	–	–	0,492**)

Примітка:\*) до обробки; \*\*) після обробки

Таблиця 4.15 – Механічні властивості чавуну до і після обробки шлаками

Умовний номер плавки	Час відбору проби	Міцність, МПа			Твердість, НВ
		Бв	Бвиг	Бст	
1	До і після обробки	270	295	1960	488
		зразок	295	2300	520
2	До і після обробки	136	270	–	555
		194	280	1960	488

Встановлено, що обробка металу запропонованою шлакоутворювальною сумішшю сприяє утворенню компактної форми графіту (у шлаках вміст магнію становить 3,0-3,5 %) і зменшенню його розмірів, підвищенню дисперсності структурних складових. Завдяки цьому

одночасно підвищилася міцність і твердість чавуну в зразках від технологічних проб.

#### **4.5. Відновлення й виробництво валків електрошлаковим наплавленням**

Відносно низька вартість литих чавунних валків і складність їх відновлення наплавленням є причиною того, що цей процес не одержав широкого поширення.

В ІЕЗ ім. Е.О.Патона була розроблена технологія електрошлакового наплавлення дробом (ЕШН) сталевих (з високим змістом вуглецю) і чавунних валків гарячої і холодної прокатки з одержанням робочого шару з вибіленого чавуну, легованою або швидкорізальною сталями.

Сутність електрошлакового процесу полягає у використанні тепла, що виділяється при проходженні електричного струму через електропровідний флюс. У результаті цього флюс розплавляється і перегрівається, перетворюючись у джерело тепла у вигляді шлакової ванни, нагрітої до більш високих температур, ніж метал. При ЕШН метал надходить у рідку шлакову ванну, яка є не тільки джерелом тепла, але і середовищем, що рафінує. Ефективність процесу залежить, в основному, від складу та властивостей використовуваних шлаків.

Якість рафінуючої дії шлакової ванни визначається рівномірністю тепловиділення і теплорозподілу по всьому обсягу. Шлакова ванна перебуває в безперервному русі щодо металу завдяки конвективним потокам, внаслідок чого нагрівання металу відбувається з великою швидкістю. Завдяки високій здатності шлаків до рафінування, знижується вміст шкідливих домішок, неметалічних включень і газів, що забезпечує одержання високоякісного металу відновленого шару.

Перед наплавленням валок нагрівають у вертикальній печі до температури 600- 650 °С зі швидкістю не більш 50 °С/год. Наплавлення бочки валка здійснюють до 1,01-1,015 її номінального діаметра шляхом

електрошлакового наплавлення в рухливому кристалізаторі із заливанням рідкого шлаку, плавленням наплавочного матеріалу у ванні при переміщенні, відносно вертикально встановленого валка. Термічну обробку після наплавлення здійснюють встановленням його в попередньо нагріту до 600...650 °C піч з наступним його охолодженням до температури 100...150 °C зі швидкістю не більш 50 °C/год. Заключна механічна обробка включає токарну до номінального діаметра бочки з плюсовим допуском і наступне шліфування. Електрошлакове наплавлення здійснюють при температурі валка не нижче 350 °C [29].

Перед електрошлаковим наплавленням серцевину і труби-електроди підігрівали за допомогою індуктора струмами промислової частоти. Такий підігрів необхідний для забезпечення надійного зварювання серцевини з робочим шаром і запобігання розтріскування труб - електродів на початку процесу.

Наплавлення робили за допомогою рухливого кристалізатора. При наведенні шлакової ванни використовували флюс АНФ-14, що містить 63,4 %  $\text{CaF}_2$ , 14,9 %  $\text{SO}_2$ , 2,63 %  $\text{CaO}$ , 5,65 %  $\text{MgO}$ , 12,04 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Температура плавлення флюсу – 1100 °C. При цьому, необхідна в'язкість досягалася в інтервалі робочих температур (1200-1600 °C).

Оптимальний електричний режим наплавлення валків: сила струму 5-6 кА, напруга 37-40 В.

Ультразвуковий контроль після попередньої механічної обробки валків показав гарну якість сплавної робочого шару і серцевини.

Якісні двошарові валки із зовнішнім діаметром бочки до 300 мм, за існуючих умовах електрошлакового наплавлення, вдається одержати тільки за використання сталеві серцевини. Неможливість наплавлення робочого шару на чавунні валки пояснюється більшим тепловкладенням процесу ЕШН і відсутністю додаткового охолодження серцевини, що приводить до її перегріву, надмірно глибокого проплавлення і втраті міцності. Сталеві серцевини також сильно прогриваються (до 950-1000 °C) до кінця процесу,

однак, у зв'язку з більш високою східною температурою плавлення сталі, необхідна їхня міцність зберігається.

Електрошлакове наплавлення є найбільш перспективним способом відновлення і зміцнення валків. Її можна також застосовувати при виготовленні двошарових валків. Але слід зазначити, що при широкому використанні цього способу потрібне додаткове вивчення особливостей структуроутворення і якості робочого шару таких валків з розробкою методів їх не руйнуючого контролю.

Для запобігання утворення тріщин застосовують різні схеми накладення швів. Дефекти в чавунних валках заварюють кремнійхромистими електродами (0,5 % С, 0,3 % Мn, 2,9 % Si, 8,0 % Cr), які забезпечують твердість наплавленого металу, близьку до твердості чавуну.

Технологія такого електрошлакового наплавлення сталевих і чавунних прокатних валків була вперше випробувана на Макіївському металургійному комбінаті і проводилася хромистим чавунним дробом фракції 0,5-4,0 мм [30]. У табл. 5. 24 наведені дані хімічного складу дробу і наплавленого металу.

Чавунні сортопрокатні хромонікелеві валки виконань СШХН і СПХН дрібносортного стану 350–2 наплавляли з попереднім підігрівом до 350–400 °С при напрузі  $U=35$  В.

У цей час фахівцями інституту Е.О.Патона розроблено встаткування для електрошлакового наплавлення валків із гладкою бочкою діаметром від 250мм до 900мм.

Таблиця 4.16 Вміст компонентів чавунного дробу і наплавленого шару валка

Матеріал	Хімічний склад, %								
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P
Дріб	2,45	0,65	0,65	20,17	1,35	1,40	0,29	0,048	0,08
Наплавлений шар	2,36	0,67	0,72	19,29	1,47	1,20	0,11	0,015	0,10

Для наплавлення підшару застосовують дроти Св-08, Св-19ХГСА або НП-30ХГСА й флюс АН-348А. Практика показує, що при наплавленні валків

у процесі їх ремонту, виготовлених зі сплавів, що містять  $\geq 0,6 \%$  С, нанесення підшару є обов'язковим.

Зважаючи на те, що відновлення валків виконань ЛПХНМд-71 і ЛПХНМд-73 вимагає нанесення підшару, вивчали використання для нього сталей 45 і 35ХГСА, відлитої методом ЕШП з наступним нанесенням чавунного покриття (робочого шару).

Для вивчення неметалічних включень вибрали модельну сталь 35ХГСА, відлиту методом електрошлакового переплаву для відновлювального наплавлення (рис. 4.13).

Це дозволило встановити, що сульфіди (Mn, Fe) S мають біпірамідальну, рідше дендритовидну і булавовидну форми. Розміри біпірамідальних включень перебувають у межах: довжина від 8-15 до 40 і ширина від 3-5 до 20 мкм. У відбитому світлі включення сульфідів непрозорі і лише зрідка просвічують зеленувато-коричневим кольором. Еліпсоїдні кремнеземові включення, виявлені в сталі 35ХГСА, відлитої методом електрошлакового переплаву, мають розміри від 20-30 до 60 мкм. У такій сталі виявлено досить багато включень екзогенного кварцу. Їхні розміри – від 8 до 25 мкм.

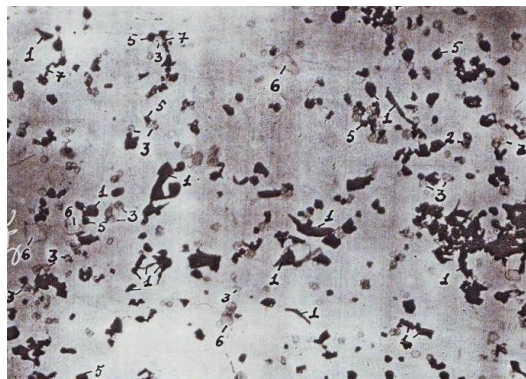


Рисунок 4.13 - Електролітично виділені неметалічні включення у відлитої методом ЕШП сталі 35ХГСА, ( у минаючому світлі, імерсія,  $N=1,600$  ) ;  
 $\times 200$ :

1- сульфіди; 2-агрегатні скупчення зерен корунду і шпінелей; 3-окремі ізольовані зерна корунду і шпінелей; 4- кремнеземні включення; 5- нітриди титану; 6-включення кварцу; 7-включення карбідів

Ендогенні оксидні включення представлені зернами корунду ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) і кристалітами шпінелей, серед яких виявлені галаксит ( $\text{MnAl}_2\text{O}_4$ ) і глиноземна шпінель ( $\text{Fe Al}_2\text{O}_4$ ).

Загальна кількість виявлених включень у сталі, що була отримана методом електрошлакового переплаву в 1,5-1,8 рази менше, ніж в аналогічній сталі без переплаву, що рафінує.

Мінеральний склад ендогенних оксидних фаз практично однаковий, це – корунд і шпінелі. Однак, у звичайній сталі спостерігаються переважно скупчення таких включень, а в сталі, відливої методом електрошлакового переплаву зустрічаються лише - окремі розрізнені.

Проведені дослідження з відновленого електрошлакового наплавлення валків з низьколегованого хромомолібденового чавуну на сталь 45 показали, що мікроструктура підшару являла собою феріто-перлітну суміш. При цьому, перліт відрізнявся різним ступенем дисперсності – від сильно розрідженого до трооститу (рис. 4.14).

Зона термічного впливу основи неоднорідна і змінюється в межах 20-30 мкм. Вона також характеризується наявністю зерен перліту різного ступеня дисперсності. Ферітна складова в ній не перевищує 1-2 % (рис. 4.18). Перехідна зона відновленого валка являла собою структуру трооститу, мартенситу і цементиту (рис. 4.15).

У зоні ЕШП структура також неоднорідна. Вона представлена цементитом, трооститом, бейнитом і мартенситом (рис. 4.16).

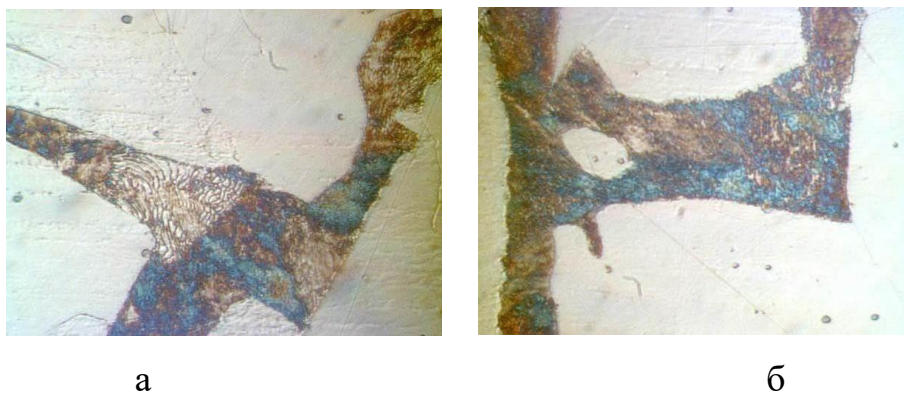
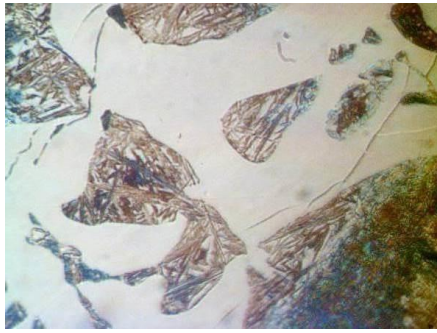
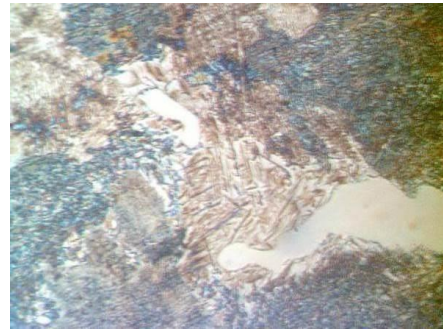


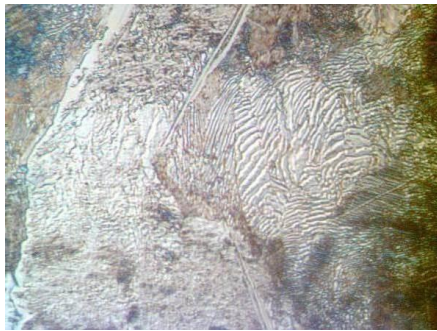
Рисунок 4.14 - Ділянки розрідженого перліту (а) і трооститу (б) у перехідному шарі сталі 45,  $\times 1000$



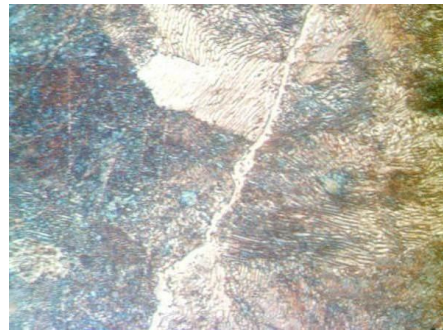
а



б



в

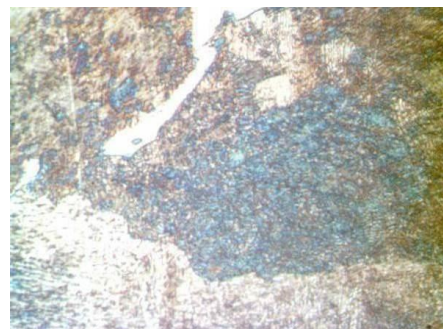


г

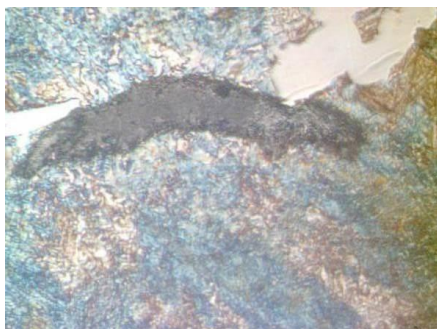
Рисунок 4.15 - Мікроструктура перехідної (а) і зони термічного впливу(б-г) при електрошлаковому наплавленні з підшаром зі сталі 45,  $\times 1000$



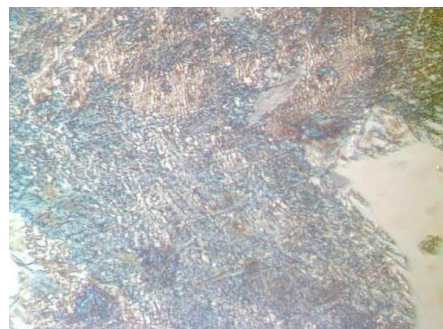
а



б



в



г

Рисунок 4.16 - Мікроструктура в зоні електрошлакового наплавлення чавуну з ділянками цементиту (а), мартенситу (б), трооститу й бейніту (в), з окремими сульфідними включеннями (г),  $\times 1000$ . Травлення 4%-вим розчином  $\text{HNO}_3$  в етиловому спирті

Виявлена наявність тріщин при ЕШН (переважно по цементиту (рис. 4.16 а), імовірно, пов'язана з недостатнім підігрівом вихідної заготовки і швидким охолодженням після наплавлення, а пороутворення – з окисненням металу, що наноситься.

Аналізом мікроструктур, що отримані у вторинних електронах (рис. 4.17 – 4.19) виявлена наявність окислів (темні включення) у зонах наплавлення і термічного впливу. Це підтверджено і локальним спектральним аналізом. Крім того, у карбідній фазі формуються пори (рис. 4.17) і тріщини (рис. 4.19). Одночасно, мікротріщини у зоні термічного впливу, а також в основному металі (рис. 4.17).

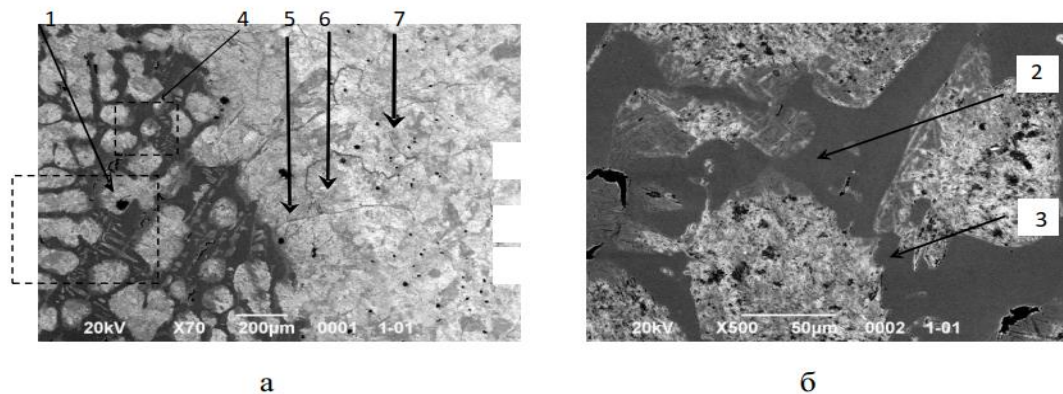


Рисунок 4.17 - Мікроструктура наплавленого шару, перехідної зони і – термічного впливу у вторинних електронах  
а – загальний знімок; б – наплавлений хромонікелевий чавун. Травлення 4 % - вим розчином  $\text{HNO}_3$  в етиловому спирті, а $\times 100$ , б $\times 1000$

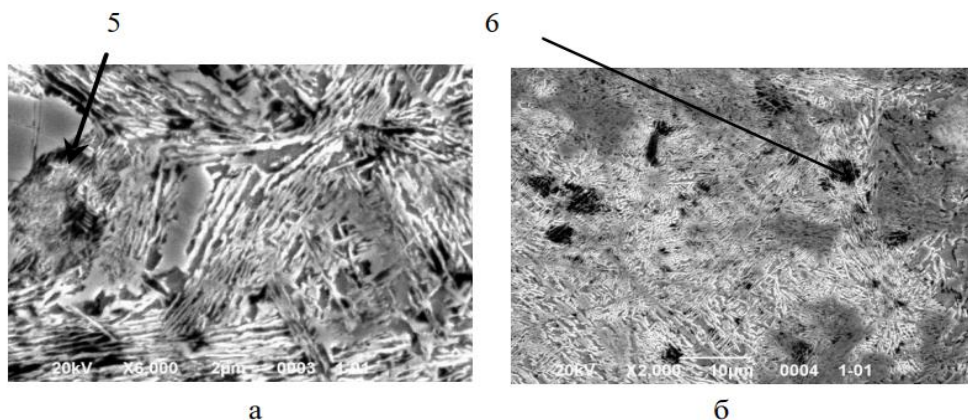


Рисунок 4.18 - Мікроструктура перехідної зони у вторинних електронах  
а – поруч із наплавленим шаром (зона 5); б – ближче до основи сталі 45 (зона 6). Травлення 4 % - ним розчином  $\text{HNO}_3$  в етиловому спирті, а $\times 1000$



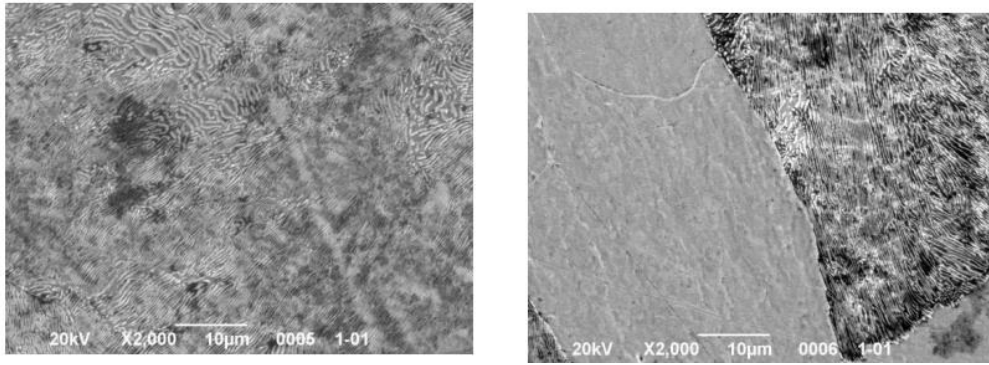


Рисунок 4.19 - Мікроструктура зони термічного впливу у вторинних електронах (поруч із перехідною зоною)

Виконаний аналіз показує, що в якості підшару для відновлення робочого шару валків різних виконань можливо використовувати сталь 35ХГСА або сталь 45, але потрібні додаткові дослідження для розробки параметрів попереднього підігріву і електрошлакового наплавлення, які б забезпечили мінімізацію пороутворення, підвищену зчепність із перехідним шаром і відсутність дефектів на границі розділу.

### Висновки за розділом

1. Хромонікелеві валки стаціонарного і відцентрового виливка відрізняються за хімічним складом і структурою.

Мікроструктура чавуну сортопрокатних валків стаціонарного виливка складається з перліту, цементиту, графіту і перліто - карбідної евтектики.

2. Для забезпечення необхідного рівня властивостей при виробництві валків ураховується співвідношення нікелю до хрому. У якості матеріалу робочого шару валків використовується хромонікелевий чавун у якого співвідношення може перебувати в межах: 4,2-5,33; 3,95-4,0 і 2,2-3,0.

3. Для підвищення наробітку валків вивчена можливість їх відновлення електрошлаковим наплавленням. Такі роботи успішно проводили в Японії, Австрії, Італії та ІЕС ім.Е.О. Патона.

Для здійснення такої технології розроблено спеціальне устаткування і технологічний процес.

## 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 5.1 Охорона праці

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Одним із головних напрямків державної політики у сфері охорони праці є забезпечення:

- конституційного права кожного працівника на здорові й безпечні умови праці, створення ефективної системи запобігання нещасним випадкам на виробництві і виникненню професійних захворювань;

- зменшення економічних втрат в результаті виробничого травматизму, аварій, професійних захворювань та надзвичайних ситуацій, внаслідок яких виробництво втрачає професійно підготовлені кадри, несе матеріальні збитки від втраченого або зруйнованого обладнання;

- створення умов, направлених на збереження життя і здоров'я працівників в процесі їх виробничої діяльності.

Виявляються небезпечні і шкідливі виробничі фактори, які діють на працівників під час виконання монтажних, складальних та калібрувальних робіт, опрацьовуються заходи щодо приведення робочих місць у відповідність до вимог законодавства України про Охорону праці та вимог нормативно-правових актів з охорони праці.

### 5.2 Аналіз умов праці

#### 5.2.1. Організація робочого місця.

Роботи по покращенню технологічних властивостей зносостійкості прокатних валків з хромонікелевого чавуну проводились в ливарному цеху (рис. 5.1).

Об'єм приміщення цеху дорівнює 1872 м<sup>3</sup>, площа 312 м<sup>2</sup>, висота 6 м.

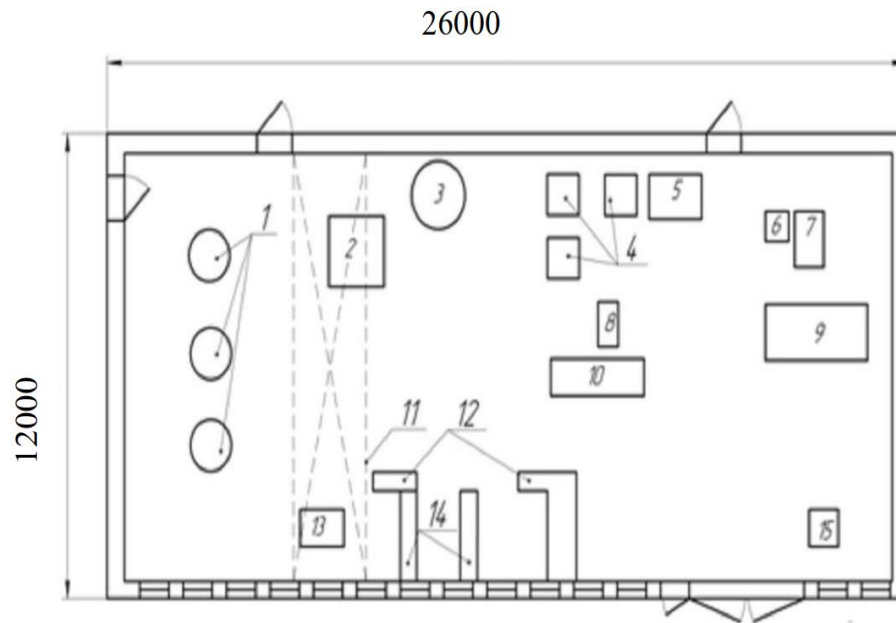


Рисунок 5.1 – План ливарного цеху з технологічним устаткуванням  
 1 – індукційні печі; 2 – сушило; 3 – котковий змішувач; 4 – формувальні машини; 5 – машина відцентрового литва; 6, 7 – печі опору; 8 – шліфувальний станок;  
 9 – стелаж; 10 – стіл; 11 – кран-балка; 12 – шафи; 13 – установка ЕШП; 14 – столи; 15 – контейнер для сміття.

При проведенні робіт використовується наступне обладнання: піч індукційна тигельна ІСТ-006; сушило для сушіння форм; котковий змішувач; болгарка, шліфувальний станок, мікроскоп МИМ-8, твердоміри ТШ-2М та ТК-2, цифрова фотокамера «SonyDSC-W320».

В цеху знаходиться 3 робочих місця.

– площа на одного працівника  $S=624 \text{ м}^2$ ;

– об'єм на одного працівника  $V=104 \text{ м}^3$ .

Згідно з СН 245-71 висота цеху повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа приміщення на кожного працівника  $15 \text{ м}^3$  та  $4,5 \text{ м}^2$  відповідно.

Таким чином, розміри приміщення по відношенню до кількості працюючих в ньому людей повністю відповідають вимогам СН 245-71.

Згідно ГОСТ 12.0.003-74 на працівників ливарного цеху діють наступні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

Фізичні:

– підвищений рівень вібрації;

- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- підвищене значення електричного струму.

Хімічні:

- подразнюючі, що проникають в організм людини через органи дихання.
- пари, що утворюються при плавленні та легуванні чавуну.

Згідно Постанови КМУ роботи, які виконуються при ремонті валків з хромонікелевого чавуну та обладнання, яке використовується при виконанні цих робіт не відносяться до переліку робіт та обладнання підвищеної небезпеки, на які необхідно отримувати Дозвіл Держгірпромнагляду України.

Згідно з НПАОП 0.00-2.24-05 та НПАОП 0.00-4.12-05 до переліку робіт з підвищеною небезпекою відносять плавильні, заливальні роботи та роботи при сушінні форм.

### *5.2.2 Мікроклімат в приміщенні*

Санітарно-гігієнічне нормування умов мікроклімату здійснюється згідно з ДСН 3.3.6.042-99, які встановлюють оптимальні і допустимі параметри мікроклімату з урахуванням важкості виконуваної роботи та періоду року (теплого та холодного).

Допустимі мікрокліматичні умови – поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину можуть викликати зміни теплового стану організму, що швидко минають і нормалізуються та супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції в межах фізіологічної адаптації. При цьому не виникає ушкоджень або порушень стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності.

Згідно з ДСН 3.3.6.042 – 99, лабораторія, в якій виконуються роботи, відноситься до категорії робіт 1б легка (роботи, які виконуються сидячі, стоячи або пов'язані з ходьбою із застосуванням деякого фізичного напруження) – енерговитрати складають 121...150 кКал/год (141...175Вт).

Параметри мікроклімату в робочій зоні приміщення лабораторії для постійного робочого місця – місця на якому людина знаходиться більшу частину свого робочого часу (більше 50 мас. %, або більше 2 годин безперервно)

Теплий період року – із середньодобовою температурою зовнішнього повітря більше 10 °С. Холодний – відповідно менше 10 °С. Показники приймаються по даним метеорологічної служби (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Допустимі та фактичні величини температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Температура повітря, °С	Відносна вологість, мас. %	Швидкість руху, м/с		Період року		Категорія робіт		Опалення	Вентиляція
		факт.	допуст.	факт.	допуст.	факт.	допуст.		
Холодний	Легкі роботи 1б	18	17...25	50	<75	0,2	<0,2	Водяне	Витяжна вентиляція

### 5.2.3 Загазованість та запиленість лабораторії

Важливе значення для нормальної життєдіяльності людини має чисте повітря певного хімічного складу (кисень 20,95 мас.%, азот 78,08 мас.%, інертні гази 0,94 мас.% - по об'єму) і яке має оптимальні параметри мікроклімату.

Гранично допустима концентрація (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони це така концентрація, яка при щоденній (окрім вихідних днів) роботі протягом 8 годин або іншому терміну дії, але не більше як 41 година на тиждень, не призводить до зниження працездатності й захворювання в період трудової діяльності та у наступний період життя, а також не чинить несприятливого впливу на здоров'я нащадків.

В лабораторії 009-9 виконувався один технологічний процес (табл. 6.2).

Гранично допустиму концентрацію оксиду алюмінію у повітрі робочої зони визначаємо за ГОСТ 12.1.005-88.

Отже, повітря робочої зони відповідає санітарним нормам, оскільки кількість шкідливих речовин у повітрі не перевищує ГДК. Для додаткового захисту при плавленні алюмінію використовуємо захисні окуляри ОУ-2.

Пари алюмінію негативно впливають на організм людини: мають отруйну дію та можуть залишатись в організмі людини, впливаючи на загальний стан здоров'я, пари можуть легко потрапляти у легені й затримуватися там на довгий час.

Таблиця 5.2 – Загазованість та запиленість лабораторії

№ п.п.	Технологічний процес	Найменування інгредієнту	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Фактична концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Агрегатний стан
1	Плавлення Al	Оксид Al (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2	1	Аерозоль

#### 5.2.4. Вентиляція

Основне завдання вентиляції – вилучити з приміщення забруднене або нагріте повітря та подати свіже, тобто забезпечити в приміщеннях метеорологічні умови, що відповідають нормативним вимогам, а також виключити можливість вмісту в повітрі шкідливих речовин, які перевищують гранично допустимі концентрації.

#### 5.2.5. Електробезпека

Згідно із діючими правилами використання електрообладнання за ГОСТ 12.1.030-78 приміщення лабораторій з точки зору безпеки ураження людини електричним струмом відносяться до приміщення з підвищеною небезпечністю ураження електричним струмом: в результаті короткого замикання, іскріння, ушкодження ізоляції, одночасного доторкання до металевих заземлюючих предметів і корпусів електроустановок.

Причинами ураження електричним струмом можуть бути:

– доторкання до частин електроустановок, що випадково знаходяться під струмом внаслідок замикання фази на корпус, ушкодження ізоляції або іншої несправності.

– потрапляння під напругу під час проведення ремонтних робіт на вимкненому обладнанні за причиною помилкового включення або з причини недотримання часу, необхідного для зняття електричних зарядів з високовольтних шин, розрядки конденсаторів.

Вплив електричного струму на організм може мати небезпечні для здоров'я людини наслідки і навіть привести до смерті. Ймовірність смертельного випадку при поразці електричним струмом вища, ніж при інших причинах травматизму. Розглянемо зміни небезпечності впливу на людину струму залежно від значень його сили:

– безпечний струм – у середньому дорівнює 50...75 мкА при перемінному струмі і 100...125 мкА при постійному струмі (цей струм навіть при тривалому проходженні через тіло людини не завдає йому шкоди);

– граничний (відчутний) струм – до 1,6 мА при перемінному струмі і до 6 мА при постійному струмі (негативний вплив обмежується при перемінному струмі слабкою сверблячкою і легким пощипуванням, а при постійному струмі – відчуттям нагрівання шкіри на ділянці, що торкається струмопровідної частини);

– утримуючий струм – понад 10 мА при перемінному струмі (у результаті судорожних скорочень м'язів людина не в змозі розтиснути руки і звільнитися від струмопровідних частин самостійно. Для постійного струму поняття утримуючого струму немає, людина завжди може звільнитися від струмопровідних частин, але при струмі 50...80 мА виникає дуже сильний біль у м'язах);

– фібриляційний струм – понад 50 мА при перемінному струмі відбувається зупинка серця через 1..3 с після замикання ланцюга;

– смертельний струм – понад 5 А, викликає негайну зупинку серця. У випадку короткочасного впливу протягом 1...2 с можливе поновлення роботи серця.

Небезпека ураження електричним струмом збільшується при невиконанні правил експлуатації електрообладнання, термінів ремонту

обладнання. Дія електричного струму може викликати опіки, механічні ушкодження організму людини.

Усі струмопровідні частини електроустановок ізольовані, що забезпечує технічну працездатність електроустановок, зменшує вірогідність попадань людини під напругу, замикань на землю і на корпус електроустановок. Корпуси електроустановок, які працюють у приміщенні з'єднані з землею за допомогою струмопроводів малого опору – шунта, що забезпечує захисне заземлення, за рахунок паралельно можливого включенню людини в мережу замикання на землю струмопровід малого опору (шунт), внаслідок чого зменшується струм, що проходить через людину. Крім того, захисне заземлення зменшує напругу.

Кожний рік проводиться перевірка опорів і захисту електрообладнання, обов'язкова перевірка ізоляції дротів.

Згідно з „Правилами обладнання електрообладнання” допустимий опір заземлювального пристрою, для устаткування напругою до 1000 В і потужністю 100 кВт дорівнює 4 Ом. Довжина заземлювача 3 м, ширина 40 мм, відстань від поверхні до заземлювача 0,6 м. 4.10 Пожежна безпека Виникнення пожеж в лабораторії можливе за такими причинами:

- порушення правил протипожежної безпеки;
- несправність електроустаткування;
- необережне поводження з вогнем;
- ремонт устаткування на ходу;
- конструктивні недоліки устаткування;
- неправильне користування устаткуванням.

Для запобігання пожеж необхідно чітко дотримуватись правил протипожежної безпеки.

### **5.3 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях**

#### *5.3.1. Пожежна безпека*

Згідно з НАПБ Б.07.005-86 приміщення, у яких виконуються зварювальні роботи, за вимогами вибухопожежної небезпеки належить до



категорії Г (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розжареному, розплавленому станах, процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор та полум'я; горючі газу, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива ).

Згідно з ДНАОП 0.00-1.21-98 [102] та ДНАОП 0.00-1.32-01 [103] у приміщенні виділяється зона II-Па, де обертаються тверді горючі речовини. Категорія за БЕМЗ (безпечний експериментальний зазор між фланцями оболонки, мм) – ПА ( $> 0,9$  мм). Група вибухобезпеки сумішей (за температурою самозапалювання) – ТІ (ТС) В  $> 450$  °С. Ступінь вогнестійкості будівлі – І (не допускається поширення вогню на основні будівельні конструкції), мінімально допустиме обмеження вогнестійкості – 2,5 год, максимально допустиме обмеження поширення вогню для внутрішніх стін – 25 см.

При класі пожежі Е, що пов'язані з електроустановками, використовують такі вогнегасні засоби як CO<sub>2</sub> та галоїдовуглеводні.

Пожежна безпека (ГОСТ 12.1.004-85) забезпечується:

- запобігання спалаху ізоляції при КЗ за рахунок максимального ступеневого захисту;

- запобігання утворення горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеженням застосування і зберігання горючих і вибухонебезпечних речовин;

- застосування пожежної сигналізації з датчиком (ИДФ-І, ДПД і др.);

- використанням вогнегасників (клас пожежі В): ОХП-10, ОХВП-10, ОВП-7, ОХ-7, ОП-10А; для класу пожежі Е вогнегасники типу УО, ОП-10А (вибрати тип і кількість відповідно до НАПБ Б.07.005-86).

При організації технологічного процесу дотримуються усіх вимог електростатичної іскробезпеки (ГОСТ 12.1.018-79).

Передбачається також аварійне зливання пожежонебезпечних рідин, аварійне втручання горючих газів із апаратури.

Рекомендована періодична очистка робочого місця цеху, апаратури від горючих відходів, відкладання пилу, вилучення пожежонебезпечних відходів виробництва, заміна ЛВЖ і ГЖ на пожежонебезпечні технічні миючі засоби.

Передбачено пристрої, які забезпечують обмеження поширення пожежі (описати конкретно).

Приміщення обладнується засобами колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі та проти димного захисту.

### *5.3.2. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях*

У випадку пробою електричної напруги на корпус зварювального агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника дільниці.

У випадку потрапляння кого небудь під напругу, необхідно відключити зварювальний агрегат від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити постраждалому штучне дихання.

У випадку загорання зварювального агрегата необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника .

Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

- негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за телефоном 101;
- приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на дільниці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо);
- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, дільниці).

У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника дільниці та звернутися в медпункт.

## 6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ

Виконані в роботі дослідження були спрямовані на створення ефективних і менш витратних технологій виробництва валків з хромонікелевого чавуну, що забезпечують підвищення їх працездатності в процесі експлуатації.

До виконаних розробок належать: дослідження з оптимізації хімічного складу, введення мікролегуючих і модифікуючих домішок, а також коректування технологічних параметрів виробництва (застосування вакуумування, обробки чавуну шлаками, продувка азотом) для оптимізації структури і властивості металу робочого шару валків з такого чавуну. Одночасно вивчали можливість удосконалення способів виливки, контролю якості та використання ефективного способу їх комплектування в експлуатації.

Економічна оцінка включає всі виконані етапи розробок, що забезпечують технічний ефект (енергозбереження, підвищення наробітка, мінімізація виникнення дефектів при експлуатації, зниження витрат на легуючі добавки, підвищення якості металу і зменшення неметалічних включень при литті, зниження рівня напруг і зменшення частки залишкового аустеніт у робочому шарі при виробництві, визначення якості валків методами контролю, що неруйнують вироби, ефективне комплектування валків за рівнем твердості і коерцитивної сили.

Дослідження впливу обробки чавуну шлаками при виробництві валків свідчать про те, що при їхньому виливці з хромонікелевих чавунів підвищується частка кремнію, марганцю, нікелю і знижується вміст шкідливих домішок – сірки та фосфору, що пов'язане з наявністю у використовуваній суміші таких компонентів як кальцій і магній.

Встановлено, що обробка шлаковою сумішшю підвищує міцність сірого чавуну, що використовують для серцевини і шийок валків з 283-312 МПа до 321-346МПа.

Обробка металу шлаковою сумішшю на основі бората кальцію дозволяє знизити концентрацію нікелю з 2,9 % до 2,7 % для виконання ЛПХНд-62 і з 4,1 до 3,51 % для – ЛПХНд-71 і підвищити середню твердість на 16,1 і 9,9 од. НS відповідно.

У роботі особлива увага приділена технологічним параметрам виливки валків. Проведені дослідження з вивчення їх впливу у виливках двошарових валків на їхні експлуатаційні характеристики показали, що підвищення температури металевої форми перед заливанням порції металу робочого шару і його маси, часу витримки кількості модифікаторів нового покоління Superseed® 75( Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant, що вводяться, в оптимальному обсязі, які використовували при обробці рідкого розплаву, сприяють підвищенню твердості та зниженню напруг.

Виявлено, що за одержання двошарових валків розміром 675×1700 мм, що відливаються відцентровим способом для листових станів 1700, є технологічна можливість мінімізувати ливарні напруги та забезпечити розпад залишкового аустеніту без зниження твердості.

Для оцінки цінової складової економічного ефекту від впровадження запропонованих розробок був застосований метод статистичного аналізу експертних оцінок, який виконувався в 4 етапи.

Таблиця 6.1 – Характеристика застосовуваних нових технологічних розв'язків і зміни показників якості прокатних валків

Інноваційні рішення	Характеристика зміни показників стану прокатних валків
1. Удосконалювання хімічного складу валків у рамках традиційної технології	1. Збільшення загального змісту добавок, що модифікують (збільшує вартість валків на 0,25 %) 2. Підвищення експлуатаційної стійкості 22,3 %
2. Вакуумування чавуну	1. Підвищення межі міцності на розрив на 10 % 2. Підвищення межі міцності на вигин на 6 % 3. Підвищення зносостійкості на 10 % 4. Підвищення експлуатаційної стійкості на 10-15 %

3. Продувка чавуну азотом або інертними газами	1. Підвищення твердості на 2-3 од. HS 2. Підвищення експлуатаційної стійкості на 7,7 %
4. Обробка чавуну жужільною сумішшю	1. Зниження концентрації нікелю (валки виконання ЛПХНД-63) на 0,2 % 2. Підвищення твердості (валки виконання ЛПХНД-63) на 16,1 од. HS 3. Підвищення міцності (валки виконання ЛПХНД-63) на 15,5 % 4. Підвищення експлуатаційної стійкості (валки виконання ЛПХНД-63) на 11 % 5. Зниження концентрації нікелю (валки виконання ЛПХНД-71) на 0,59 % 6. Підвищення твердості (валки виконання ЛПХНД-71) на 9,9 од. HS 7. Підвищення міцності (валки виконання ЛПХНД-71) на 17,25 % 8. Підвищення експлуатаційної стійкості (валки виконання ЛПХНД-71) на 19 %
5. Виливок валків у металеві форми, нагріті до температури 190-210 °C	1. Виключається термічна обробка при виробництві листопрокатних валків 2. Знижується брак листів (зменшується відмінотовщинність) у споживача на 5-7 % 3. Зменшуються витрати на механічну обробку при нарізці калібрів на сортопрокатних валках на 3-5 %
6. Комплектування валків за рівнем коерцитивної сили	1. Підвищення експлуатаційної стійкості валків ЛПХНМдц-71 (стан 2000) на 17,3 % 2. Підвищення експлуатаційної стійкості валків ЛПХНМдц-71 (стан 1700) на 7.98 %

На першому етапі проводили вибір оціночних показників конкурентоспроможності запропонованих інноваційних рішень.

Другий етап полягав у зборі інформації з підприємств.

Виконання експертної оцінки стало третім етапом статистичного аналізу.

На четвертому етапі був виконаний аналіз результатів розрахунків (табл. 6.3).

Надалі на підставі визначення цифрового еквівалента одного відсотка позитивної оцінки значимості властивостей у підвищенні базової значимості 1 т розрахункові величини (табл. 6.3), які при зіставленні з показниками витрат на виробництво продукції дозволили визначити ефективність від інноваційних технологій виробництва прокатних валків.

Таблиця 6.2. – Результати експертної оцінки застосування запропонованих інноваційних рішень

Інноваційні рішення	Рівень довіри експертів до інноваційного рішення, абсолютні одиниці		Різниця рівнів довіри, %
	позитивний	негативний	
1. Оптимізація хімічного складу валків виконання СПХН у рамках традиційних технологій	4,428	4,056	8,4
2. Оптимізація хімічного складу валків виконання ЛПХНд у рамках традиційних технологій	4,516	3,968	12,31
3. Вакуумна обробка розплаву чавуну валків виконання СПХН-48	4,518	3,956	12,35
4.Продувка азотом розплаву чавуну валків виконання ЛПХНМдц-71	4,771	4,158	11,70
5. Обробка шлаками розплавленого чавуну валків виконання ЛПХНд	4,501	3,998	11,17
6. Виливок валків виконання ЛПХНМдц у металеві форми нагріті до температури 190-210 °С	5,297	2,928	55,27
7. Удосконалення способу комплектування валків виконання ЛПХНд	4,591	3,722	18,95

Таблиця 6.3 – Розрахунки прибутків від виробництва прокатних валків із застосуванням запропонованих технологічних рішень

Показники	технологія виробництва валків) *	Інноваційні рішення**					
		складу валка в рамках традиційної технології	вакуумування чавуну	або інертними газами	сумішню	лиття в металеві форми при температурі 190-210 °С	рівнем коерцитивної сили
Ціна 1 т прокатного валка, тис. грн/т	17,3	18,9	19,2	19,2	19,7	18,9	19,8
Виробнича собівартість, тис. грн/т	11,3	12,2	12,6	12,6	12,9	11,6	12,9
Витрати на підготовку поставки продукції, тис. грн/т	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,2	1,3
Виробнича собівартість, тис. грн/т	11,3	12,2	12,6	12,6	12,9	11,6	12,9
Витрати на підготовку поставки продукції, тис. грн/т	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,2	1,3
Повна собівартість, тис. грн/т	12,4	13,4	13,9	13,9	14,3	13,8	14,2
Прибуток від виробництва і реалізації, 1 т прокатного валка, тис. грн/т	4,9	5,5	5,3	5,3	5,4	6,1	5,6

\* по даним ДП «Лутугинський науково-виробничий валковий комбінат»

\*\* розраховане автором за результатами маркетингових досліджень ринку і характеристик підприємства-виробника

Наведені в табл. 6.3 розрахунки показали, що незважаючи на близькість розглянутих властивостей для продукції, отриманої різними способами, найбільш вигідним для підприємства-виробника є варіант вилівка валків у металеві форми при температурі 190-210 °С. Цей спосіб є найбільш ефективним, з погляду економії виробничих витрат, при забезпеченні необхідної їхньої твердості й одночасній умові зниження напруг, а також частки залишкового аустеніту в процесі виробництва.

Розрахунки очікуваного річного економічного ефекту від впровадження інноваційних пропозицій представлений у табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунки очікуваного річного економічного ефекту від виробництва й реалізації прокатних валків із застосуванням способу лиття в металеві форми при температурі 190-210 °С

Показники	Значення, тис. грн.
Річний обсяг виробництва продукції, т	2100
Питомий прибуток на одиницю продукції при традиційній технології, тис. грн/т	4,9
Питомий прибуток на одиницю продукції при інноваційній технології, тис. грн/т	6,1
Приріст питомого прибутку (економічний ефект), тис. грн/т	1,2
Сума річного економічного ефекту, тис. грн/рік	2520

Фактичний економічний ефект від впровадження розробок на цій підприємстві склав 1200 грн. при обсязі виробництва 2100 т у рік. Очікуваний ефект від впровадження інноваційних пропозицій складе 2520 грн/рік.

### **Висновки за розділом**

Виконані в роботі дослідження були спрямовані на створення ефективних і менш витратних технологій виробництва валків з хромонікелевого чавуну, що забезпечують підвищення, працездатності їх в процесі експлуатації.

Для оцінки цінової складової економічного ефекту від впровадження запропонованих інноваційних рішень був застосований метод статистичного аналізу експертних оцінок, який виконувався в 4 етапи.

На першому етапі проводили вибір оціночних показників конкурентоспроможності запропонованих інноваційних рішень. На другому збирали інформацію з підприємств постачальників і споживачів продукції. На третьому та четвертому виконували статистичний аналіз і аналіз отриманих показників і результатів виконаних розрахунків.

Фактичний економічний ефект від впровадження інноваційних пропозицій склав 1600000 грн. за обсягом виробництва 2100 т у рік.



## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

В роботі представлені нові рішення науково-прикладної проблеми розробки та підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну за рахунок застосування теоретичних, експериментальних та інноваційних підходів у вирішенні завдань, які охоплюють весь життєвий цикл виробів (оптимізація хімічного складу, способи мікролегування і модифікування, регулювання процесів кристалізації при виробництві, а також експлуатації).

Основні наукові і прикладні результати досліджень.

1. Аналіз літературних джерел і патентів, виявив фактори, що впливають на довговічність хромонікелевих валків. Істотний вплив на їх властивості надають хімічний склад металу робочого шару, легуючі домішки, що використовуються, модифікатори, способи і частка їх введення, вміст в матеріалі шкідливих домішок, не обумовлених нормативно-технічною документацією, технологічні процеси виробництва (температурні режими плавлення та металевої форми, заливання і витримки металу при кристалізації).

2. Розроблена методологія досліджень, яка включала теоретичні та експериментальні дослідження з розробки та коригування параметрів енергозберігаючих технологічних процесів виробництва великогабаритних виливків масою 5-10 т. Для більш точного аналізу фазового складу в хромонікелевих чавунах в роботі була використана оптико-математична методика, до якої внесені доповнення в частині оцінки графітоутворення та його зв'язку з технологічними параметрами лиття, термообробки валків, властивостями чавуну і фазовим складом сплаву робочого шару.

3. Встановлено, що основними чинниками порушення працездатності валків є: знос, пошкодження бочки та руйнування робочого шару (відшаровування і викрошки), руйнування шийок і трэфів, сколи торців, а також дефекти металу, що формуються при литті. До числа експлуатаційних чинників, що впливають на ресурс валків належать:

неефективне використання різних конструктивних типів і виконань валків, нераціональні системи їх охолодження, надмірні та нерівномірні навантаження, недотримання норм напруцювання в міжремонтні періоди.

4. Теоретичні та експериментальні дослідження визначили, що забезпечення однакової твердості по перетину та довжині робочого шару вилівка можливо досягти в умовах відливання та кристалізації при забезпеченні температури нагрівання металевої форми до 190-210 °С, і введення оптимальної кількості модифікаторів Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant, що використовуються при обробці рідкого розчину. Такі технологічні параметри забезпечують показники коерцитивної сили в робочому шарі на рівні 23-24 А/см.

5. Застосування шлакоутворюючої суміші, крім підвищення якості металу і поверхні виливків, забезпечує зниження витрат легуючих елементів, зменшення припусків на механічну обробку. Підвищується міцність сірого чавуну, що використовується для серцевини і шийки валків з 283-312 МПа до 321-346 МПа.

6. При відновленні валків виконань ЛПХНМд-71 і ЛПХНМд-73 наплавленням доцільно використовувати сталі 45 і 35ХГСА в якості підшару, що наноситься методом ЕШП з подальшим робочим шаром з чавуну.

7. В якості оптимального матеріалу робочого шару валків запропоновано склад хромонікелевого чавуну додатково легованого міддю, молібденом, мікролегованого ванадієм, ніобієм і бором при співвідношенні нікелю до хрому в межах 2,2-3,0. Модифікування рекомендується здійснювати домішками Superseed ® 75 і Reseed ® Inoculant.

8. Виконані дослідження спрямовані на створення ефективних і менш витратних технологій виробництва валків з хромонікелевого чавуну, що забезпечують підвищення їх працездатності в процесі експлуатації. Ефективність виконаних розробок оцінена експертним шляхом і досягається фактичною економією від впровадження.

**БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК**

1. Автухов А. К. Полянский О. С. Методика і методологія проведення досліджень підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну. *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 43(1265). С. 5–9.
2. Божидарнік В. В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів : монографія : у 2-х т. / Т. 1. Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів. – Луцьк : Надстир'я, 2007. - 400с.
3. Двохшарові валки горячої прокатки і спосіб їх виготовлення / Накагава Йосіхіро, Накаї Ютака, Катаяма Хіроакі і ін.: патент 58-136594 Японія, МКІ С22Д 15/00. (Японія); Заявлено 10.06.83; Опубл.12.02.85
4. Залога В.О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навчальний посібник / В.О. Залога, О.О. Залога, В.Д. Гончаров; за загальн. ред. В.О. Залози. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 371 с.
5. Залога В.О. Пуховський Є.С., Малафєєв Ю.М. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування. Навчальний посібник для студентів ВНЗ машинобудівних спеціальностей / Частина I / Під ред. Коренькова В.М. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 286 с.
6. Пахолук А.П., Пахолук О.А. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали. Посібник для студентів інженерних спеціальностей ВНЗ. - Львів.: Світ. 2005. 220с.
7. Проектування механізованих технологічних процесів у рослинництві: Навчальний посібник з виконання кваліфікаційних робіт на освітньо-кваліфікаційному рівні Бакалавр з напрямку «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / І.М. Бендера, П.І. Роздорожнюк, О.В. Ткач та ін. / за редакцією І.М. Бендери, П.І.

Роздорожнюка, О.В. Ткача. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2011. 556 с. ISBN 978-617-539-058-0.

8. Пуховський Є.С., Малафєєв Ю.М. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування. Навчальний посібник для студентів ВНЗ машинобудівних спеціальностей / Частина I / Під ред. Коренькова В.М. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 286 с.

9. Серіков Я. О. Безпека життєдіяльності – секюритологія. Проблеми. Завдання. Шляхи вирішення : монографія : в 2-х. ч. / Я. О. Серіков, Л. Ф. Коженєвські. – Харків : ХНАМГ ; Краків : ЕАС, 2012. – Ч. 1. – 168с. Ч. 2. – 337 с.

10. СОУ 29.32.-3-532.2007. Видання. Неруйнівний контроль якості магнітним методом деталей машин при технічному обслуговуванні та ремонті / А. Автухов та ін. [Чинний від 2008-03-01]. Київ, 2007. 23с.

11. Термічна обробка металів: [навч. посіб.] / А.В. Мохорт, М.Г. Чумак - К.: Либідь, 2002. - 512 с. - ISBN 966-06-0212-X

12. Ясній П. В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщинотривкість / П. В. Ясній. – Львів : Світ, 1998. – 292 с.

13. Ziegler R. Einfluss von Kohlenstoff, Silicium, Mfngen, Phosphor and Schwefel auf einige primare Eigenschaften dts Cubeisen mit Lamllengraphit. Giesseret, 1964, Bd.51, №4, P.85–94

14. Fordes D.P., Paulson P.A., Minert G.K. // Transactions of the American Foundrymen's Association, 1941, vol.93, P. 574.

15. Holden W.W. The practical application and economie aspectical application and economie aspects of the Gumold - process in the United States. / W.W. Holden, C.V. Dunks // Brit. Foundryman. 1980. Vol.73. №9. P.265–274.

16. Zezula G. Vpluv zrnitosti modifikatoru na modifikaci trarne letny reakcni komore formy. Slevarenstri. 1981. № 2. P.92–95.

17. Farga E., Voros E., Balazs L. Vorteile der in Formen erfolgenden Kugelgraphitsbeissenerzeugung auf Grund von betbriblicht Erfahrungen Liessereitechnik. - 1981. №1. P. 309–312.