

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

**Автухов Анатолій Кузьмич**

УДК 621.74: 669

НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ДЛЯ  
ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ З  
ХРОМОНІКЕЛЕВОГО ЧАВУНУ

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** Лауреат Державної премії України,  
доктор технічних наук, професор,  
Скобло Тамара Семенівна,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
професор кафедри «Технологічні системи  
ремонтного виробництва»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент,  
Волчук Володимир Миколайович  
Придніпровська державна академія будівництва та  
архітектури, професор кафедри матеріалознавства та  
обробки матеріалів

доктор технічних наук, професор,  
Слинько Георгій Іванович  
Запорізький національний технічний університет,  
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання

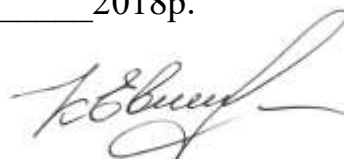
доктор технічних наук, професор,  
Роїк Тетяна Анатоліївна,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», професор кафедри репрографії

Захист дисертації відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018р. о \_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.823.04 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є. І. Калінін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Робота присвячена дослідженню нових підходів до виготовлення прокатних валків для виробництва сортового та листового прокату, який використовується у різних галузях промисловості – сільському господарстві, машинобудуванні, будівництві та ін.

Чавунні леговані валки виконання СПХН і СПХНМ широко застосовують на всіх типах сортопрокатних станів. Двошарові хромонікелеві валки виконання ЛПНХд і ЛПХНМд знаходять застосування в клітках безперервних і напівнеперервних широкосмугових, середньо- і товстолистових, а також дресировальних станів.

Умови роботи валків станів гарячої прокатки характеризуються циклічним впливом температури (близько 600°C) і питомих тисків (до 3 т/мм<sup>2</sup>). Тому при виробництві до їх робочого шару пред'являються особливі вимоги (високі твердість, зносостійкість, міцність, достатня глибина робочого шару і мінімальний рівень залишкових напружень), які забезпечують їх необхідні експлуатаційні властивості та якість прокату. Однією з причин, що викликає відмови валків в період експлуатації, є нестабільність їх властивостей через наявність залишкового аустеніту і його розпаду.

Збільшення продуктивності прокатних станів при одночасному підвищенні вимог до характеристик прокату (точність геометричних розмірів, властивості продукції) висуває все більш високі вимоги до якості валків, збільшення терміну їх служби та економії енергоресурсів. Вирішення цих проблем для прокатних валків такого типу може бути досягнуто як застосуванням додаткового мікролегування та модифікування розчинів, позапічною їх обробкою, так і вдосконаленням технології їх виготовлення. Виробництво таких валків із заданим рівнем властивостей та стабільною структурою робочого шару, надійно працюючих в умовах високих температур і навантажень, що циклічно змінюються, можливо лише на основі вивчення факторів, які визначають їх якість та службові властивості при експлуатації.

Важливими є і опрацювання теоретичних, технологічних основ підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну. Тому розробки спрямовані на вирішення цих проблем можуть бути віднесені до важливих та актуальних.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася відповідно до Державної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу на період до 2011 року (Постанова Кабінету Міністрів України від 28 липня 2004р. №967), госпдоговірної теми, що проводилася спільно з Лутугінським державним науково-виробничим валковим комбінатом «Підвищення однорідності властивостей і структури робочого шару валків різного виконання листових та сортових станів» (ДР 010 U 012047, 2009-2013рр.), держбюджетної теми: «Розробка і впровадження нових технологій виробництва двошарових валків листопркатних станів з хромонікелевого чавуну», Державний реєстраційний номер НДР 0114 U 007189, 2015р.

**Мета дослідження:** 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.

**Завдання дослідження:**

- проаналізувати і систематизувати дані за технологічними параметрами виробництва та підвищення терміну служби валків з хромонікелевого чавуну різних виконань і на їх основі запропонувати інноваційні технології для забезпечення економії енергоресурсів щодо витрат й підвищення довговічності такого інструменту в експлуатації;

- розробити методологію проведення досліджень за новими підходами щодо підвищення довговічності валків шляхом теоретичних обґрунтувань та контролю на всіх етапах життєвого циклу їх виробництва й експлуатації;

- систематизувати відмови валків і найбільш значущі експлуатаційні фактори, що впливають на довговічність, встановити інтенсивність розвитку пошкоджуваності металу й основні чинники його деградації, що викликають руйнування робочої поверхні;

- дослідити особливості формування температурного поля та відповідного структуроутворення при дозованому, порціонному виливку валків відцентровим методом, визначити рівень напружень, що виникають в них при кристалізації виливків і на основі отриманих результатів розробити пропозиції щодо мінімізації витрат у виробництві та підвищення їх довговічності;

- вивчити можливість підвищення експлуатаційних характеристик хромонікелевого чавуну за рахунок оптимізації хімічного складу, введення мікролегуючих домішок, модифікаторів, а також коригування технологічних параметрів виробництва з використанням позапічного рафінування металу робочого шару;

- вивчити можливість відновлення робочого шару валків та розробити рекомендації щодо створення ефективних, менш витратних технологій їх виробництва з хромонікелевого чавуну з використанням неруйнівного контролю їх якості та способу комплектування в експлуатації.

- оцінити ефективність нових розробок при їх реалізації у виробництво.

**Об'єкт дослідження:** процес вдосконалення технологій виготовлення валків з хромонікелевого чавуну.

**Предмет дослідження:** науково-технологічні основи структуроутворення для підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну.

**Методи досліджень.** Методологічною основою дисертації є системний підхід до теоретичних та експериментальних напрямів досліджень на основі аналізу й узагальнення виконаних розробок з використання матеріалів і технологічних процесів виробництва валків. Використані експериментальні методи спеціального математичного моделювання окремих технологічних процесів виробництва валків, планування експерименту, статистичної обробки даних, стендові, лабораторні та промислові дослідження із застосуванням методик, викладених у відповідній нормативно технічній документації. Для вивчення структуроутворення використані сучасні методи аналізу і розроблені нові на базі оптико-математичного опису з локальною оцінкою фазового складу сплавів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** *Вперше:*

– встановлені особливості формування температурного поля в відцентрово литих валках з хромонікелевого чавуну при дозованому порціонному заливанні

металу, що дозволило оцінити відповідне структуроутворення робочого шару, рівень виникаючих напружень й отримати математичні залежності для їх прогнозування.

– теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджено, що витримка вилівки валка при кристалізації в інтервалі температур магнітного перетворення фази карбиду (ефект магніострикції) протягом 5-6 год. забезпечує максимальний розпад залишкового аустеніту, мінімізацію напруг і це в поєднанні з не руйнуючим контролем використано для прийняття рішення про необхідність проведення термічної обробки та ефективну комплектацію валків.

– встановлена гранична межа напруженого стану та оптимальна структура за рівнем коерцитивної сили, яка не повинна перевищувати 23-24 А/см, оскільки ці показники характеризують мінімальну частку залишкового аустеніту і оптимальні властивості робочого шару.

*Отримало подальший розвиток:*

– використання рівняння теплопровідності для проведення теоретичних досліджень, що враховують розрив ентропії в інтервалі фазових перетворень з граничними умовами кристалізації металу в металевій формі при відливанні масивних виробів на межі їх контакту після введення різних доз сплаву при багат шаровому заливанні, що дозволило описати механізм виникнення локальної неоднорідності розподілу компонентів при кристалізації фаз.

*Удосконалено:*

– матеріал робочого шару двошарових прокатних валків з хромонікелевого чавуну, легований хромом, нікелем, міддю, і мікролегований ванадієм, ніобієм і бором, який дозволив забезпечити отримання оптимально стабільної структури та споживчих властивостей при співвідношенні нікелю до хрому в межах 2,2-3,0, з використанням модифікуючої домішки (Ммод) нового покоління, з урахуванням маси металу (Ммет), і часу його витримки ( $\tau$ ) перед заливкою, що визначається за

коефіцієнтом К в залежності  $K = \frac{M_{\text{мод}}/M_{\text{мет}}}{\tau} = 14,5-21,6$ .

**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. Порівняльно оцінено вплив різних способів підвищення якості і властивостей металу валків широкої номенклатури виконань із хромонікелевого чавуну при позапічному рафінуванні розплавів: вакуумуванні, обробкою шлаками, продувкою газами і визначено їх внесок у підвищення експлуатаційної стійкості. 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 можливість виключити використання термообробки.

На підставі аналізу експлуатаційної стійкості відцентроволитих прокатних валків, досліджуваної номенклатури, розроблені пропозиції по збільшенню їх ресурсу на основі нового підходу до комплектування в клітях, який враховує крім вихідних розмірів виробів, близькі показники твердості і коерцитивної сили, що дозволяє збільшити наробіток на комплект до 7,98 % на стані «1700» і 17,3 % – на

«2000». Фактичний економічний ефект від впровадження розробок склав 1,6 млн. грн. при обсязі виробництва валків 2100 т.

Інноваційні технології захищені 4 патентами України.

Отримані результати роботи використовуються в навчальному процесі ХНТУСГ імені Петра Василенка при вивченні студентами навчально-наукового інституту технічного сервісу дисципліни «Матеріалознавство» і «Технологічні системи ремонтного виробництва».

**Особистий внесок здобувача.** Результати теоретичних та експериментальних досліджень, які виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладені у роботах [1-36].

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: аналіз основних чинників руйнування робочої поверхні валків при експлуатації [16], експлуатаційної надійності та їх відмови у експлуатації [32], порушення їх працездатності і характеристика природнього, прискореного і передчасного зносу під час експлуатації [19]; методика теоретичного опису умов кристалізації багат шарових виливків прокатних валків [12] та встановлений, вплив температури нагріву металевої форми і навколишнього середовища, її товщини на швидкість кристалізації та розподіл залишкових напружень в виливках двошарових валків, отриманих відцентровим способом [22]; методика розрахунку термічних деформацій і температурних напружень, що виникають під час кристалізації в прокатних валках з гладкою бочкою [11]; методика комп'ютерного дослідження, яка заснована на гідродинамічних аналогіях, що відбуваються при формуванні фаз [8]; розроблені математичні моделі, що враховують вплив основних легуючих компонентів двошарових листопрокатних валків на показники якості – твердість (HS) і рівень коерцитивної сили (Kc) [20]; особливості формування карбідної фази робочого шару відцентрово литих валків з хромонікелевого чавуну, в тому числі, їх тонкої структури [18,34]; отримані математичні моделі, що враховують вплив параметрів виробництва двошарових валків на твердість (HS) і рівень коерцитивної сили (Kc) [4]; спосіб оцінки впливу сумарного вмісту Superseed® 75 і Reseed® на структуру металу за допомогою коефіцієнта K, що враховує співвідношення кількості введеного в ківш модифікатора до часу витримки й обсягу металу робочого шару [17, 25].

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях: IX міжнародній науково-практичній конференції «Научният потенциал на света 2013» (Софія. «Бял ГРАД-БГ» 17-25 септембра 2013г.), XXII Уральській школі металознавців-термістів «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (г. Оренбург 2-6 февраля 2014), Міжнародних науково-практичних конференціях «Технологічні системи ремонтного виробництва» (м. Харків, 2013 – 2018), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (м. Харків, 2014), VII міжнародній науково-практичній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні» (м. Харків, НТУ «ХПІ», 18-20 листопада 2015), VIII міжнародній науково-практичній конференції «Ринкова трансформація економіки: стан,

проблеми, перспективи» (м. Харків, ХНТУСГ, 7 квітня 2017), Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. (Харків, НТУ «ХП», 22-24 листопада 2017), VII Всеукраїнській науково практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Підвищення надійності машин і обладнання» (Крапивницький, ЦНТУ, 18-20 квітня 2018), Всеукраїнській науково-методичній конференції «Проблеми математичного моделювання» (м. Кам'янське: ДДТУ, 23-25 мая 2018)

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 36 наукових працях, у тому числі: 1 стандарт; 1 монографія; 15 статей у спеціалізованих наукових виданнях України (3 з яких внесені до міжнародних наукометричних баз); 7 публікацій у закордонних виданнях; 4 статті в інших виданнях; 4 тези у збірниках доповідей наукових конференцій, отримано 4 патенти.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 401 сторінку, у тому числі, 14 додатків на 101 сторінці. Обсяг основного тексту дисертації становить 264 сторінки, 46 рисунків, 65 таблиць. Список використаних джерел нараховує 209 найменувань на 18 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ.** У вступі представлені: обґрунтування вибору теми дисертації, мета та завдання роботи, використані методи досліджень, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація роботи, структура та її обсяг, зв'язок досліджень з науковими програмами, планами і темами.

**Перший розділ** «Узагальнення відомих розробок з використання та виробництва хромонікелевого чавуну для прокатних валків». Виконано аналітичний огляд відомих розробок, обґрунтовані тема і напрями досліджень. Аналіз літературних джерел, де показано, що хромонікелевий чавун знаходить широке застосування для виготовлення сортопрокатних і робочого шару листопрокатних валів, як стаціонарної, так і відцентрової виливки. Хімічний склад і рівень твердості вітчизняних матеріалів та ті, що застосовуються для валків аналогічних станів і клітей за кордоном, ідентичні.

Валки з хромонікелевого чавуну відливають стаціонарним і відцентровим способом. Узагальнено дані робіт Кривошеєва А. Е., Скобло Т. С., Хричикова В. Є., Большакова В. І., Сваріка А. А., Болдіна А. Н., Будаг'янца Н. А., Гімалетдінова Р. Х., Циброва С. В., Мірозяна Г. С., Юдіна С. В., Рудюка С.І., Степанова Ю. А., Фесенко О. М., Білявського Л. С., Вдовіна К.М. за технологічними параметрами виробництва валків (способу підготовки оснастки, послідовності операцій, температурі відливання, часу витримки при кристалізації тощо), які забезпечують необхідний рівень їх якості для конкретного використання в клітях.

Розглянуто особливості виробництва сорто - і листопрокатних валів великої маси. Встановлено, що відцентроволиті валки, на відміну від стаціонарнолитих, мають наступні переваги: забезпечують задану товщину робочого шару; постійну твердість металу за його перетином; дрібнозернисту структуру; значну ефективність використання металу; нижчу трудомісткість формування, збірки форм і кращі умови праці при їх виробництві. Для отримання якісного робочого шару при

відцентровому литті забезпечуються належні температурні та часові умови його кристалізації. Вітчизняні та закордонні публікації стосовно виробництва і підвищення терміну служби валків з хромонікелевого чавуну показують, що виконана велика кількість досліджень з розробки нових й оптимізації валкових сплавів, що застосовуються. Однак, до теперішнього часу питання створення чавунів з оптимальними експлуатаційними властивостями вимагає подальших рішень, при яких ефективність нових розроблених сплавів зростає за рахунок їх ресурсу, що досягається модифікуванням та способом контрольованого охолодження в металевій формі.

Для підвищення експлуатаційної стійкості валків використовують різні способи модифікування чавуну. Це забезпечує подрібнення зерна, зниження забрудненості металу неметалевими включеннями, отримання зносостійкого робочого шару, графіту компактної або кулястої форми, знижує схильність до формування гарячих тріщин. Питанням удосконалення способів модифікування і типу використаних лігатур присвячені роботи Таленберга А. Е., Слинко Г. І., Захарченко Е. В., Мільмана Б. С., Ващенко К. І., Воронової Н. А., Волощенко М. В., Могільцева О. А., Кремнов-Хазанова Л. А., Іоффе А. Я., у яких міститься інформація про склад різних модифікаторів, способи їх введення і властивості, що досягаються при такій обробці.

У сучасному вальцевироблювальному виробництві ефективні для випробувань модифікатори нового покоління Reseed® Inoculant, Superseed®75, Superseed®50. Вони можуть забезпечити зниження ступеню легування розчину, формування необхідної форми графіту, подрібнення зерна, зниження шкідливих домішок, збереження розплаву зі збільшеною витримкою в ковші без ефекту демодифікації. Найбільш повно вивчено їх вплив при виробництві виливків з сірих та високоміцних чавунів і відсутня інформація про застосування для легованих високовуглецевих сплавів, що працюють в умовах циклічних навантажень та дій температур. Вивчення цього питання дозволить розробити рекомендації щодо застосування таких модифікаторів при відливанні робочого шару валків.

Для підвищення якості металу використовують позапічне рафінування: обробку у вакуумі, шлаками, продування газами. Вивченню цих процесів присвячені роботи Самаріна А. М., Мігай В. П., Кузьміна І. В., Ойкса Г. Н., Райхле Л., Гіршовіча Н. Г., Шерстобитова М. А. Показано, що в наслідок обробки у вакуумі підвищуються механічні властивості чавуну для сортопрокатних валків. Межа міцності на розрив і вигин чавуну валків виконань СПХН 48-50 зростає, в середньому, на 23%, а твердість збільшується – на 5-10%. Мікротвердість перліту у вибіленому чавуні валків ЛПХНД підвищується на  $H_{050}$  –150-160, а в СПХН на  $H_{050}$  –70-75. Відзначається збільшення частки карбідної фази в структурі робочого шару хромонікелевих валків. Інформація щодо впливу вакуумної обробки металу в процесі відливання на якість прокатних валків та їх експлуатаційну стійкість вельми суперечлива, тому що стосуються різних способів виробництва і матеріалів, що застосовуються.

Узагальнені дані досліджень щодо продування газами валкових розплавів. Продування інертними газами рідкого розчину металу після випуску його з печі сприяє видаленню неметалевих включень, вирівнюванню хімічного складу і температури по всьому його об'єму.



Існуюча в літературних джерелах інформація з обробки газами сплавів, що використовуються для виготовлення валків виконань СП свідчить про те, що після такого процесу спостерігається невелике зниження кисневих включень, зменшується засміченість вибіленого шару графітовими включеннями, подрібнюється евтектичне зерно. Механічні властивості перехідної зони в двошарових прокатних валках стаціонарної технології виробництва збільшуються на 17%. Інформація про обробку рідкого розчину хромонікелевого чавуну для робочого шару двошарових валків в літературі відсутня.

При кристалізації валка, в зв'язку з переходом металу з пластичного стану в пружній, виникають внутрішні термічні напруги, які можуть бути зняті природним старінням або термічною обробкою. Існуючі відомості про параметри термічної обробки хромонікелевих чавунних валків певного виконання часто суперечливі, тому що розробка режимів проводиться для валків з відмінними спадковими властивостями, які визначаються шихтою, хімічним складом, твердістю, глибиною вибілювання і способом лиття. Єдність думок авторів щодо впливу термічної обробки на експлуатаційні характеристики валків полягає в тому, що всі вони зазначають підвищення їх стійкості в результаті розпаду залишкового аустеніту. Питання підвищення ресурсу валків шляхом зниження частки залишкового аустеніту як при відливанні, так і при термічній обробці вимагає додаткових досліджень, спрямованих на розробку технології їх виробництва, яка дозволяла б забезпечувати їх максимальне напруження при експлуатації в клітях конкретного стану. На підставі виконаного аналізу літературних джерел сформульовані мета і завдання досліджень.

**У другому розділі** «Методика і методологія проведення досліджень» розроблено методологічний підхід до досліджень, який дозволив визначити послідовність виконання експериментів, спрямованих на підвищення експлуатаційної стійкості валків з хромонікелевого чавуну. Обґрунтування способів підвищення споживчих властивостей валків базувалося на аналізі вивчення інформації стосовно сфери їх застосування, способів виготовлення і чинників виникнення відмов. У лабораторних та промислових умовах вивчали вплив хімічного складу, способів лиття, застосовуваних модифікаторів для валкових сплавів, а також ефективність використання методів позапічної обробки валкових розплавів для підвищення якості виливків, впливу термічної обробки на властивості чавуну валків.

Методологія досліджень включає теоретичні та експериментальні напрями, в тому числі і з розробки енергозберігаючих технологічних процесів, коригування їх параметрів. Досліджували хромонікелеві чавуни, що застосовуються для виготовлення валків сортових (СПХН-46, СПХНМ-48) і листових (ЛПХНд-63, ЛПХНд-71, ЛПХНд-72, ЛПХНд-74, ЛПХНМдц-71, ЛПХНМдц-73) станів, відлиті методом стаціонарного та відцентрового лиття.

Аналіз чинників, відповідних за руйнування валків виконували органолептичними, інструментальними й експериментальними методами. Величину зносу валків визначали інструментальним методом з використанням універсальних (мікрометричних з точністю вимірювання 0,01 мм) і спеціальних вимірювальних інструментів. Якість металу досліджуваних валків визначали на зразках, вирізаних від припуску бочки торцевої частини валків.

Вивчення мікроструктури (вихідну і після експлуатації) проводили з використанням оптичних мікроскопів МІМ-8 і «Neuphot-2», В6-5134 фірми «Tesla» при збільшеннях  $\times 100 - 1000$ .

Для аналізу фазового складу в хромонікелевих чавунах в роботі була використана електронна мікроскопія і оптико-математична методика, заснована на гідродинамічних аналогіях, що відбуваються при формуванні фаз. За допомогою комп'ютера обробляли отримані в форматі bmp зображення отриманих мікроструктур хромонікелевого чавуну. Оцифрування цих зображень проводили за спеціально розробленою програмою.

Хімічний склад чавуну оцінювали рентгеноспектральним, фотометричним методами з використанням газоаналізаторів АН-29 і АС-7012. Оцінювали розподіл хімічних елементів в локальних зонах, в тому числі, і зі структурною неоднорідністю. Дослідження проводили спектральним методом на растровому мікроскопі-аналізаторі YFM 63-90.

Фізико-механічні властивості матеріалів валків різних виконань виконували за стандартними методиками.

При проведенні досліджень, спрямованих на вивчення особливостей дії позапічної обробки на валкові розчини, вивчали вплив різних шлакоутворюючих сумішей, вакуумування і продувки азотом. Проаналізовано властивості металу після таких обробок при литті валків у виробничих умовах.

При відновленні хромонікелевих валків електрошлаковим наплавленням, розробленим в інституті ім. Є. О. Патона, вивчали можливість використання в якості підшару сталі 35ХГСА і 45.

При розробці сплавів для валків з нових матеріалів виготовляли і досліджували виливки різного хімічного складу в лабораторних умовах. Вивчення впливу модифікаторів Reseed® і Superseed®75 на структуру й експлуатаційні властивості валків проводили у виробничих умовах ЛДНВБК. Аналізували вплив технологічних параметрів відцентрового лиття валків: температуру металевої форми, товщину теплоізоляційного покриття форми, частку модифікаторів, що вводяться, температуру і масу порцій металу, що заливається, час технологічних операцій й оберти машини.

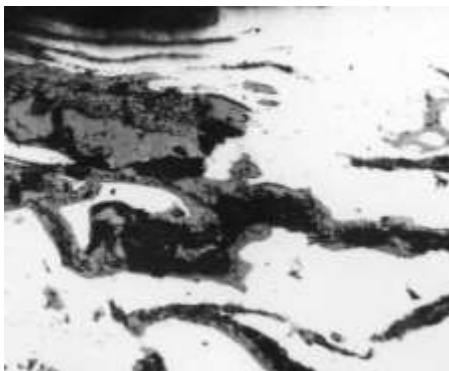
Дослідження впливу хімічного складу і технологічних параметрів лиття валків на структуру металу й їх оціночні параметри виконували із застосуванням методів статистичної обробки експериментальних даних, планування експерименту.

Методика вивчення експлуатаційної надійності прокатних валків передбачала визначення таких середніх параметрів як: число установок, напрацювання за установку, середньоквадратичне відхилення напрацювання за установку, витрата робочого шару за установку, знімання робочого шару, ресурс, початковий діаметр, ефективність використання робочого шару, а також коефіцієнт списання валків за зносом і дефектами. Аналізували частку списання валків та чинники руйнування бочки, шийки, тріфів, відшарування, сітці розпалу, викрошкам, тріщинам, прожогам. Для детального аналізу експлуатаційної надійності валків розроблено спеціальний алгоритм, який починався з вибору наявної інформації про конкретні валки, в n кліті стану. Відомості формувалися у вигляді робочого масиву, що складається з підмасивів, кожен з яких відповідав конкретному чиннику відмови. Отримана інформація піддавалася математичній обробці. Оцінювали коефіцієнт

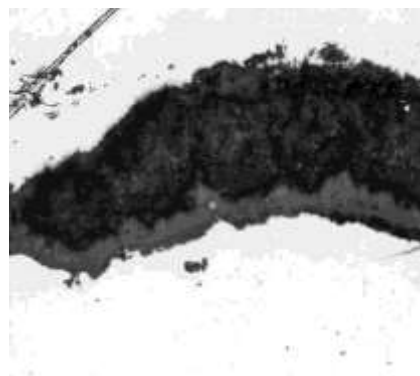
експлуатаційної надійності, що характеризує відносну ефективність експлуатації прокатних валків за одну установку та якість їх виготовлення.

У третьому розділі «Причини відмов і процеси, що впливають на інтенсивність руйнування валків з хромонікелевого чавуну» виконані дослідження експлуатаційної стійкості валків, які показали, що основними порушеннями їх працездатності є: знос, пошкодження бочки та руйнування робочого шару (відшаровування і викрошки), руйнування шийок та трєфів, скол торців бочки, а також дефекти металу, що формуються при виробництві. Незадовільна якість таких валків пов'язана з відхиленнями хімічного складу, підвищеним вмістом шкідливих домішок, засміченням розплавів компонентами, які не обумовлені нормативно-технічною документацією, неефективним модифікуванням, порушенням температурних режимів плавлення і заливки металу, неякісною підготовкою ливарної форми, недотриманням технологічних регламентів охолодження валків в формі та параметрів їх термообробки, недостатньою глибиною робочого шару і формуванням в ньому дефектів, неоднорідністю структури металу, зональною ліквідацією компонентів. До числа експлуатаційних чинників, що впливають на ресурс валків належать: неефективне використання різних конструктивних типів і виконань валків, нераціональні системи їх охолодження, надмірні й нерівномірні навантаження, недотримання норм напруцювання в міжремонтні періоди тощо. При експлуатації в поверхневому шарі валків в результаті складного комплексу теплових і хімічних процесів, великих питомих тисків, циклічної зміни температур створюються ділянки макро – і мікрорельєфу, має місце зміцнення, втрата міцності, формуються структури відпуску і вторинного гарту. 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 надають графітизація, окислення, виникаючі  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення, наявність неметалевих включень в металі.

В результаті досліджень мікроструктури легованих і низьколегованих чавунів з пластинчастим графітом (валки виконань, СПХН, ЛПХНд) після експлуатації в умовах термоциклічного впливу було виявлено розвиток процесу графітизації в зоні внутрішнього окислення (рис. 1). Встановлено, що інтенсивність його по товщині зони змінюється в широких межах.



а



б

а×100; б×1000

Рисунок 1– Графітизація в зоні внутрішнього окислення

Виділення графіту відбувається шляхом нашарування на вже існуючі включення, що призводить до їх потовщення або зміни форми – появи «пір'єподібних» включень (рис. 2). Графіт виділяється також в тріщинах при руйнуванні цементиту і порах (рис. 3).

Інтенсивність розвитку графітизації на кордонах цементитних кристалів при експлуатації валків з хромонікелевого чавуну і навколо неметалевих включень підвищується з наростанням числа циклів термічного впливу.

Графітизація не єдиний фактор, що визначає це явище. Важлива роль в руйнуванні поверхневого шару належить і окисленню.

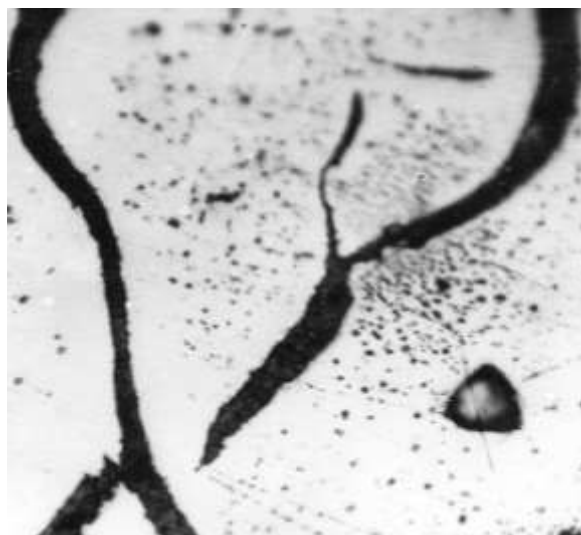
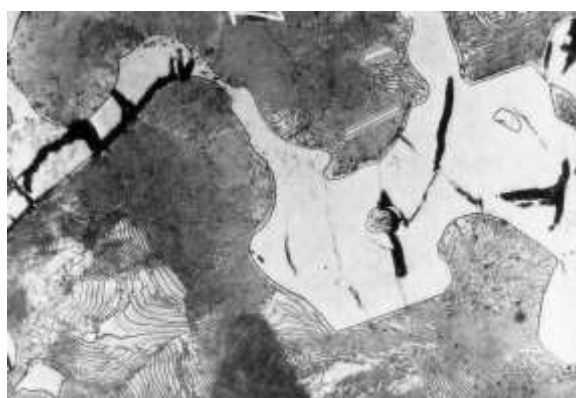


Рисунок 2 – Зростання включень графіту при експлуатації валків в умовах дії високих циклічних питомих тисків і підвищених температур,  $\times 100$



а



б

а $\times 100$ ; б $\times 500$ 

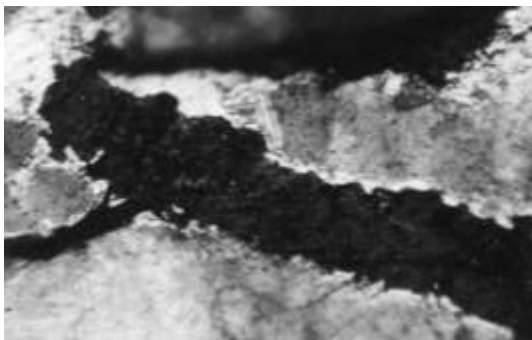
Рисунок 3– Руйнування і графітизація цементиту

Наявність кисневих включень і графіту, що значно відрізняються коефіцієнтами термічного розширення від металевої матриці, при багаторазових змінах тепла у зоні температур нижче  $A_{C1}$  призводять до збільшення обсягу змін у робочому шарі, причому в кілька разів більшому, ніж при ізотермічному відпалюванні. Аналізом структури чавунів після випробувань в умовах циклічних впливів встановлено, що

до окислення найбільш схильні матеріали з наявністю феритної складової і, в меншій мірі – з перлітною. Карбідна фаза окислюється лише після тривалої термоциклічної дії, при якій має місце її пошкодження, а потім графітизація. Помітно окислення і біля границь феритних зерен. В результаті і в ділянках матриці, які збіднені вуглецем, навколо графіту з'являється феритна зона (рис. 4), що повторює рельєф включення. Окисні зони часто описують форму графіту.

Якщо графітизація не відбувається, то окисленню передують: дроблення і сфероїдизація, часткове або повне зникнення (вигорання) тонких пластин цементиту (рис. 5).

При експлуатації прокатних валків в умовах дії великих циклічних тисків (до  $3 \text{ т/мм}^2$ ) і підвищеній температурі в осередку деформації відбуваються ті ж процеси, які спостерігали при лабораторному моделюванні. Відмінністю є лише ефект більш інтенсивного деформування з руйнуванням цементиту і виділенням на дислокаційних стінках вуглецю. Пошкоджуваність супроводжується окисленням, руйнуванням і викрихтуванням цієї фази (рис. 6).



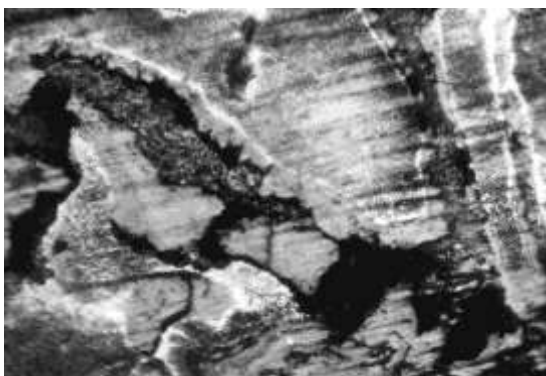
а



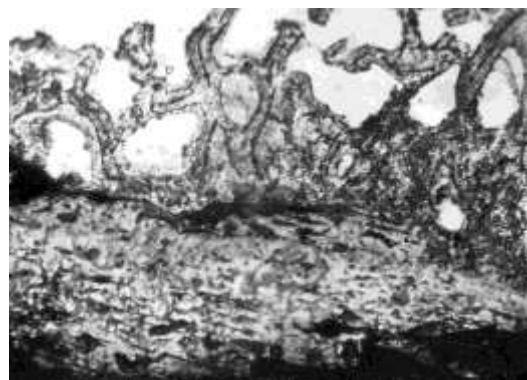
б

а×300, б×1000

Рисунок 4 – Розвиток процесів знеуглецювання (а) і окислення (б) навколо включень графіту



а



б

а – в зоні внутрішнього окислення, ×1000;

б – у поверхні тертя, × 500

Рисунок 5 – Вигорання тонких включень цементиту при взаємодії з окислювальним середовищем

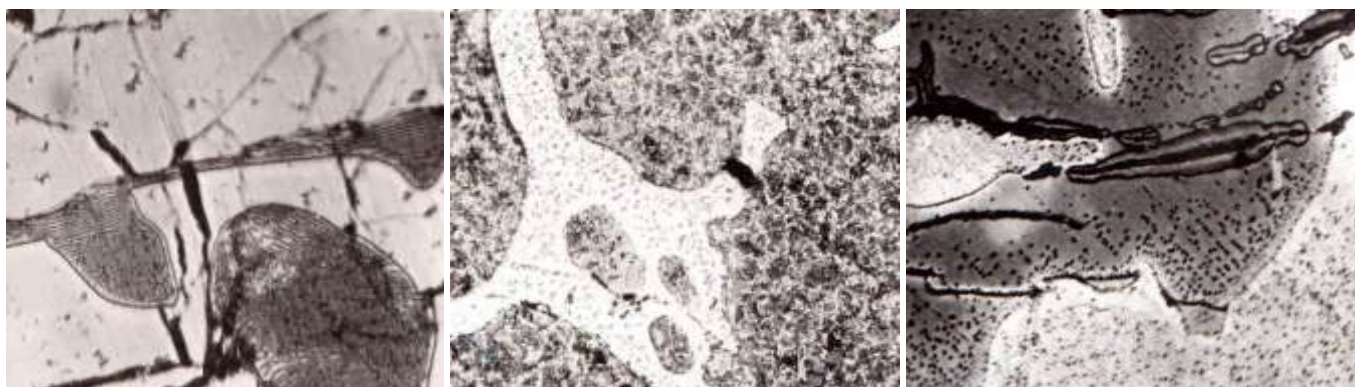


Рисунок 6 – Структура карбідної фази після експлуатації валка,  $\times 1000$

При надходженні активно-корозійної атмосфери можливо виборче окислення й окремих ділянок перліту. Окислення мінімальне, якщо пластини цементиту розташовані паралельно зони проникнення кисневої атмосфери і максимальне – в інших випадках.

Утворення тріщин може бути пов'язано і з  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетвореннями, формуванням фаз з відмінними коефіцієнтами термічного розширення, напруженнями і деформаціями, зумовленими градієнтом температур. Наявність перетворень на поверхні прокатних валків пов'язана як з роботою в умовах циклічних змін температур, так і з дією великих питомих тисків. Крім того, фазові переходи полегшуються розвитком зон локальних деформацій. Моделюючи процес за допомогою методу вакуумного травлення, вдалося спостерігати при циклічній обробці сплавів при  $t_2 = 750-800^\circ \text{C}$  і короткочасних витримках (після 16-20 циклів) появу складчастого аустенітного рельєфу у концентраторів напружень – графітових включень.

Особливий вплив на руйнування робочої поверхні валків надає його твердість і стан поверхні. Визначення основних чинників, що викликають руйнування робочої поверхні дозволяє прогнозувати довговічність і надійність прокатних валків при роботі в умовах термоциклічного впливу, а також намітити шляхи ефективного підвищення їх стійкості.

Аналізом встановлено розподіл компонентів сплаву в структурних складових чавуну. На рис. 7 і в табл. 1 наведені результати мікрорентгеноспектрального аналізу структурних складових робочого шару валка. Показано, що вміст вуглецю в цементиті ледебуріта стабільний і становить 25,03-25,85%, а в структурно вільному цементиті змінюється навіть в одному зерні і досягає 22,47-24,70%.

Кремній не розчинюється у карбідній фазі. Виявлено нерівномірну розчинність ванадію в карбідній фазі (від 0 до 0,40%).

Хром більш рівномірно розподілений в зонах структурно вільного цементиту (3,12-3,47%), менш в – цементиті ледебуріта (2,21-3,50%). Марганець в ледебуриті та цементиті розподілений досить рівномірно (0,61- 0,87%). Слід зазначити, що виявляються окремі зони в ледебуриті, де цей компонент відсутній. Нікель до 3,0% загального його вмісту в сплаві частково розчиняється в карбідній фазі, причому, однорідно в рамках одного зерна цементиту (1,0 - 1,07%) і менш однорідно біля границь зерен ледебуриту (0,98 - 1,25% ).

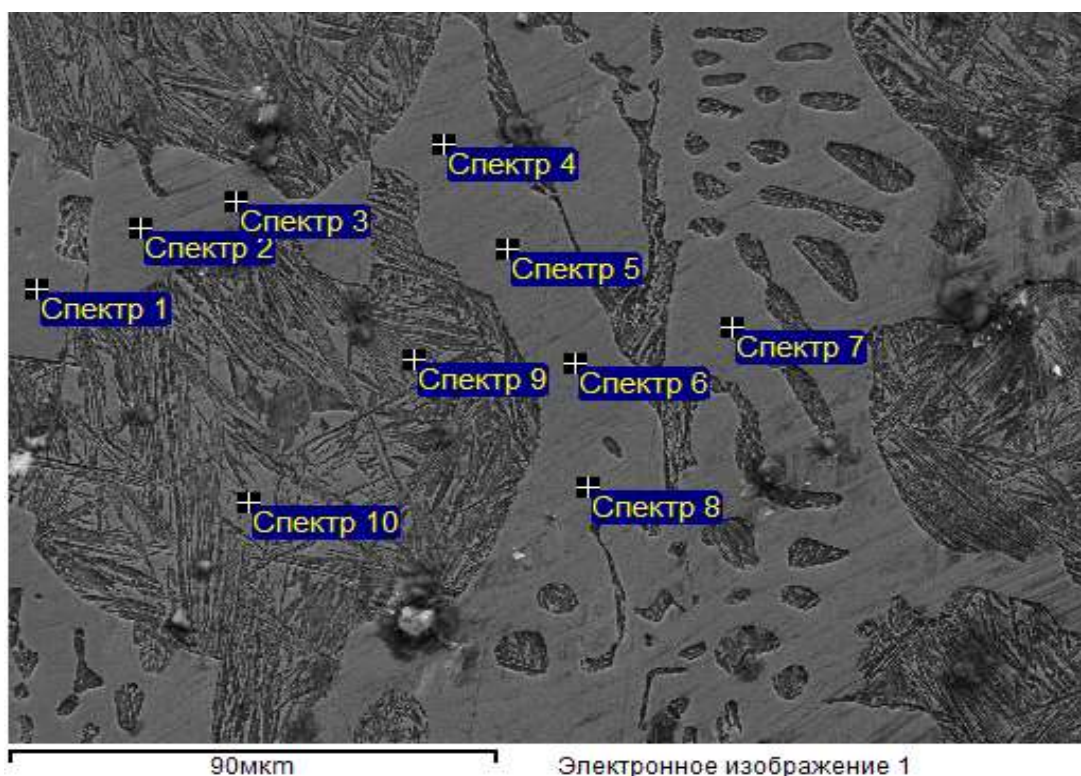


Рисунок 7 – Мікроструктура і зони мікроспектрального локального аналізу

Таблиця 1 – Результати мікроспектрального аналізу

Номер спектра	Вміст компонентів, %							
	C	O	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	22.47			0.40	3.12	0.74	72.19	1.07
2	24.70			0.32	3.47	0.61	69.84	1.06
3	24.52				3.42	0.87	70.19	1.00
4	25.39				3.36	0.68	69.47	1.10
5	25.85				3.31	0.75	69.12	0.98
6	25.44			0.30	3.50		69.75	1.01
7	25.24				3.29	0.71	69.62	1.15
8	25.03			0.29	2.21	0.72	70.50	1.25
9	18.97		0.95		0.77		70.96	3.70
10	19.31	4.66	1.28		0.67	0.44	74.20	4.11
Макс.	25.85	4.66	1.28	0.40	3.50	0.87	74.20	4.11

У металевій матриці концентрація компонентів змінюється ще більш істотно. Так, вміст вуглецю змінюється від 18,97% до 19,31%; марганцю від 0 до 0,44%, хрому від 0,67 до 0,77%; кремнію від 0,95 до 1,28%; нікелю від 3,7 до 4,11%, ванадію в матриці не виявлено. Виявлені кисневі включення, окремі оксиди, що містять 4,66% кисню. Встановлені особливості структуроутворення являються визначальними в пошкодженості карбідної фази та розвитку сітки розпалу робочого шару валків при експлуатації.

**Четвертий розділ** «Теоретична оцінка умов кристалізації і структуроутворення чавуну виливків листопрокатних валів». Розділ присвячено вивченню стану вилівка при кристалізації, яку виконували на основі характеру процесів, що відбуваються: сформованого температурного поля і структуроутворення при дозованому порціонному заливанні шарів (робочого шару та серцевини), рівня виникаючих напруг.

Для проведення теоретичних досліджень запропоновані нові методичні підходи. Оцінку умов кристалізації відцентроволитих виливків здійснювали на основі рішення рівняння теплопровідності:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial(\lambda T)}{\partial r} + \frac{\partial(\lambda T)}{r \partial r} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \frac{\partial(\lambda T)}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial(\lambda T)}{\partial z}, \text{ де} \quad (1)$$

$c$  – питома теплоємність, Дж/(кг×К) (константа);  $\gamma$  – питома вага, Н / м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час, с;  $T = T(r, \varphi, z, \tau)$  – температура, К, яка залежить від координат  $r, \varphi, z$ , і часу  $\tau$ ;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/м×К;  $r$  – координата по радіусу (вісь координати по  $r$  справа наліво), м;  $z$  – координата по висоті, м;  $\varphi$  – кут, рад.

Координата по висоті має значення, коли враховується гідростатичний тиск, від якого буде залежати час і ступінь контакту вилівки з металевою формою. На початковому етапі лиття можна було б зробити три розрахунки температур: для низу, середини і верху вилівки. В даному дослідженні розглядали випадок для середини вилівка. В роботі прийнято припущення, що рішення не залежить від  $\varphi$ . Тоді, з урахуванням цього, рівняння буде мати вигляд:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial(\lambda T)}{\partial r} + \frac{\partial(\lambda T)}{r \partial r}, \quad (2)$$

де:  $T = T(r, \tau)$  – температура, К, яка залежить від координати  $r$  і часу  $\tau$ ;  $\lambda$  – теплопровідність залежить від температури і розраховується за наступною емпіричною формулою:  $\lambda = 45 - 25 \cdot (1200 - T) / 1200$  (3)

Прийнято, що якщо  $T > 1200$  °С, то  $\lambda = 45$  Вт/м×К.

При кристалізації і фазових перетвореннях слід враховувати їх ентальпію.

При кристалізації ентальпія дорівнює 65 кДж/кг×К.

Питома теплоємність розраховували як:

$$c = c_{gv} \quad T > T_l; \quad c = \frac{Q_{pl}}{(T_l - T_s)} \quad T_s \leq T \leq T_l; \quad c = c_{lv} \quad T < T_s, \quad (4)$$

де:  $T_l$  – температура початку фазової перекристалізації, К;  $T_s$  – температура кінця перекристалізації, К;  $c_{lv}$  – питома теплоємність твердої фази, кДж/кг×К;  $c_{gv}$  – питома теплоємність рідкої фази, кДж/кг×К;  $Q_{pl}$  – ентальпія при перекристалізації прийнята 18 кДж/кг×К.

У методиці розрахунку теплоємності у зоні перекристалізації  $T_s \leq T \leq T_l$  виходили з балансу тепла, який описаний в літературних джерелах. Відомо, що при кристалізації чавуну різниця  $T_l - T_s$  досягає 100 °С. Зміна теплоємності в такому інтервалі призводить до занадто грубого рішення. В роботі враховували відомий факт, що в інтервалі фазових переходів при кристалізації ентропія зазнає розрив.

З термодинаміки відомо, що ентропія є функцією стану і визначається як співвідношення теплової енергії до температури. Вважаючи, що тепла енергія



безперервна функція, то розрив у співвідношення теплової енергії до температури може бути або похідною, або супроводжуватися зміною температури (можна припустити, що, наприклад, температура в інтервалі перекристалізації змінюється настільки малими стрибками, що їх складно зафіксувати). В роботі прийнята умова, що саме температура терпить розрив між точками  $T_{l_1}$  і  $T_{s_1}$ .

Ці точки розташовані між  $T_l$  і  $T_s$ , тобто  $T_s < T_{s_1} < T_{l_1} < T_l$ . Стрибкоподібна зміна температури в зоні перекристалізації може бути викликана локальною неоднорідністю за хімічним складом (ліквацією), що відрізняється часткою залишкового аустеніту, частковим його розпадом в цьому інтервалі. В результаті, підтвердженням цього є виявлення карбідів, що відрізняються від стехіометричного складу –  $Fe_3C$  (тобто типу  $MeC$ ;  $Me_2C$ ,  $Me_xC_y$ ). Крім відмінності у вмісті вуглецю, в них розчинена деяка частка Mn, Cr, Ni, які виділяються в різних температурних інтервалах. Такі карбіди характеризуються відмінними відтінками і розмірами при описі їх за мікрофотографіями оптико-математичним методом.

$$\text{Баланс тепла описується як: } Q_{pl} = \int_{T_s}^{T_l} c dT = \int_{T_s}^{T_{s_1}} c_1 dT + \int_{T_{l_1}}^{T_l} c_1 dT, \text{ або} \quad (5)$$

$$c(T_l - T_s) = c_1 [(T_l - T_{l_1}) + (T_{s_1} - T_s)], \quad (6)$$

$$\text{звідки, враховуючи, що } c = \frac{Q_{pl}}{(T_l - T_s)}, \quad c_1 = \frac{Q_{pl}}{(T_l - T_{l_1}) + (T_{s_1} - T_s)}. \quad (7)$$

Якщо за розрахунком температура менше  $T_{l_1}$  і більше  $T_{s_1}$ , то вона приймається рівною  $T_{s_1}$ ; тим самим моделюється стрибок температур. Різниці  $T_l - T_{l_1}$  і  $T_{s_1} - T_s$  в роботі прийняті однаковими і дорівнюють  $20^\circ\text{C}$ .

Прийняті початкові і граничні умови, які й визначають конкретне рішення задачі. Брали до уваги, що граничні умови бувають трьох видів: 1-го роду, коли в певній точці  $R$  відома функція температури від часу  $T(R, \tau) = f(\tau)$ ; 2-го роду, коли певній точці  $R$  відома функція від похідної температури за координатою, яка

$$\text{відповідає: } \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = f_1(T) \quad (8)$$

У даному випадку  $f_1(T)$ , буде легко вираховувати тепловий потік від випромінювання, який залежить від температури в найближчому оточенні точки  $R$ :

$$Q = 3.8k \left[ \left( \frac{T(R) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (9)$$

де в коефіцієнт 3.8 входить ряд параметрів: ступінь чорноти поверхні;  $k$  – коефіцієнт, що враховує конвекцію;  $T_c$  – температура навколишнього середовища.

Оскільки за визначенням тепловий потік це  $\lambda \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r}$  (розмірність  $\text{Вт/м}^2$ ), то умову другого роду можливо представити у вигляді:

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = 3.8k \left\{ \left[ \frac{T(R, \tau) + 273}{100} \right]^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (10)$$

Вона відповідає зовнішній частини металевої форми, а після її зняття – зовнішній поверхні валка. Умова (10) також застосовується при обліку випромінювання між виливком і металевою формою. Якщо  $R$  відповідає внутрішній

точці металевій форми, то точка  $A$  – зовнішній частині виливка. Якщо точка  $R$  визначається зовнішньою точкою виливка, то знак слід змінити на протилежний. Наведена формула в деякій мірі аналогічна умові 3-го роду. Умова 2-го роду застосовується для центру виливка, де тепловий потік дорівнює нулю.

Умова 3-го роду застосовується, коли в певній точці  $R$  тепловий потік дорівнює коефіцієнту тепловіддачі (теплопередачі)  $\alpha$  (Вт/(м<sup>2</sup>×К) помноженому на відому функцію від різниці температур в сусідніх точках:

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = \alpha \{f_2[T(R, \tau)] - f_3[T(A, \tau)]\}, \quad (11)$$

наприклад,  $\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = \alpha [T(R, \tau) - T(A, \tau)]$ .

Розрахунок кристалізації валків в металевій формі розбивали на 2 етапи: один для валка, інший – для форми. Обидва вони пов'язані між собою тим, що тепловий потік від валка до форми один і той же. Можна було б припустити, що в початкові моменти часу це єдиний розрахунок, але він триває лічені секунди, після яких починається частковий контакт затверділої кірки на межі з формою, яка враховується за допомогою граничних умов третього роду, та коефіцієнт теплопередачі. Надалі усадка металу валка сприяє відсутності контакту між металом і формою, а граничні добре описуються умовами другого роду, в яких тепловий потік розраховується за допомогою тільки випромінювання. На межі форма – навколишнє середовище використовували граничні умови другого роду: випромінювання з урахуванням конвективної складової. Остання враховувалася за допомогою коефіцієнта 1.5 в тепловому потоці від випромінювання. Існує ще одна гранична умова для центру валка, в якому тепловий потік дорівнює нулю. Особливістю відцентрового лиття є те, що воно здійснюється порціями: спочатку заливається перший шар (робочий), потім – другий, далі – третій. Граничні умови на внутрішній частині виливка перших двох етапів заливки металу характеризують часткове випромінювання тепла в навколишнє середовище:

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = 3.8k \left\{ \left[ \frac{T(R, \tau) + 273}{100} \right]^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right\}, \quad (12)$$

де  $k$  прийнято на рівні 0.025.

Після третього етапу заливки металу гранична умова прийнята як нульовий потік в центрі валка. Тому в цих дослідженнях використовували показник узагальненої питомої теплоємності (описано вище).

При розрахунку температурне поле представляли як безперервну ділянку металевій форми та вилівок умовно поділену на кінцеве число точок з рівним кроком  $\Delta r$ , якому відповідав би крок за часом  $\Delta \tau$  і його визначали з умови стійкості різницевої схеми.

Кожній точці температури сітчастої ділянки відповідає два індекси:  $k$  (за радіусом) та  $i$  за часом. Тобто, температура записується у вигляді  $T_{ki}$ .

Рівняння в кінцевих різницях виглядає як:

$$c_{ki} \gamma_{ki} \frac{T_{k+1i} - T_{ki}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda_{k-1i} T_{k-1i} + \lambda_{k+1i} T_{k+1i} - 2\lambda_{ki} T_{ki}}{\Delta r^2} + \frac{\lambda_{k-1i} T_{ik-1i} - \lambda_{k+1i} T_{k+1i}}{2r_k \Delta r} \quad (13)$$

Для стійкості наведеної різницевої схеми потрібно, щоб:

$$\max \frac{\lambda_{ki} \Delta \tau}{c_{ki} \gamma_{ki} \Delta r^2} < 1. \quad (14)$$

Тобто, крок за часом не можна вибирати довільно, він повинен підкорятися умові:

$$\Delta \tau < \frac{c_{ki} \gamma_{ki} \Delta r^2}{\lambda_{ki}}. \quad (15)$$

Звідси, температура точки з індексом  $ki+1$  в наступний момент часу  $\tau + \Delta \tau$  (індекс  $i+1$ ) легко виразити через температури і параметри в попередній момент часу  $\tau$

$$(індекс  $i$ ):  $T_{ki+1} = T_{ki} + \frac{\Delta \tau}{c_{ki} \gamma_{ki}} \left( \frac{\lambda_{k-1} T_{k-1i} + \lambda_{k+1} T_{k+1i} - 2\lambda_{kj} T_{ki}}{\Delta r^2} + \frac{\lambda_{k-1} T_{k-1i} - \lambda_{k+1} T_{k+1i}}{2r_k \Delta r} \right). \quad (16)$$$

У кожен момент часу розраховували 2 завдання: одне для форми, інше – для виливка. Позначили через  $k_1, k_2, k_3, k_4$  номери точок, що відповідають: початковій точці форми і – кінцевій, початковій точці виливка і – кінцевій відповідно. Причому завжди  $k_1 = 1$ ,  $k_3 = k_2 + 1$ , а номер  $k_4$ , згідно з технологією лиття в відцентровій машині, змінюється з часом, доходячи до максимального значення радіусу валка плюс товщина форми (що відповідає центру виливка), поділеного на крок по радіусу

$$\text{плюс } 1: \quad k_{4\max} = \left[ \frac{a_k + r_o}{\Delta r} \right] + 1, \quad (17)$$

де  $a_k$  - товщина форми;  $r_o$  - радіус виливка;  $\left[ \frac{a_k + r_o}{\Delta r} \right]$  - характеризує цілу частину числа.

Згідно позначенням, розрахунок  $T_{ki+1}$  (значення температур в наступний момент часу) проводили, виходячи з відомих температур в попередній момент часу ( $T_{ki}$ ) за формулою (17) тільки для точок з номерами від  $k_1 + 1$  по  $k_2 - 1$  для металевої форми і з  $k_3 + 1$  по  $k_4 - 1$  для виливка. Коли номери точок дорівнюють або  $k_1 + 1$ , або  $k_2 - 1$ , або  $k_3 + 1$ , або  $k_4 - 1$ , то ця формула повинна бути доповнена розрахунком з граничних умов або  $T_{k_1+1}$ , або  $T_{k_2+1}$ , або  $T_{k_3+1}$ , або  $T_{k_4+1}$ .

Розрахунок цих величин виконували подібно, виходячи з формули теплового потоку  $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = Q$ , який в кінцево-різницевої формі має вигляд:

$$\lambda_{ki+1} \frac{T_{k-1i+1} - T_{ki+1}}{\Delta r} = Q_{ki} \quad (18),$$

$$\text{звідки} \quad T_{k-1i+1} = T_{ki} + Q_{ki} \Delta r / \lambda_{ki}. \quad (19)$$

Для більш поглибленого аналізу і визначення найбільш значущих чинників на умови кристалізації виливків при відцентровому литті виконали розрахунок коефіцієнтів  $a_0, a_1, a_2, a_3$  регресійної моделі

$$y_i = a_{0i} + a_{1i} h_k + a_{2i} t_k + a_{3i} t_c, \quad (20)$$

де  $h_k$  – товщина форми, мм;  $t_k$  – температура форми, °C;  $t_c$  – температура навколишнього середовища, °C;  $i$  – номер функції;  $a_{0i}$  – вільний член;  $a_{1i}$  – коефіцієнт при товщині форми;  $a_{2i}$  – коефіцієнт при температурі форми;  $a_{3i}$  – коефіцієнт при температурі навколишнього середовища.

Розрахунками встановлено (табл. 2), що швидкість кристалізації виливків при відцентровому литті залежить від температури нагріву металевої форми (130-210°C), навколишнього середовища (+30 і -10°C), товщини форми (200-400 мм).

Таблиця 2 – Результати розрахунку регресійних залежностей функцій, що характеризують швидкість охолодження виливків валків, від товщини, температури форми і навколишнього середовища

Параметри регресійних залежностей *								
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
01	021.121	0.031	0.497	0.472	1.050	4.023	1.580	0.877
02	003.956	0.125	0.225	0.600	3.160	2.623	3.456	0.950
03	015.884	0.229	0.289	0.050	3.525	1.932	1.006	0.924
04	031.018	0.174	0.321	0.217	2.402	2.114	1.108	0.905
05	029.862	0.214	0.324	0.697	2.271	1.680	1.667	0.894
06	003.747	0.065	0.070	0.609	1.381	1.104	2.652	0.848
07	151.794	0.239	0.950	3.439	1.217	1.800	3.228	0.894
08	084.341	0.066	0.523	1.172	1.073	2.069	2.140	0.825
09	025.494	0.119	0.081	0.029	1.831	1.089	1.002	0.571
10	041.878	0.179	0.328	0.484	1.702	1.547	1.253	0.643
11	077.731	0.107	0.314	0.386	1.803	2.620	1.522	0.909
12	053.669	0.176	0.048	1.167	1.716	1.012	2.556	0.807
13	083.363	0.125	0.174	0.816	1.314	1.142	1.661	0.763
14	026.213	0.154	0.150	1.457	1.275	1.061	2.218	0.734
15	067.959	0.095	0.216	0.081	1.583	1.698	1.021	0.835

\*) Примітка: I – номери факторів, відповідно: 01 - температура зовнішньої частини форми через 72 год., ° C; 02 – температура внутрішньої частини форми через 72 год., ° C; 03 – температура зовнішньої частини виливка через 72 год., ° C; 04 – температура на глибині 30 мм від зовнішньої частини виливка через 72 год., ° C; 05 – температура центру виливка через 72 год., ° C; 06 – різниця температур між зовнішньою частиною виливка і внутрішньої форми через 72 год., ° C; 07 – час досягнення 520 ° C зовнішньою частиною виливка, год.; 08 – час досягнення 520 ° C зовнішньою частиною виливка мінус 30 мм, год.; 09 – час досягнення 520 ° C в центрі виливки, год.; 10 – час досягнення 200 ° C в зовнішній частині виливка, год.; 11 – різниця часу досягнення 200 і 190 ° C зовнішньої частини виливка, год.; 12 – час досягнення 200 ° C від зовнішньої частини виливка на глибині 30 мм, год.; 13 – різниця часу досягнення 200 і 190 ° C зовнішньої частини виливка на глибині 30 мм, год.; 14 – час досягнення 200 ° C в центрі виливка, год; 15 – різниця часу досягнення 200 і 190 ° C в центрі виливка, г.; II - вільний член  $a_{0i}$ ; III – коефіцієнт  $a_{1i}$  при факторі 1 (товщина форми); IV – коефіцієнт  $a_{2i}$  при факторі 2 (температура нагріву форми); V – коефіцієнт  $a_{3i}$  при факторі 3 (температура навколишнього середовища); VI – значимість фактора 1 (товщина форми); VII – значимість фактора 2 (температура нагріву форми); VIII – значимість фактора 3 (температура навколишнього середовища); IX – коефіцієнт множинної кореляції

На основі отриманих рівнянь регресії, які оцінюють вплив цих параметрів, виявлено, що найбільший коефіцієнт множинної кореляції відповідає 0,95 – температурі внутрішньої поверхні форми, а найменший – 0,51 часу досягнення зовнішньої частиною виливка  $t = 520^{\circ}\text{C}$  (завершення періоду фазової перекристалізації). При цьому внесок температури навколишнього середовища можна коригувати товщиною металевої форми.

Істотний внесок в структуроутворення робочого шару валка вносить швидкість процесу кристалізації в кожній точці зовнішнього шару (визначається температурою нагріву металевої форми), тобто, чим нижче ця температура, тим швидше відбувається процес. Так, на глибині 30 мм (поряд з перехідною зоною) швидкість кристалізації знижується в два рази.

На підставі виконаних розрахунків були отримані швидкості кристалізації виливків валків (рис. 8) залиті в металеві форми товщиною 200, 300 і 400мм та нагріті до 130 і 200 °С при температурі навколишнього середовища +30 і -10 °С.

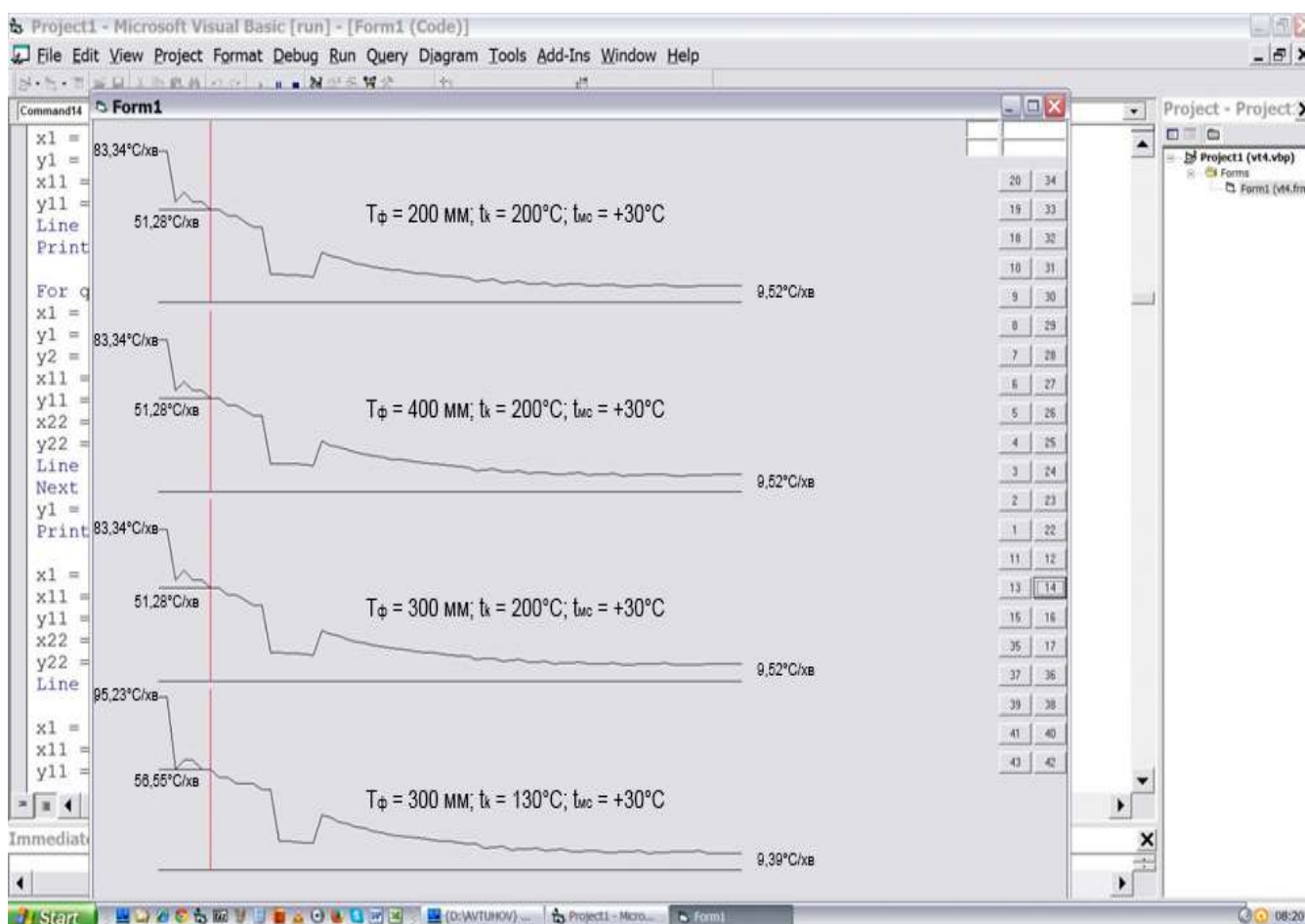


Рисунок 8 – Графічні залежності умов кристалізації виливків валків, що були залиті в металеві форми товщиною 200, 300 і 400мм, нагріті до 130 і 200 °С при температурі навколишнього середовища +30 °С

Аналізом встановлено, що на глибині 30 мм швидкість кристалізації змінюється немонотонно, що свідчить про значні неоднорідності структури на цій глибині. Починаючи з глибини 30 мм, швидкість кристалізації монотонно зменшується, приблизно, до 9,3 - 9,6 °С /хв. Виняток становлять провали в швидкостях, пов'язані з черговими порціями металу, що заливається. Швидше за все і в цих зонах структура буде відрізнятися від сусідніх – з монотонним убаванням швидкостей.

Важливим для працездатності валків є рівень напружень, що формуються в них. Для їх оцінки запропонована методика розрахунку температурних напружень по перерізу валка, яка базувалася на відомому положенні про те, що сума проєкцій сил від нерівномірного розподілу температур на кожну вісь координат повинна дорівнювати нулю. Напруги теплового навантаження оцінювали відповідно до закону Гука. Методику доповнили оцінкою пластичних деформацій, що виникають від нерівномірності розподілу при кристалізації температур і структурних перетворень (враховували один раз, після завершення фазових перетворень).

За результатами розрахунків були побудовані залежності, які характеризують рівень залишкових напружень в різних зонах вилівка валка, що формуються при їх кристалізації.

Залежності, які характеризують рівень залишкових напружень у виливках валків, що були залиті в металеві форми товщиною 200, 300 і 400 мм, нагріті до 130 і 200 °С при температурі навколишнього середовища +30 °С, представлені на рис. 9.

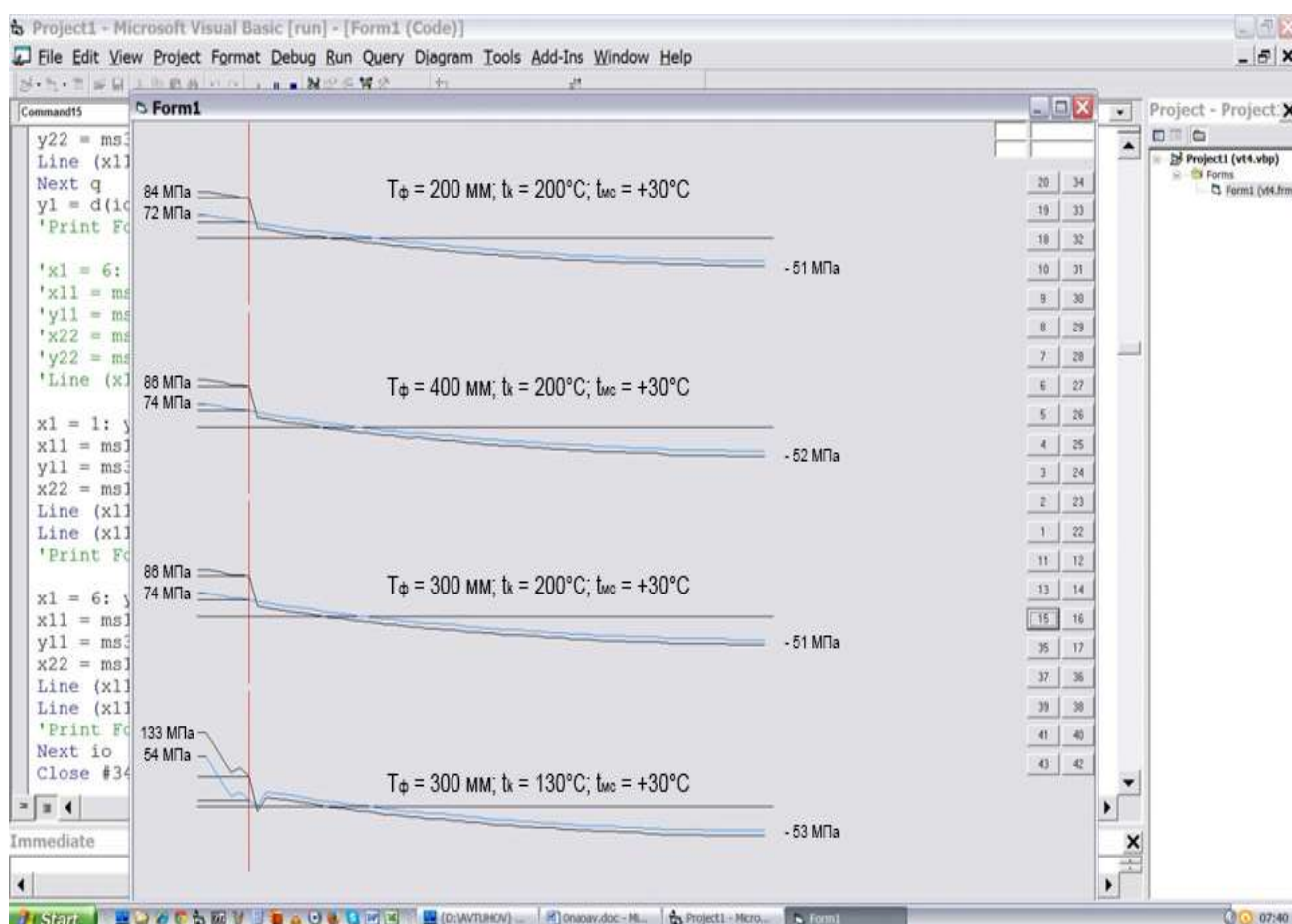


Рисунок 9 – Графічні залежності, що характеризують рівень залишкових напруг у виливках валків залитих в металеві форми товщиною 200, 300 і 400 мм, нагріті до 130 і 200 °С при температурі навколишнього середовища +30 °С

Показано, що в точках, де відбувається структурна деформація, відзначається стрибок і напруг. При нагріванні металевої форми до 200 °С напруги на поверхні вилівка складають 84-86 МПа, а - 130 °С досягають 133 МПа.

Отримані теоретичні результати використовували при коригуванні технологічного процесу.

Дослідження структуроутворення проведені з використанням оптико - математичного методу, що базується на будівлі алгебраїчних гістограм певних

кольорів, удосконаленого автором в частині оцінки графітоутворення та його зв'язку з технологічними параметрами лиття, термообробки валків, властивостями чавуну й іншими структурними складовими сплаву робочого шару. Оцінювали як роль фазового складу (частки фаз), так і основний критерій якості валків – твердість. Вивчена можливість використання неруйнівного контролю якості за коерцитивною силою, яка найбільш тісно пов'язана зі структурою металу і рівнем напруг. Саме вони вносять істотний вплив на пошкоджуваність та експлуатаційну стійкість валків.

Встановлено, що в хромонікелевих валках відцентрового лиття найбільша частка належить кольору 6 (насичене вуглецем  $\alpha$ -Fe). Частка його становить в різних зонах вилівка 33,0-46,6 %. На другому місці – карбіди 11 і 16 кольорів (не стехіометричного складу  $Fe_xC_y$  і цементит відповідно) та їх частка становить 11,0-22,9 % і 10,6-31,8 % відповідно; колір 10 належить до аустеніту і він складає кількості 6,1-14,6 %.

У хромонікелевому чавуні робочого шару листових відцентроволитих валків основними фазами є графіт, бейніт, мартенсит, цементит (структурно вільний і в складі евтектики) й аустеніт, який металографічно не ідентифікують.

Найбільша неоднорідність у розподілі фаз належить графіту, в основному, кольорів 1,2,5. Частка кольору 1 змінюється в межах 0,3-14,3%, кольору 2 - 0,4-8,5 % і кольору 5 - 0,6-5,5 % (сумарно 1,2-28,3 %).

Дослідження структуроутворення (кількості і частки фаз) від впливу різних технологічних факторів показало, що при термообробці ( $t = 600$  °C) бейніт в окремих зонах розпадається на ферит і точковий графіт, а мартенсит на ферит з утворенням нанокарбідів, що призводить до падіння твердості. Такий зв'язок фаз виявлено на основі отриманих математичних залежностей. При цьому, рівень коерцитивної сили незначно падає, оскільки залишковий аустеніт практично не розпадається, а відбувається лише зняття ливарних напруг, що знижують твердість.

Отримано рівняння регресії:

$$HS = -37.73 + 1.12 X_1 + 1.34 X_2 + 1.11 X_3 - 0.46 X_4 - 0.1 X_5 \quad (21)$$

39.27	6.56	35.43	1.49	1.008
R=0.62				

$$H_c = -56.89 + 0.72 X_1 + 0.81 X_2 + 0.95 X_3 + 1.01 X_4 + 0.49 X_5 \quad (22)$$

4.89	1.50	7.12	1.59	1.05
R=0.50,				

де:  $X_1$  – коефіцієнт при сумарній частці бейніту і мартенситу %;  $X_2$  – коефіцієнт при аустеніті %;  $X_3$  – коефіцієнт при сумарній частці карбідів %;  $X_4$  – коефіцієнт при частці графіту %;  $X_5$  – коефіцієнт при показнику неоднорідності.

При спільному впливі фаз на твердість – бейніт, аустеніт і сумарно всі типи карбідів підвищують її, а графіт - знижує. Це підтверджує факт використання ефективного методу виявлення фаз. Найбільш значущим за впливом на рівень твердості виявився на першому місці внесок бейніту (значимість = 39,3), а потім - карбідів (значимість = 35,4). Ступінь впливу аустеніту ~ в 6 разів слабкіша. На рівень коерцитивної сили більш значущий вплив надає сумарна частка фази карбиду (7,12), потім бейніту (4,9), а внесок аустеніту в три рази менший, що пов'язано з його низькою часткою в сплаві у порівнянні з іншими структурними складовими (в 3,5-4 рази).

Показано, що найбільш повний розпад залишкового аустеніту характерний при литті валків в попередньо нагріту форму до  $t = 190-210 \text{ }^\circ \text{C}$ . При таких умовах кристалізації значимість цього фактора зростає в 4,1 рази.

Відпуск валків при  $t = 600 \text{ }^\circ \text{C}$  дозволив виявити появу точкових виділень графіту і «вусиків» від його включень, що первинно виділилися (відображають границю зерен матриці). Це додатково до неоднорідного розподілу вихідних включень змінює їх частку в зонах верхньої та нижньої частин бочки.

**П'ятий розділ** «Вплив хімічного складу, технологічних параметрів процесів виробництва і відновлення робочого шару валків на структуру і властивості металу». Розділ присвячений експериментальним дослідженням.

Хромонікелеві валки стаціонарного та відцентрового способів лиття відрізняються за хімічним складом і структурою.

Мікроструктура чавуну сортопрокатних валків стаціонарного метода лиття складається з перліту, цементиту, графіту і перліто - карбідної евтектики. Карбідна фаза представлена евтектичним, вторинним, який випав з твердого розчину, і евтектоїдним цементитом, що входить до складу перліта.

Форма включень графіту згідно віддалення від поверхні валка до середини значно змінюється. На глибині 25 мм вони мають вигляд відносно коротких і розрізнених пластин, а на глибині 75-100 мм і до середини стають грубішими та довшими, кількість їх також збільшується.

Відмінною рисою валків відцентрового відливання є підвищений вміст нікелю, концентрація якого складає близько 4,0%, і вона визначає формування голчастих структур металевої матриці за умови більш швидкої кристалізації робочого шару. Для забезпечення необхідного рівня властивостей при виробництві валків враховували співвідношення нікелю до хрому. Як матеріал робочого шару досліджували хромонікелевий чавун, у якого співвідношення нікелю до хрому може знаходитися в межах: 4,2-5,33; 3,95-4,0 і 2,2-3,0. Встановлено, що співвідношення 2,2-3,0 з часткою мікролегуючих домішок 0,3-0,6 % забезпечує в робочому шарі валків формування дрібного зерна, рівномірний розподіл компактних включень графіту, що знижує схильність до сколу країв бочки при експлуатації.

На основі попереднього досвіду фахівців та спільно з співробітниками ЛНВК запропоновано сплав для робочого шару валків з гладкою бочкою, який забезпечує підвищення їх напрацювання і зниження схильності до сколювання її країв, при наступному співвідношенні компонентів, мас. %: 2,8-3,3 C; 0,8-1,0 Si; 0,5-0,7 Mn; 4,0-4,5 Ni; 1,5-1,8 Cr; 0,2-0,5 Mo; 0,02-0,15 Al; 0,02-0,2 Nb; 0,1-0,2 V; 0,01-0,05 B; інше Fe (захищений Патентом України №101550).

Виконано дослідження з вивчення впливу технологічних параметрів відливки двошарових валків на їх експлуатаційні характеристики. При проведенні досліджень визначали критерії якості прокатних валків, а саме рівень твердості (HS) та величину коерцитивної сили ( $H_c$ ) в робочому шарі. Статистичну обробку результатів спостережень здійснювали методом побудови регресійної моделі. Отримані моделі мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 H_c = & 204,04 - 0,055T_k - 0,27T_{\text{м.о.}} - 3,042M_{\text{.о.}} + 0,066B_{\text{з.о.}} - & (23) \\
 & - 0,202B_{\text{в.о.}} - 0,083O_{\text{в.о.}} + 0,26T_{\text{м.п.}} + & R=0,71 \\
 & + 11,84M_{\text{п.}} - 0,22B_{\text{з.п.}} - 0,066B_{\text{в.п.}}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 HS = & -166,42 + 0,047T_k + 0,082T_{\text{м.о.}} + 0,014M_{\text{о.}} + \\
 & + 0,151B_{\text{з.о.}} + 0,0963B_{\text{в.о.}} - 0,006O_{\text{в.о.}} + 0,038T_{\text{м.п.}} - \\
 & - 0,01M_{\text{п.}} - 0,046B_{\text{з.п.}} + 0,045B_{\text{в.п.}}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

де  $T_k$  – температура металевої форми, °С;  $T_{\text{м.о.}}$  – температура основної порції металу, °С;  $M_{\text{о.}}$  – 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 машини при витримці основної порції металу, об/хв;  $T_{\text{м.п.}}$  – температура першої порції металу серцевини, °С;  $M_{\text{п.}}$  – 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 при заливці основної порції металу, а також час заливання і витримки першої порції металу серцевини практично не впливають на рівень твердості та коерцитивної сили робочого шару валків. Збільшення таких параметрів як: температура металевої форми, температура основної порції металу, маса основної порції металу, час витримки основної порції сприяють зниженню коерцитивної сили і підвищенню твердості валків.

Вивчення впливу модифікаторів Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) на структуру робочого шару валків виконань ЛПХНМд-71 і ЛПХНМд-73 здійснювали при обробці основного металу в ковші масою від 2,1 до 2,5 т.

В якості основного показника впливу сумарного вмісту таких домішок на структуру робочого шару валків використовували коефіцієнт  $K = \frac{M_{\text{мод}}/M_{\text{мет}}}{\tau}$ , що є відношенням кількості введеного модифікатора ( $M_{\text{мод}}$ ) до обробленої маси металу ( $M_{\text{мет}}$ ) і часу його витримки ( $\tau$ ) в ковші.

У досліджуваних валках з коефіцієнтом  $K$  від 4,2 до 6,6 (1-1,5 кг сумарною часткою домішок Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant) показано, що в робочому шарі містяться великі неметалеві включення. Структура матриці металу валків верха і низу мало відрізняються та складаються з мартенситу, бейніту (незначна кількість), ледебуриту. Частка цементиту досягає 35-37 %. Графіт формується компактною форми і у вигляді – вермікулярної. Розподіл включень графіту нерівномірний, спостерігається 4-7 шт. у полі зору шліфа, розміром 45-60 мкм. Середня площа зайнята графітом складає 3 %.

У валках з коефіцієнтом  $K$  від 8,7 до 13,3 (2-3 кг сумарною часткою домішок Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant) відзначається мінімальна різниця між структурою низу і верху вилівка. Мікроструктура представлена бейнітом, ділянками мартенситу з незначною часткою троостита і цементитом (становить 30-32 %). У структурі верху бочки присутні неметалеві включення. Включення графіту точкової і компактною будови розміром до 45 мкм. У структурі низу бочки валка частка графіту дещо зростає і його включення крупніше, ніж – у верхній. Середня площа зайнята графітом складає 4 %.

У валках з коефіцієнтом  $K$  від 14,5 до 21,6 (4-5 кг сумарною часткою домішки Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant) різниці структури та форми включень графіту між верхом і низом бочки не виявлено. Графіт у поверхні компактний, його розміри 15-25 мкм, з глибиною вони збільшуються. На глибині 30 мм спостерігається компактний графіт пластівчастої форми. Середня площа зайнята

графітом 5 %. Зерно середніх розмірів, формуються дендрити тонкої будови, спрямовані в бік відведення тепла. Мікроструктура: мартенсит, бейніт, троостит, ледебурит, цементит (25-30 %).

Частка карбідної фази в валках третьої групи ( $K = 14,5-21,6$ ) в порівнянні з першою ( $K = 4,2-6,6$ ) зменшується на 5-10 %, що істотно не позначається на рівні твердості робочого шару валків, а графіт набуває компактну форму і його кількість збільшується (рис.10). Зі збільшенням кількості модифікатора верх та низ бочки мають і близьку структуру матриці як за величиною зерна, так і співвідношенням фаз.

Проведені дослідження дають можливість зробити висновок про те, що збільшення сумарної частки домішок Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant від 1 до 5 кг, що вводиться в метал робочого шару, забезпечують близьку структуру як за формою графіту, так і за величиною зерна, а також співвідношенню фаз по довжині бочки валка. Розробка захищена патентом України.

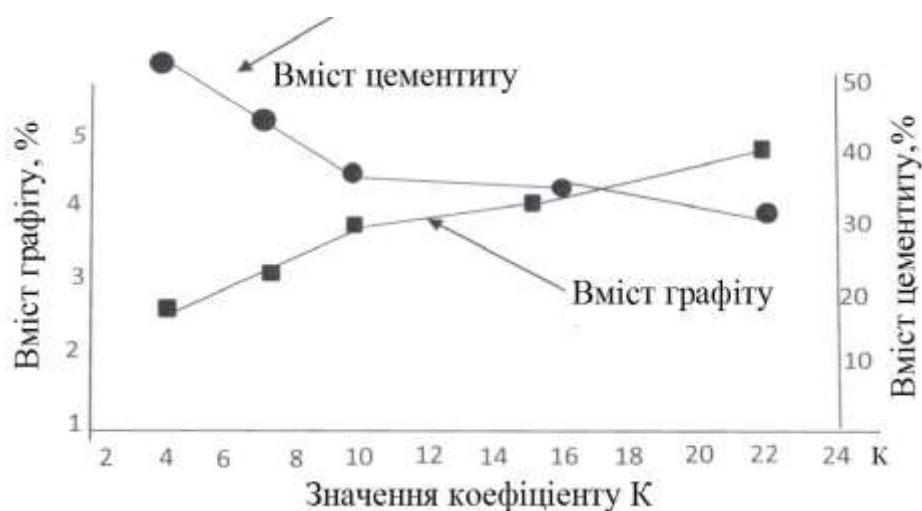


Рисунок 10 – Залежність кількості графіту і вмісту цементиту в структурі чавуну від коефіцієнта K (відношення кількості введеного в ковш модифікатора Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) щодо часу витримки основної порції металу)

Аналіз результатів обробки чавуну шлаками при виробництві валків показав, що при литті хромонікелевих валків, домішка шлакової суміші підвищує в ньому частку кремнію, марганцю, нікелю та знижує вміст шкідливих компонентів – сірки і фосфору, що пов'язано з наявністю в шлаковій суміші кальцію і магнію. Застосування шлакоутворюючої суміші (ШС) забезпечує зниження витрати легуючих елементів, підвищення якості поверхні виливків, зменшення припусків на механічну обробку. Досліджено різний склад вапняно-глиноземистих шлакових сумішей (табл.3).

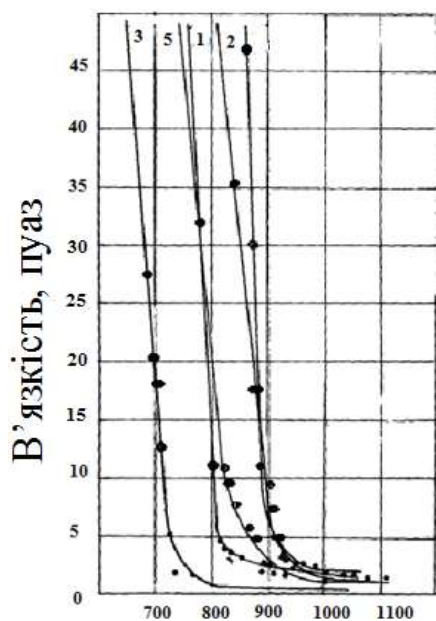
Вони відрізнялися вмістом і часткою вихідних матеріалів: плавикового шпату – від 30 до 60%, технічною борною кислотою – від 20 до 50%, кальцинованою содою – від 5 до 50% і датолітом – від 30 до 60%.

Для зниження температури плавлення і підвищення рідопротікання до складу шлаку вводили компоненти, що містять Na (силікат-брилу, натрієву селітру, кухонну сіль). Кращі результати були отримані при використанні від 7 до 15%

кухонної солі. Залежність в'язкості шлаків від температури плавлення представлені на рис. 11.

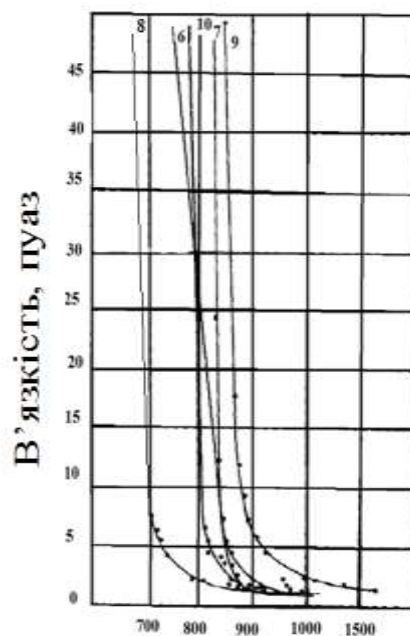
Таблиця 3. – Досліджуваний склад шлакових сумішей

№ п/п	Склад сполук ШС, %										Доміш ки	
	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	-	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	-	-	-	0,73	6
5	-	2,57	32,6	9,21	17,98	22,95	11,34	-	сліди	0,27	-	-
6	1,5	14	43,27	16,9	6	10	-	1,5	-	0,41	-	-
7	0,73	14	44	15,2	4	8,8	-	4,8	-	0,13	-	-
8	-	21	35	19,7	6	15,6	-	1,5	-	0,12	-	-
9	-	25,31	32,28	27,74	0,38	8,41	-	-	1,79	0,02	4,86	-
10	1,5	20	35	16,5	4	8	-	1,02	-	-	-	-



Температура, °C

а



Температура, °C

б

а: 1 - температура плавлення шлаку – 950 °C; 2 – 955 °C; 3 – 830 °C;  
4 – 955 °C; 5 – 880 °C;

б: 6 - температура плавлення шлаку – 955 °C; 7–960 °C; 8 – 945 °C;  
9 – 1050 °C; 10 – 975 °C.

Рисунок 11– Залежність в'язкості шлаків від температури (цифрами позначені композиції шлакових сумішей, які наведені в табл.3);

Показано, що температура плавлення ( $T_{пл}$ ) аналізованих ШС становить, в основному, 945 – 975°C, шлаки 3 і 5 мали  $T_{пл} = 830 – 850^\circ\text{C}$ , а шлак 9 – 1050°C. В'язкість шлаків при  $T_{пл}$  становила 0,8 – 5 Пуаз. Вплив  $T_{пл}$  шлаку на утворення його твердої кірки на поверхні чавуну досліджували методом математичного моделювання. При теплообміні на поверхні шлаку його шар втрачає теплоту

випромінюванням і підігрівається з боку контакту з металом. Якщо температура поверхні шлаку вище  $T_{пл}$ , тверда кірка не утворюється.

При математичному моделюванні впливу шлакових сумішей методом кінцевих різниць припускали, що шлак знаходиться в рідкому стані і конвективні потоки в ньому відсутні, а температура металу залишається незмінною, теплота з поверхні втрачається тільки випромінюванням.

Коефіцієнт теплопровідності шлаку взяли рівним  $0,64 \text{ Вт/м}\times\text{К}$ , теплоємність –  $0,23 \text{ Дж/кг}\times\text{K}$ , початкова температура металу –  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , питома вага шлаку  $2000 \text{ Н/м}^3$ , товщина шару шлаку –  $20 \text{ мм}$ . Крива охолодження поверхневого шару шлаку представлена на рис. 12, а розподіл температури в ньому для різних моментів часу – на рис. 13

За час, що відповідає періоду заливання металу валка ( $\approx 2 \text{ хв.}$ ), поверхня шлаку охолоджується до температури нижче  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для визначення впливу товщини шару шлаку, його теплопровідності й температури металу на температуру, що утворюється на поверхні шлаку через 2 хв. (час заливки форми), використовували повний факторний експеримент (план  $2^3$ ). У якості варійованих факторів обрані:  $x_1$  – товщина шару шлаку,  $x_2$  – температура оброблюваного металу,  $x_3$  – коефіцієнт теплопровідності шлаку.

Запропоновані ШС на основі датоліта і плавикового шпату з додаванням кухонної солі характеризуються необхідним рідкопротіканням. Вони швидко формуються, добре змочують кисневі включення і забезпечують підвищення якості поверхні виливків.

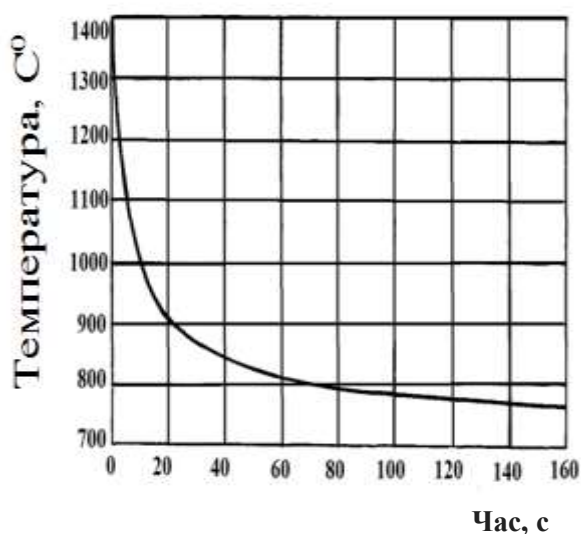


Рисунок 12 – Крива охолодження поверхневого шару шлаку за часом

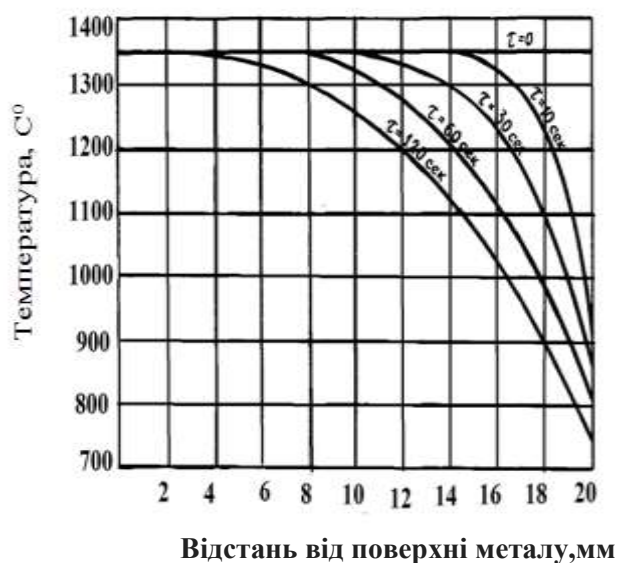


Рисунок 13 – Розподіл температури в шарі шлаку для різних моментів часу

Шлакову суміш уклали по центру на дно ковша так, щоб рідкий метал забезпечував двостороннє її плавлення, а також було використано метод часткової обробки металу з подальшою доливкою додаткових порцій. Такий спосіб є більш економічним і забезпечує краще засвоєння компонентів при високій температурі шлакової суміші. Обробка шлаковою сумішшю підвищує твердість сірого чавуну, що використовується для серцевини і шийки валків з  $200\text{--}215 \text{ НВ}$  до  $220\text{--}248 \text{ НВ}$ , а  $\sigma_B$  з  $283\text{--}312 \text{ МПа}$  до  $321\text{--}346 \text{ МПа}$ . Обробка металу шлаковою сумішшю на основі бората кальцію дозволяє знизити концентрацію нікелю з  $2,9\%$  до  $2,7\%$  для

виконання валків ЛПХНд-62 і з 4,1 до 3,51% для – ЛПХНдц-71 зі збереженням рівня властивостей.

Аналізували і вплив вакуумування на якість металу валків. Встановлено, що падіння температури металу в 30-тонному ковші під час такої обробки при частковому покритті дзеркала металу шлаком становить 3,5-5 °С/хв. При повністю віддаленому шлаку швидкість охолодження металу збільшується до 7-9 °С/хв. В результаті обробки вміст водню в металі може знижуватися на 20-60 %, кисню на 10-30 %, азоту на 10-25 %. Мікроструктура валків СПХН-48 з вакуумованого чавуну істотно не відрізняється від рядової поставки ні за кількістю, ні за розподілом структурних складових. Механічні їх властивості трохи вище, ніж поточного виробництва. Міцність при розриві підвищується, в середньому на 10 %, при вигині – на 6 %, а зносостійкість на 10 %, ніж без обробки. Стійкість таких валків на 10-15 % вище – рядової поставки.

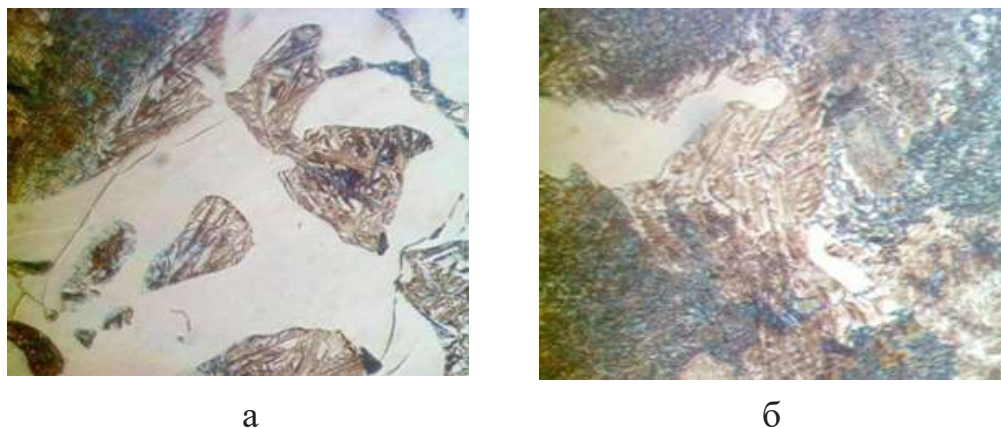
Продування азотом металу в ковші при виробництві валків з хромонікелевого чавуну сприяє зниженню вмісту неметалевих включень в робочому шарі, зниженню частки залишкового аустеніту і формуванню тонких голок мартенситу, що сприяє підвищенню експлуатаційної стійкості валків на 7,7%.

Для підвищення ресурсу валків накопичений великий досвід відновлення їх робочого шару наплавленням. Одним із складних питань при відновленні валків є вибір складу підшару, що наноситься на його поверхню перед наплавленням для отримання якісного відновленого робочого шару і забезпечення необхідного зчеплення з основою. Проведено дослідження з вивчення можливості використання в якості підшару при відновленні чавунних валків сталей 45 і 35ХГСА, отриманих методом електрошлакового переплаву (ЕШП) за технологією, розробленою фахівцями інституту Є.О. Патона.

Показано, що сталь 35ХГСА, відлита методом ЕШП, має рівень механічних властивостей, який помітно перевершує властивості цієї сталі звичайного способу виробництва. Межа міцності і плинності вище в 1,2, а ударна в'язкість – в 4,4 рази. Загальна кількість виявлених неметалічних включень в сталі, отриманій методом ЕШП в 1,5-1,8 рази менше, ніж без рафінуючого переплава.

Проведені дослідження з відновлювального електрошлакового наплавлення валків з низьколегованого хромомолібденового чавуну на сталь 45 показали, що мікроструктура підшару представляла собою ферито-перлітну суміш. Перліт відрізнявся різним ступенем дисперсності: від сильно розрідженого – до троостита. Зона термічного впливу основи неоднорідна і змінюється в межах 20-30 мкм. Вона також характеризується наявністю зерен перліту різного ступеня дисперсності. Феритна складова в ній не перевищує 1-2%. Перехідна зона відновленого валка є структурою троостита, мартенситу і цементиту (рис. 14). Аналізом мікроструктур, отриманих у вторинних електронах, виявлено наявність кисневих включень (темні включення) в зонах наплавлення і термічного впливу.

Виконані дослідження показали доцільність використання сталей 45 і 35ХГСА, відлитих методом ЕШП, як підшар з подальшим нанесенням робочого шару з чавуну, але потрібні додаткові дослідження щодо розробки параметрів попереднього підігріву й електрошлакового наплавлення, які б забезпечили мінімізацію пороутворення, підвищену зчіплюваність з перехідним шаром і відсутність дефектів у перехідній зоні.



а

б

а – перехідна зон;

б – зона термічного впливу

Рисунок 14 – Мікроструктура перехідної (а) і зони термічного впливу (б) при електрошлаковому наплавленні з підшаром зі сталі 45,  $\times 1000$

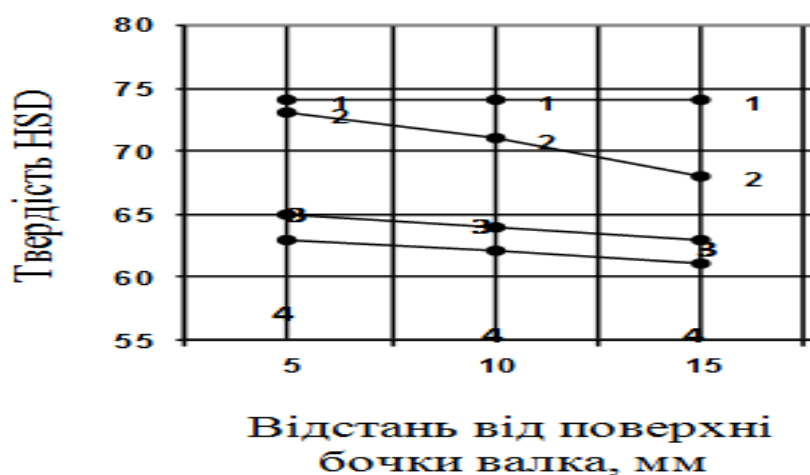
**Шостий розділ** «Експлуатаційна стійкість валків з хромонікелевого чавуну». У розділі виконано аналіз стійкості валків різних виконань.

Статистичним аналізом експлуатаційної надійності 291 робочого валка стаціонарного лиття стану 2000 встановлено, що основними чинниками їх списання є: знос, викрошки, відшарування, руйнування бочки і припік підшипників. Коефіцієнт списання валків діаметром 800 мм за зносом складає для ЛПХНд-71 – 0,494, ЛПХНд-74 – 0,778, ЛПХНд-63 – 0,52 і ЛПХНд-63 діаметром 900 мм – 0,67. В наслідок відшарування списується 4,7 % валків виконання ЛПХНд-71, 22 % – ЛПХНд-74, 12 % – ЛПХНд-63. В результаті утворення викрошок списується 5,29 % і 8 %, припикання підшипників – 16,5 % і 24 %, руйнування тріф 7,64 % і 4 % валків ЛПХНд-71 і ЛПХНд-63, відповідно. Незалежно від виконання валків, з ростом числа установок відбувається прогресуюче з 0,3-0,6 до 1,27-1,48 мм збільшення знімання металу при перешліфуванні, що пов'язано зі спадом твердості (на 2-4 НS) по його глибині.

Збільшення вихідного діаметра валків з 800 до 820 мм забезпечує підвищення їх ресурсу з 154041 т до 210050 т (на 36 %) за рахунок кількості установок. При цьому ефективність використання робочого шару знижується з 6,817 до 5,533 т/мм, через неоднорідність його товщини, що становить 12-25 мм в різних зонах по довжині бочки валка.

Для зниження руйнування валків стаціонарної виливки станів 2000 і 1700 і збільшення ефективності використання їх робочого шару рекомендована технологія лиття валків з використанням позапічної обробки шлакоутворюючими сумішами, що містять бор, які забезпечують зниження спаду твердості по глибині робочого шару 10 мм на 2,8 і 15 мм - 5,5 НS (рис.15) і збільшення їх міцності на 15,5 і 17,25 % відповідно.

При експлуатації валків, виготовлених за такою технологією, знижується коефіцієнт відмов по руйнуванням з 0,71 до 0,076, одночасно ресурс валків виконань ЛПХНд-71 підвищується на 19 %, а ЛПХНд-63 – на 11 %.



1 і 3 - валки, оброблені сумішами, що містять бор;  
2 і 4 - валки поточного виробництва

Рисунок 15 – Розподіл твердості металу по глибині робочого шару валків ЛПХНд-71 (лінії 1 і 2) (лінії 3 і 4) і ЛПХНд-63

Аналіз рівня експлуатаційної стійкості валків відцентрового лиття виконань ЛПХНМдц-71 і ЛПХНМдц-73 листового стану 1700 показав, що недоцільно застосовувати їх в комплекті в одній кліті з різною твердістю і глибиною робочого шару. Це призводить до того, що при їх списанні вони не виробляють свій ресурс.

Для визначення факторів, що впливають на експлуатаційну стійкість валків, проведено аналіз впливу хімічного складу, структури металу і рівня напружень як до, так і після термічної обробки на ці показники.

Ці параметри дозволяють оцінювати якість металу і з більшою точністю прогнозувати напрацювання валків. Перед введенням в експлуатацію валки піддавали низькотемпературній термообробці (600°C). Така обробка знімає внутрішні напруження, але не знижує частки залишкового аустеніту.

Обробку даних за двома виконаннями валків (ЛПХНМдц-71 і ЛПХНМдц-73) проводили в одній вибірці тому, що вони незначно відрізнялися за хімічним складом. Статистичну обробку результатів випробувань здійснювали методом побудови рівнянь регресії. Для оцінки ступеню вкладу хімічних компонентів, що описують вплив на показники твердості та коерцитивної сили в рівняннях регресії, співвіднесли отримані коефіцієнти при кожному факторі до вільного члену рівняння. Виявлено, що середній рівень твердості знижують основні компоненти, а також і домішки, введені з шихтою. Є не типовим негативний вплив хрому на зниження рівня твердості. Спостережуване, ймовірно пов'язано з тим, що при такій його концентрації, розчиняючись в карбіді цементитного типу, цей елемент не сприяє збільшенню загальної частки карбідної фази при відцентровому литті валків (в умовах швидкої кристалізації робочого шару і стабільних температурних параметрів лиття). Концентрація хрому в карбідній фазі, за даними мікроспектрального аналізу, практично не змінюється.

Аналіз рівнянь регресії показує, що твердість валків підвищується за рахунок наявності в сплаві таких елементів, як Cu, Nb, Co, V, W, Zr. Їх вплив проявляється як на підвищенні твердості цементиту (W, V), кристалізації спецкарбідів (V, Nb), так і зміцненні матриці (Co, Cu). Методом мікрорентгеноспектрального аналізу виявлено

неоднорідність у розподілі компонентів з малим їх вмістом. Аналіз впливу компонентів сплаву на величину коерцитивної сили показав, що середній її рівень в інтервалі концентрацій, що аналізується, підвищують елементи С, Si, Mn, Cr, Mo, Al, Co і модифікуюча домішка – Ti, а знижують – Ni і мікролегуючі компоненти V, W, Zr, B.

З огляду на низькі вихідні концентрації компонентів в хромонікелевому чавуні Co, Cu, Nb, Ti, Zr, B і Al, які становлять не більше 0,02-0,005 % кожного, то їх внесок в показники HS і  $H_c$  можна вважати менш значущим, ніж вплив вуглецю, кремнію, марганцю і нікелю. Внесок модифікуючих та мікролегуючих домішок слід розглядати тільки як спосіб подрібнення зерна і рафінування металу. Їх вплив проявляється як в зміні рівня твердості, так і коерцитивної сили.

Дослідження впливу структури, твердості і коерцитивної сили на експлуатаційні характеристики хромонікелевих валків відцентрового лиття дозволили встановити, що валки з твердістю 78 HS, в структурі яких частка графіту не перевищує 4 % і величина зерна становить 3-7 мкм, мають більш високу експлуатаційну стійкість в порівнянні з тими, у яких ці показники становлять 71 HS, 7-10 % і 10-12 мкм відповідно. Найбільш високий рівень експлуатаційної стійкості мають валки з рівнем коерцитивної сили не більше 23-24 А/см. Дослідження з оцінки основних технологічних параметрів лиття двошарових прокатних валків дозволили забезпечити як енергозбереження (за рахунок відмови від проведення термообробки при забезпеченні оптимальних показників  $H_c$ ), так і зниження напружень у виливках, а також мінімізувати частку залишкового аустеніту.

Для перевірки ефективності розробок спеціально аналізували вибірку валків, у яких метал робочого шару (був вагою 2-3 т), температура його заливання перебувала в діапазоні 1380-1420 °С в попередньо висушені та підігріті форми до  $t = 130-220^\circ\text{C}$  з нанесенням теплоізоляційних покриттів товщиною 3,1-3,5 мм. Число обертів машини при кристалізації робочого шару і першої порції металу серцевини змінювалося в межах від 460 до 480 об./хв. Досліджувані валки поділили на чотири групи. Перша, у яких температура форми при заливанні металу перебувала в межах 130-156 °С, друга – 157-189 °С, третя 190-210 °С, четверта – вище 210 °С (табл. 4). Найбільше напрацювання мають валки 3 і 4 групи.

Результати аналізу зміни усереднених показників твердості і коерцитивної сили в робочому шарі прокатних валків, відлитих відцентровим способом, до і після термообробки (відпал  $t = 600^\circ\text{C}$ ) показали, що мінімальне зниження твердості і максимальне зниження коерцитивної сили мають валки третьої групи, відлиті в металеві форми, що були нагріті до температури 190-210 °С (відповідає магнітному перетворенню фази карбиду). При такій температурі форми охолодження робочого шару відбувається з його витримкою протягом 5-6 год. в цьому температурному інтервалі, що є достатнім для найбільш повного розпаду аустеніту за рахунок фазового наклепу без проведення додаткової термічної обробки.

Для збільшення ресурсу валків доцільно кліті комплектувати валками з однаковим рівнем коерцитивної сили. Це дозволить забезпечити максимальне використання робочого шару. При підборі комплекту валків по  $H_c$ , значення яких не відрізнялися більш ніж на 10-15%, їх знос за закладку на стані 2000 був максимальним і становив 0,98-0,99 мм (середній показник 0,98), а на стані 1700 – 0,96-1,07 (середній показник 1,01). Середні показники напрацювання комплектів



валків, підібраних за коерцитивною силою, були на 17,3 % (стан 2000) і 7,98 % (стан 1700) вище, ніж у комплектів, які враховують твердість.

Таблиця 4 – Показники експлуатаційної стійкості робочих двошарових валків стану 1700 виконання ЛПХНМдц

Номер групи валків	Нарабіток на валок, т	Твердість, HS	Коерцитивна сила, Нс, А/см	Кількість установок, шт.	Товщина зношеного шару, мм
1	$\frac{7123,4 - 72306}{71770}$	$\frac{71-75}{73}$	$\frac{21,8 - 32,4}{27,1}$	$\frac{39-40}{39,5}$	$\frac{25-40}{32,5}$
2	$\frac{73224 - 74160}{73536}$	$\frac{71-78}{74}$	$\frac{22,6 - 32,9}{29,0}$	$\frac{39-40}{36,3}$	$\frac{30-40}{34,0}$
3	$\frac{75548 - 75643}{75610,5}$	$\frac{71-76}{73}$	$\frac{23,5 - 30,4}{22,5}$	$\frac{43-47}{45,0}$	28,0
4	77810	$\frac{71-76}{73}$	$\frac{22,9 - 23,0}{22,9}$	47	$\frac{25-28}{26,5}$

Примітка: в знаменнику наведені середні значення показників.

Рекомендовані параметри регулювання умов кристалізації шляхом оптимізації температури нагріву металевої форми при відцентровому литті валків і спосіб підбору їх в комплект при експлуатації захищені патентами України (№101535 та №105761).

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.

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 – проводили вибір оціночних показників конкурентоспроможності запропонованих інноваційних рішень.

У розрахунках враховували вплив вдосконалення способів виливків, контролю якості та використання ефективного способу їх комплектування в експлуатації, а також результати дослідження щодо оптимізації хімічного складу, запровадження мікролегуючих домішок, модифікаторів. Одночасно оцінювали вплив вакуумування, обробку чавуну шлаками, продування азотом у ступінь їхнього внеску в зміни показників якості валків.

На другому – обробляли інформацію щодо підприємств постачальників і споживачів продукції. На третьому і четвертому – виконували статистичний аналіз отриманих показників і оцінок результатів.

Фактичний економічний ефект від впровадження інноваційних пропозицій на ДП «Лутугинський науково-виробничий валковий комбінат» склав 1,6 млн. грн. лише при обсязі виробництва 2100 т валків на рік.

## ВИСНОВКИ

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. Виконано дослідження щодо визначення впливу хімічного складу і технологічних параметрів лиття валків на структуру металу та їх оцінчі характеристики. Запропоновано методики теоретичного опису умов кристалізації багат шарових виливків, що дозволяють оцінити особливості формування температурного поля і структуроутворення при дозованому порціонному заливанні валків. 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. Це дозволило обґрунтувати оптимальний хімічний склад, застосувати в якості модифікаторів нове покоління домішок Superseed® 75 (Sp) і Reseed® (Rd) Inoculant, знизити частку залишкового аустеніту і напружений стан, що оцінювали за величиною коерцитивної сили  $H_c$ .

3. Встановлено, що основними чинниками порушення працездатності валків є: знос, пошкодження бочки та руйнування робочого шару (відшаровування і викрошки), руйнування шийок і тріфів, 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 напрацювання в міжремонтні періоди.

4. Визначено, що при експлуатації інтенсивність розвитку пошкоджуваності робочої 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 надають: графітизація, окислення,  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення, що виникають, наявність неметалевих включень в металі. Найбільший вплив на зниження довговічності надають  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення, пов'язані з великими циклічними тисками навантажень.

5. Доведено, що найбільш ефективним є використання валків, відлитих відцентровим методом. У хромонікелевому чавуні їх робочого шару основними фазами є графіт, бейніт, мартенсит, цементит (структурно вільний і в складі евтектики) та аустеніт, який металографічно не ідентифікується. На основі теоретичного опису характеру процесів, що відбуваються при сформованому температурному полі та структуроутворенні при дозованому порціонному заливанні шарів (робочого шару і серцевини), з урахуванням рівня виникаючих напруг,

виконана оцінка характеру кристалізації виливків. Такий підхід дозволив розробити науково обґрунтовані рекомендації та провести коригування технологічних параметрів лиття, забезпечити максимальний розпад залишкового аустеніту до 8,3 % і запропонувати менш витратне та ефективне виробництво двошарових хромонікелевих валків з регламентованим їх охолодженням в формі.

6. 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.

7. Розроблені методи за межами пічного рафінування, які дають внесок у підвищення якості прокатних валків та їх більш ефективне використання.

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. При виробництві валків обробка металу сумішшю шлаку, в основі якої є борат кальцію, дозволяє знизити концентрацію нікелю з 2,9 % до 2,7 % для виконання ЛПХНд-62 і з 4,1 до 3,51 % для - ЛПХНдц-71 зі збереженням рівня властивостей.

Продування азотом металу робочого шару в ковші сприяє зниженню вмісту неметалевих включень, частки залишкового аустеніту і формуванню тонких голок мартенситу, що забезпечує підвищення експлуатаційної стійкості валків на 7,98 %.

Вакуумування дозволяє знизити вміст водню в металі на 20-60 %, кисню – на 10-30 %, азоту – на 10-25 %. Мікроструктура валків з вакуумованого чавуну істотно не відрізняється від сплаву звичайної поставки як за кількістю, так і за розподілом структурних складових, а механічні та експлуатаційні властивості підвищуються  $\sigma_B$  на 10 %,  $\sigma_{зг}$  на 6 %, що забезпечує підвищення їх стійкості на 10-15 %.

8. 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. Потрібні додаткові дослідження щодо розробки параметрів попереднього підігріву й електрошлакового наплавлення, які б забезпечили мінімізацію пороутворення, підвищену зчіплюваність з перехідним шаром і відсутність дефектів на межі поділу.

9. 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 (сумарна частка інших мікролегуючих домішок до – 0,15-0,6%). Модифікування рекомендується здійснювати домішками Superseed® 75 і Reseed® Inoculant. Частку модифікуючої домішки такої суміші і час витримки металу робочого шару перед заливанням у форму слід оцінювати співвідношенням відповідно до коефіцієнта 
$$K = \frac{M_{\text{мод}}/M_{\text{мет}}}{\tau} = 14,5-21,6,$$
 що є відношенням кількості введеного модифікатора ( $M_{\text{мод}}$ ) до обробленої маси металу ( $M_{\text{мет}}$ ) і часу його витримки ( $\tau$ ) в ковші.

Запропоновані хімічний склад і спосіб отримання чавуну забезпечують в робочому шарі валків формування дрібного зерна, рівномірний розподіл компактних

включень графіту й однорідної структури металу по довжині й перетину бочки, знижують схильність до сколювання її торців при експлуатації.

Додатково підвищення експлуатаційної стійкості прокатного інструменту досягнуто підбором валків виконання ЛПХНдц-71 в комплект з близькими геометричними розмірами, твердістю і рівнем коерцитивної сили. Це дозволило підвищити їх наробіток на стані 2000 на 17,3%, а на стані 1700 – 7,98%.

10. 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 на ДП «Лутугинський науково-виробничий валковий комбінат», що склало 1600 тис. грн при обсязі випуску такої продукції 2100 т на рік.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. 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. 231с.

2. Применение шлакообразующих смесей при производстве и реновации изделий: монографія / Т. С. Скобло, А. К. Автухов и др.; Под ред. д.т.н., проф. Т. С. Скобло. Харьков: «Полосатая типография», 2016. 284с.

3. Автухов А. К. Повышение срока службы прокатных валков. *Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. Вісник ХНТУСГ.Х.: ХНТУСГ, 2014. Вип. 146. С. 77-84.*

4. Скобло Т. С., Автухов А. К., Соколов Р. Г. Влияние технологических параметров отливки двухслойных валков на их твердость и коэрцитивную силу. *Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ Х.: ХНТУСГ, 2014. Вип. 151. С. 108-113.*

5. Автухов А. К. Влияние способа производства и химического состава хромоникелевого чугуна на основные оценочные критерии прокатных валков. *Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник ХНТУСГ Х.: ХНТУСГ, 2015. Вип.158. С. 263-270.*

6. Avtukhov A. Analysis of structure formation stability in the centrifugal cast plate rolls of nickel-chromium cast iron when entering inoculant feedings. *Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 9. P. 1080-1084.*

7. Автухов А. К. Подбор в комплект двухслойных хромоникелевых валков исполнения ЛПХНМд. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Х.: НТУ «ХПІ», 2015. №24 (1133). С. 3-8.*

8. Скобло Т. С., Автухов А. К., Белкин Е. Л. Оптико-математический анализ структурообразования рабочего слоя валков исполнения ЛПХНМдц. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Х.: НТУ «ХПІ», 2015. №48(1167). С. 57- 61.*

9. Скобло Т. С., Автухов А. К., Сидашенко А. И. Разработка энергосберегающей технологии производства листопркатных валков. *Экология и*

*промышленность.* – 2015. №4(45). С. 87-91.

10. Автухов А. К. Прогрессивные направления повышения эксплуатационной стойкости валков из хромоникелевого чугуна. *Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник ХНТУСГ Х.: ХНТУСГ, 2016. Вип.168. С. 156-169.*

11. Скобло Т. С., Автухов А. К., Белкин Е. Л. Методический подход оценки условий кристаллизации двухслойных чугуновых отливок для производства листопркатных валков. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки».* Луцьк. 2016. Вип. №53. С. 165-169.

12. Скобло Т. С., Автухов А. К., Белкин Е. Л. Методика расчета термических деформации и температурных напряжений в прокатных валках при их кристаллизации. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки».* Луцьк. 2016. Вип. №54. С. 174-179.

13. Автухов А.К. Обобщение разработок по использованию и производству хромоникелевого чугуна для изготовления прокатных валков. *Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник ХНТУСГ Х.: ХНТУСГ, 2017. Вип.183. С. 64-76.*

14. Скобло Т. С., Пасько Н. С., Автухов А. К. Шлаковые смеси для валковых расплавов. *Металлургия машиностроения.* 2014. №2. С. 9-11.

15. Скобло Т. С., Автухов А. К., Климанчук В. В. Характеристика процессов, влияющих на интенсивность разрушения рабочей поверхности прокатных валков. *Сталь.* 2014. №11. С. 82-85.

16. Скобло Т. С., Автухов А. К., Соколов Р. Г. Влияние модификаторов нового поколения Superseed® 75 и Reseed® на структуру металла центробежнолитых листопркатных валков. *Литейное производство.* 2015. №2. С. 12-14.

17. Скобло Т.С., Автухов А. К., Соколов Р. Г. Особенности структурообразования карбидной фазы хромоникелевого чугуна прокатных валков. *Научное обозрение.* 2015. №22. С. 178-183.

18. Скобло Т. С. Автухов А. К., Климанчук В. В. Причины и характеристика отказов листопркатных валков станов горячей прокатки. *Металлургия машиностроения.* 2014. №3. С. 14-17.

19. Скобло Т. С., Автухов А. К., Соколов Р. Г. Анализ эксплуатационной стойкости двухслойных чугуновых валков. *Сталь.* 2015. №2. С. 34-37.

20. Автухов А.К. Исследование влияния продувки азотом на формирование структуры металла рабочего слоя валков исполнения ЛПХНМдц. *Машиностроение: сетевой электронный журнал.* 2015. Т.3, №4. С. 9-12.

21. Оценка влияния параметров отливки двухслойных листопркатных валков на скорость кристаллизации и распределение остаточных напряжений. Скобло Т. С. Автухов А. К. и др. *Сталь.* 2016. №10. С. 34-38.

22. 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. Х.: НТУ «ХПІ», 2017. №43(1265). С. 5-9.

23. Теоретическая оценка условий кристаллизации отливок листопркатных валков. Скобло Т. С. Автухов А. К. и др. *Науковий журнал. Технічний сервіс*

агропромислового, лісового та транспортного комплексів. Х.: ХНТУСГ. 2018. №12. С.141-146

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

24. Скобло Т. С., Автухов А. К., Соколов Р. Г. Опыт эксплуатации рабочих валков стана 2000. *Научният потенциал на света-13*. Материали за IX международна научна практична конференци. Болгария. 2013. Том 20. С. 13-27.

25. Скобло Т. С., Автухов А.К. Особенности формирования тонкой структуры карбидной фазы при кристаллизации и эксплуатации в условиях циклического воздействия. *Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов*. Материали XXII Уральской школы металловедов-термистов. Оренбург. 2014. С. 119-121.

26. Автухов А.К. Оптимізація технологічних параметрів виготовлення прокатних валків з хромонікелевого чавуну. *Проблеми математичного моделювання*: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф., м. Кам'янське 23-25 трав. 2018 р. Кам'янське: ДДТУ, 2018. С.178

27. Автухов А.К., Скобло Т.С. Особливості розподілу хімічних елементів у фазах відцентроволитих валків з хромонікелевого модифікованого чавуну. *Збірник тез доповідей VII Всеукраїнській науково практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Підвищення надійності машин і обладнання»* : Крапивницький: ЦНТУ, 2018. С .137

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

28. Автухов А. К. Методичні засади оцінки економічної ефективності у технологіях виробництва прокатних валків. *Актуальні проблеми інноваційної економіки*. 2017. №2. С. 25-31.

29. Зносостійкий чавун: пат. №94040 Україна, МПК(2014.01) С22С 37/00, № u 2014 05232; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. №20.

30. Спосіб комплектування прокатних валків: Пат. №101535 Україна, МПК(2015.01) В21В 31/00, В21В 21/00 № u 2014 12083; заявл. 10.11.2014; опубл. 25.09.2015, Бюл. №18.

31. Чавун робочого шару двошарових прокатних валків: Пат. №101550 Україна, МПК (2015.01) С22С37/06, С22С37/08, С22С37/10 № u 2015 00918; заявл. 05.02.2015; опубл. 25.09.2015, Бюл. №18.

32. Спосіб виробництва прокатних валків: Пат. №105761 Україна, МПК (2016.01) В21В27/00, В22D 23/00 № u 2015 07442; заявл. 24.07.2015; опубл.11.04.2016, Бюл. №7.

33. Автухов А. К., Скобло Т. С. Высокоуглеродистые материалы для валков шаропркатных станов. Харьков: Украинская информационная корпорация «УКРНТИ», 1992. 2 с. (Препринт / ХЦНТЭИ №304-92)

34.Скобло Т.С., Автухов А. К., Пасько Н. С. Исследование влияния вакуумирования на качество прокатных валков. *Промышленность в фокусе*. 2013. №7. С. 54-58.

35.Скобло Т. С., Пасько Н. С., Автухов А. К. Шлаковые смеси для валковых расплавов. *Промышленность в фокусе*. 2016. №9. С. 55-58.

36. Технологии восстановления прокатных валков наплавкой /Т. С. Скобло, та ін.; *Промышленность в фокусе*. 2017. №9. С. 53-58.

### АНОТАЦІЯ

**Автухов А.К.** Науково-технологічні основи структуроутворення для підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну шляхом розробки нових підходів до теоретичних, технологічних і експериментальним основ їх виробництва, ремонту, експлуатації, а також обґрунтуванню використання ефективних матеріалів з оптимальним легуванням і модифікуванням для їх виготовлення.

Виконано дослідження щодо визначення впливу хімічного складу і технологічних параметрів вилівки валків на структуру металу та їх оціночні характеристики. Запропоновано методики теоретичного опису умов кристалізації багат шарових виливків, що дозволяють оцінити особливості формування температурного поля, структуроутворення і рівня виникаючих напруг при дозованому порціонному заливанні валків.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження щодо вивчення впливу технологічних параметрів вилівки двошарових валків на їх експлуатаційні характеристики.

У якості матеріала робочого шару валків запропоновано новий склад хромонікелевого чавуну, легованого хромом, нікелем, міддю, молібденом, мікролегованого ванадієм, ніобієм і бором.

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

Результати виконаних прикладних досліджень впроваджені на ДП «Лутугинський науково-виробничий валковий комбінат».

**Ключові слова:** легований чавун, хімічний склад, прокатні валки, відцентрове лиття, модифікування, структуроутворення, напруження, технологічні параметри, критерії якості.

### АННОТАЦИЯ

**Автухова А.К.** Научно-технологические основы структурообразования для повышения долговечности прокатных валков из хромоникелевого чугуна. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко. Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы повышения долговечности прокатных валков из хромоникелевого чугуна путем разработки

новых подходов к теоретическим, технологическим и экспериментальным основам их производства, ремонта, эксплуатации, а также обоснованию использования эффективных материалов с оптимальным легированием и модифицированием для их изготовления.

На основе обобщения публикаций литературных источников и патентов об условиях производства валков предложены инновационные направления овышения их эксплуатационной стойкости.

Выполненные исследования эксплуатационной стойкости валков. Установлены основные причины нарушений их работоспособности: износ, повреждение бочки и разрушения рабочего слоя (отслаивание и выкрошки), разрушения шеек и трещины, сколы торцов бочки, а также дефекты металла, формируемые при отливке

Определены факторы, влияющие на неудовлетворительное качество литых валков с чугунов. К ним относятся: отклонения химического состава, повышенное содержание вредных примесей, засоренность расплавов компонентами, не обусловленными нормативно-технической документацией, неэффективное модификации, нарушения температурных режимов плавки и заливки жидкого раствора в форму, некачественная подготовка литейной формы, несоблюдение технологических регламентов охлаждения валков в форме и параметров их термообработки, недостаточная глубина рабочего слоя и формирования в нем дефектов, неоднородность структуры металла, зональная ликвация компонентов.

Разработана методология, включающая теоретические и экспериментальные исследования по разработке и корректировке параметров энергосберегающих технологических процессов производства крупногабаритных отливок массой 5-10 т.

Выполнены исследования по определению влияния химического состава и технологических параметров отливки валков на структуру металла и их оценочные характеристики. Предложены методики теоретического описания условий кристаллизации многослойных отливок, позволяющие оценить особенности формирования температурного поля, структурообразования и уровня возникающих напряжений при дозированной порционной заливке валков.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования по изучению влияния технологических параметров отливки двухслойных валков на их эксплуатационные характеристики.

Исследованиями изучено влияние известково-глиноземистый шлаковых смесей на повышение качества металла и поверхность отливок. Обработка чугуна шлаковыми смесями при производстве валков обеспечивает повышение в нем доли кремния, марганца, никеля и снижает содержание вредных примесей - серы и фосфора, что связано с наличием в шлаках таких компонентов как кальций и магний. Применение шлакообразующие смеси, кроме повышения качества металла и поверхности отливок, обеспечивает снижение расхода легирующих элементов, уменьшение объема механической обработки и припусков.

Полученные результаты исследований влияния продувки азотом металла рабочего слоя в ковше при производстве валков с хромоникелевого чугуна обнаружили снижение содержания неметаллических включений, доли остаточного аустенита и формирования тонкоиглольчатого мартенсита.

Показано влияние вакуумирования на снижение содержания газов - водорода, кислорода и азота в металле валков и за счет этого повышение уровня его



механических и эксплуатационных характеристик. Микроструктура валков СПХН-48 вакуумированного чугуна существенно не отличается от структуры валков рядовой поставки ни по количеству, ни по распределению структурных составляющих. Результаты испытаний показали, что стойкость валков из вакуумированного чугуна на 10-15% выше - рядовой поставки.

В качестве материала рабочего слоя валков предложен новый состав хромоникелевого чугуна, легированного хромом, никелем, медью, молибденом, микролегированного ванадием, ниобием и бором.

Выполненные в работе исследования направлены на создание эффективных и менее затратных технологий производства валков с хромоникелевого чугуна, обеспечивают и повышение их работоспособности в процессе эксплуатации.

Для практического применения научных и экспериментальных результатов предложена технология снижения расхода валков и экономии энергоресурсов регламентированным охлаждением при кристаллизации отливок в форме, разработаны предложения по увеличению ресурса на основе нового подхода подбора валков в комплект.

Результаты выполненных прикладных исследований внедрены на ГП «Лутугинский научно-производственный валковый комбинат».

Ключевые слова: легированный чугун, химический состав, прокатные валки, центробежная отливка, модифицирование, структурообразования, напряжения, технологические параметры, критерии качества.

## ABSTRACT

A. Avtuhov Scientific and technological bases of structure to improve the durability of the rolls of chromium-nickel-iron. – The manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.02.01 – materials. – Kharkov National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko. The Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2018.

The thesis is devoted to solving scientific and applied problem of increasing longevity rolls of chromium-nickel-iron through the development of new approaches to theoretical, experimental and technological bases of production, maintenance, operation, and justification of the use of efficient materials with optimal doping and modification to make them.

On the basis of summarizing the literature publications and patents concerning the conditions of production rolls offered innovative areas improve their operational resilience.

The investigation was executed of operational stability of rolls. The basic causes of violations of their performance, wear, damage and destruction barrels working layer (peeling and demaging parts) destruction necks and clubs since the ends of the barrel and metal defects, formed during casting.

The factors that affect the poor quality of the cast iron rolls. These include: diversion of chemical composition, high content of harmful impurities, debris melts the components, not due to regulatory and technical documentation, ineffective modification, violation of temperature conditions of melting and pouring liquid solution in the form of poor quality training mold non technical regulations cooling rolls in the form and parameters of heat treatment, lack of depth working layer and formation of defects in it, the heterogeneity of

metal structure, zonal segregation of components .

The methodology was worked out that includes theoretical and experimental research on the development and adjustment of parameters of energy-efficient production processes of large-size castings weighing 5-10 tons. The research was executed to determine the impact of the chemical composition and process parameters on the casting rolls metal structure and their performance characteristics. The methods of theoretical description of multi-casting crystallization conditions to assess the features of the formation and structure of the temperature field in the dosed filling unit dose rolls. Based on the theoretical description of the nature of the processes occurring at the established temperature field and of structure formation in the dosage portioned filling layers (working layer and core), with the level arising stresses the estimation of character crystallization castings.

The theoretical and experimental research was conducted to study the impact of technological parameters of two-layer casting rolls on their performance.

Research has studied the effect of slag lime-alumina compounds to improve the quality of metal and the surface of castings. Treatment of iron slag mixtures in the production of rolls it enhances particle silicon, manganese, nickel and reduces harmful impurities - sulfur and phosphorus, due to the presence of slag components such as calcium and magnesium. The use of slag-forming mixtures, besides improving the quality of the metal and the surface of castings, provides lower cost alloying elements, reducing machining and allowances.

The results of research influence nitrogen purge working layer metal buckets in the production of chromium-nickel-iron rolls revealed reduction of non-metallic inclusions, particles retained austenite and martensite formation .

The influence of vacuum on reduction of gases - hydrogen, oxygen and nitrogen in the metal rolls and thus improving its mechanical and performance. Microstructure rolls SPHN-48 with iron vacuumed not significantly different from that of an ordinary supply rolls or in the number or the distribution of structural components. Test results showed that the stability of the evacuated iron rolls 10-15% higher - ordinary delivery.

As the material of the working layer of rolls proposed new composition of chromium-nickel-iron alloyed with chromium, nickel, copper, molybdenum, vanadium microalloyed, niobium and boron.

The investigation was carried out aimed at establishing efficient and less costly production technology of chromium-nickel-iron rolls, ensuring and improving their efficiency during operation.

For the practical application of scientific and experimental results suggested reducing technology costs and energy savings rollers regulated cooling during crystallization in the form proposals for increasing the resource based on a new approach to the selection of kit.

The results of the applied research implemented at SE "Lutuginsky scientific and production roll plant."

**Keywords:** alloyed cast iron, chemical composition, rolls, centrifugal casting, modification, structure, stress, process parameters, quality criteria.

