

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка

Клочко Оксана Юріївна



УДК 669.1.017: 51-74

**ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ
СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ
ХРОМОВМІСНИХ СПЛАВІВ ТА ПОКРИТТІВ**

05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків 2019

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 технологічних систем
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
Роїк Тетяна Анатоліївна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри технології
поліграфічного виробництва;

доктор технічних наук, професор
Слинько Георгій Іванович,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання

Захист відбудеться «24» грудня 2019 року о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 при Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м.Харків, вул. Алчевських, 44.

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

Автореферат розісланий « 20 » листопада 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Є.І. Калінін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підприємства машинобудування і чорної металургії України на даний час переорієнтуються на ринок високих технологій, які характерні для країн ЄС, що вимагає у вітчизняному виробництві розробки нових, сучасних способів отримання продукції. У зв'язку з цим стає актуальним пошук нових шляхів забезпечення підвищення рівня показників, які відповідають сучасним вимогам. Це особливо важливо для виробів, які працюють в умовах високих питомих тисків, ударних навантажень, тертя і зношування, а також підпадають під вплив термоциклічного нагріву до підвищених температур. Такі умови експлуатації потребують активізації змін процесів структуроутворення в умовах зростання напруженого стану фаз металу, що визначають ступінь деградації робочої поверхні. Кінетика і механізм розвитку процесів пошкоджуваності робочого шару залежить не тільки від умов експлуатації, але і матеріалу виробу. Для їх виготовлення широко застосовують хромовмісні конструкційні матеріали. Забезпечення їх надійної роботи та підвищення експлуатаційної стійкості визначаються стабільністю властивостей, процесами структуроутворення, що протікають при різних технологіях їх виробництва і умовах експлуатації.

Тому рішення задач підвищення експлуатаційної стійкості виробів, що працюють в напружених умовах, повинно здійснюватися за основними напрямками розробок, що включають вдосконалення існуючих і створення сучасних інноваційних технологічних процесів; оптимізацію хімічного складу застосовуваних матеріалів з розробкою нових; ефективні способи термічної обробки; відновлення робочої поверхні. Вирішення цих завдань вимагає розробки надійних методів контролю якості та основних оціночних критеріїв, що включають теоретичні та експериментальні оцінки, за допомогою яких можливо коригувати структуроутворення і властивостями. Проте, пошук таких шляхів для великогабаритних виробів може бути утруднений, оскільки експериментальні методи з використанням виливки дослідних проб і лабораторних випробувань, не будуть відповідати натурним виробам і умовам їх експлуатації.

Рішення даної проблеми можливо реалізувати за допомогою нових напрямів, спрямованих на виявлення факторів і закономірностей, що визначають підвищення рівня властивостей, шляхом створення необхідних умов і параметрів виробництва. Такий напрям досліджень може бути реалізовано на основі побудови математичних моделей з оцінкою структурного стану для різних матеріалів. Тому при пошуку шляхів підвищення експлуатаційної стійкості виробів доцільними є і дослідження впливу різних процесів структуроутворення при отриманні хромовмісних матеріалів, які будуть базовими і дозволять з високою точністю прогнозувати рівень властивостей і експлуатаційну стійкість.

Тому робота, яка спрямована на підвищення експлуатаційної стійкості виробів з хромовмісних сплавів та покриттів, що працюють в складних умовах, шляхом теоретичного та експериментального моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей може бути віднесена до важливих і актуальних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до держбюджетної тематики ХНТУСГ імені Петра Василенка, договорів про співпрацю з підприємствами та згідно діючих програм: «Теоретичне та експериментальне обґрунтування нових ефективних технологічних процесів виробництва виробів» (ДР 0117U003018) у період 2017-2020р.р.; «Теоретичне та експериментальне обґрунтування нових технологій виробництва та відновлення деталей з використанням зміцнення модифікуванням» (ДР 0116U005802) у період 2015-2017р.р.; «Дослідження, наукове обґрунтування та впровадження конкурентоспроможних ресурсозберігаючих технологій, способів реновації нових матеріалів і технологічних засобів для інноваційного розвитку агропромислового комплексу» (ДР0109U000362) у період 2009-2013р.р. У вищезазначених роботах здобувач брала безпосередню участь як виконавець та використовувала здобуті результати у дисертаційній роботі.

Мета дослідження: розвиток наукових і технологічних основ підвищення експлуатаційної стійкості виробів із хромовмісних сплавів та покриттів, що працюють в складних умовах тертя і зношування, за рахунок теоретичного і експериментального моделювання та прогнозування основних факторів, які впливають на їх структуроутворення і властивості.

Завдання дослідження:

– розглянути літературні джерела, патенти, що стосуються чинників, які впливають на якісні показники виробів та можуть бути використані для моделювання та прогнозування технологічних процесів одержання і масивних виробів з хромовмісних матеріалів;

– розробити методологічний підхід до нових теоретичних методів та комплексних експериментальних методик до встановлення основних факторів, що впливають на структуроутворення та властивості виробів;

– оцінити вплив структурної неоднорідності, ступеню її дисперсності, що формуються у хромовмісних сплавах, та оцінити їх вплив на можливість прогнозувати та моделювати технологічні процеси виробництва;

– оцінити вплив локальних напружень на формування дефектів кристалічного стану, зміну структуроутворення та розвиток дифузійних процесів;

– теоретичними та експериментальними дослідженнями визначити параметри, які мають найбільший вплив на зміну структуроутворення та властивості сплавів;

– розробити та використати новий підхід до моделювання технологічних процесів лиття (кристалізації, локальних напружень), та термообробки для ефективного та економічного поєданого технологічного процесу виготовлення виробів;

– розглянути приклади можливості використання нових напрямів досліджень з урахуванням виявлених показників впливу для різних матеріалів, процесів виробництва, зміцнення та відновлення;

– провести промислові випробування розробок та оцінити їх ефективність.

Об'єкт дослідження: процес підвищення експлуатаційної стійкості виробів коригуванням їх складу; основних факторів, що впливають на структуроутворення і рівень споживчих властивостей.

Предмет дослідження: теоретичне і експериментальне моделювання і прогнозування основних факторів виробництва, що впливають на структуроутворення і властивості хромовмісних сплавів та покриттів.

Методи дослідження. Запропоновано загальний комплексний підхід до теоретичних та експериментальних досліджень з оцінкою впливу різних факторів виробництва на структуроутворення та властивості хромовмісних сплавів. Теоретичні дослідження розробляли на основі фундаментальних положень матеріалознавства, фізичного металознавства, термічної обробки металів, теорії дислокацій та математичного моделювання. Лабораторні та промислові дослідження виконано на сучасному устаткуванні та вимірювальній апаратурі. Використовували сучасні методи досліджень: оптичну та електронну мікроскопію, рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналізи, оцінку твердості, мікротвердості та рівня напружень, згідно коерцитивної сили. Для оцінки структурного стану виробів використовували нові розроблені методики досліджень з використанням оптико-математичного опису фазового складу, а також процесів дифузії, щільності фрагментів, що формуються, дисипації енергії.

Для оптимізації структурного і фазового стану використовували отримані залежності, що зв'язують стан матеріалу з рівнем його фізико-механічних і експлуатаційних властивостей. За допомогою побудованих комп'ютерних моделей, що враховують зміну енергетичного стану системи при різних технологічних процесах, прогнозували і оцінювали рівень мікротвердості в різних дисперсних фазах та структурних складових. Комп'ютерним моделюванням виявляли закономірності та особливості формування структури хромовмісних сплавів, а також зміни, що відбуваються при термообробці.

Для оцінки впливу режимів термічної обробки використовували експериментальні дослідження та розробляли новий підхід, що включав створення комплексного аналізу прогнозування впливу структуроутворення на рівень твердості, відповідно до вимог НТД, шляхом побудови комп'ютерних математичних моделей, заснованих на методі скінчених різниць. Моделювання проводили на базі обчислювального експерименту, із застосуванням статистичних методів на основі даних, що включають як стандартні дослідження металографічних структур, вимірювання твердості, так і рівня коерцитивної сили. Адекватність розроблених моделей підтверджували експериментальним шляхом.

Наукова новизна одержаних результатів. Результати, які були отримані, мають наукове значення та суттєво сприяють розвитку основ металознавства. Зокрема:

вперше:

– запропоновано загальний комплексний підхід оцінки впливу різних факторів виробництва на структуроутворення та властивості хромовмісних сплавів та покриттів, який полягає в поєднанні сучасних методів дослідження з новими розробленими методиками оптико-математичного оцінювання фазового складу, що описують процеси дифузії, щільності фрагментів, та вони базуються на основних положеннях зміни енергетичного стану системи;

– розроблено нові підходи до теоретичної оцінки структуроутворення хромовмісних сплавів і покриттів, що включають визначення поєднань фаз (умовних кольорів) і абсолютних значень лапласіана матриці (фрагмента зображення), через які досліджені неоднорідність сформованих фаз і їх дисперсність, структурна анізотропія, що утворилась при виготовленні та експлуатації виробів;

– запропоновано принципово новий підхід для опису ступеня неоднорідності сформованої структури з використанням мінливості фаз (умовних кольорів) та їх поєднань, що оцінює мікроліквацію хімічних компонентів, в тому числі, і в області дефектів кристалічної будови – дислокацій;

– оптико-математичним методом через зміну енергетичного стану системи описано процеси дифузії при розпаді аустеніту і розвитку процесів локальної деформації. Показано, що інтенсифікація дифузійних процесів супроводжується зміною ступеня дисперсності структури, підвищенням щільності дислокацій, виділенням окремих фаз фериту, насичених вуглецем, а також бейніту, карбідів нестехіометричного складу, а також їх взаємозв'язком;

– встановлені чинники і оцінено характер деградації карбідної фази в валковому хромовмісному чавуні. Показано, що таку деградацію визначають процеси, пов'язані з формуванням дислокаційної структури і дифузії, при яких відбувається поява нових типів карбідних фаз нестехіометричного складу, квазікристалічного графіту, а також фериту та бейніту. Виявлено типи поєднань таких з'єднань;

– для прогнозування структуроутворення розроблено новий підхід до моделювання за допомогою вперше визначених параметрів, що мають найбільший вплив на його зміну. Цей підхід ґрунтується на оцінках мінливості фаз (згідно умовних кольорів), отриманні гістограм їх розподілу та дисипації енергії в результаті розвитку процесів дифузії і зміни щільності аналізованих фрагментів;

– розроблено методику визначення оптимальних параметрів і режимів термічної обробки масивних прокатних валків із хромовмісного сплаву математичним моделюванням за допомогою критеріїв, які найбільш повно відображають його структурний і енергетичний стан та визначають зв'язок з твердістю і коерцитивної силою;

– проведена теоретична оцінка структурної неоднорідності хромовмісного зміцнюючого покриття, модифікованого наноалмазами за розробленою технологією, з дослідженням зміни абсолютного значення дивергенції, яке характеризує рельєф поверхні (створення зон стиснення і скидання), що формуються на поверхні тертя деталей при експлуатації.

удосконалено:

– на основі теоретичного та експериментального моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей хромовмісних сплавів та покриттів на основі рівнянь Нав'є-Стокса для опису процесів динаміки структуроутворення при аналізі металографічних структур розроблено метод експрес оцінки кількісного та якісного складу фаз і їх розподілу;

– на основі комплексних досліджень отримані підходи, що дозволяють проводити найбільш повну оцінку структурного стану системи, яка характеризує

ється локалізацією деформаційних станів і зміною внутрішньої енергії дислокаційної структури, її щільності, що відображає фазову, локальну неоднорідність.

Отримав подальший розвиток науково обґрунтований комплексний підхід, з використанням теоретичних та експериментальних результатів, що, завдяки використанню процесів моделювання та прогнозування структуроутворення і властивостей, дозволило отримати та узагальнити шляхи підвищення експлуатаційних властивостей виробів з використанням хромовмісних сплавів і покриттів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що відповідно представлених нових науково обґрунтованих теоретичних та експериментальних результатів моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей, розроблені та узагальнені ефективні параметри кристалізації та термообробки. Отримані дані дозволяють з високою точністю оцінювати і прогнозувати вплив різних чинників на рівень властивостей робочого шару і експлуатаційну стійкість виробу в цілому, корегувати структуроутворенням і технологічним процесом виготовлення виробів. На основі розробок створені сучасні прогресивні технології, що дозволили забезпечити підвищення експлуатаційних властивостей масивних виробів з хромовмісних сплавів, які працюють в складних умовах зношування та тертя. Узагальнення результатів, отриманих при застосуванні електролітичного хромунання покриттів з модифікуванням ультрадисперсними алмазами для зміцнення робочої поверхні на деталях малого розміру (паливної апаратури машин), дозволило розробити спеціальну технологію його нанесення. Це змінює умови кристалізації, в наслідок чого стає відсутнім газовиділення, істотно зменшується неоднорідність і підвищується твердість (знижується коефіцієнт тертя) такого покриття. Економічний ефект від впровадження нових розробок, захищених патентами, на ТОВ «Дизельсервіс», м.Харків, складає 73,8 тис. грн при обсязі виробництва 57 одиниць. Очікуваний економічний ефект від впровадження нових технологій, захищених патентами, на вальцеливарних підприємствах буде складати 910 тис. грн. при обсязі виробництв 1300т. Розробки, які виконані в дисертаційній роботі, використовуються і в учбовому процесі: лекційних курсах для бакалаврів та магістрів за напрямками «Механічна інженерія», «Транспорт», «Аграрні науки та продовольство» і внесені у підготовлені методичні посібники (курси «Матеріалознавство», «Технологія конструкційних матеріалів», «Новітні технології в сучасному машинобудуванні»), довідник та монографію.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, одержані автором самостійно та викладені у роботах [1-59]. У наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особливий внесок полягає в наступному: визначення особливостей фазового складу хромовмісних сплавів, оцінка дисперсності структури оптико-математичним аналізом та її вплив на експлуатаційні властивості, розробка і використання способу виявлення мінливості фаз [3,6,7,10,18,20,21,38,43,44,55]; розробка методик моделювання металографічних структур, фазового складу та прогнозування їх впливу на рівень властивостей [5,11-13,39,40,47,54]; дослідження впливу характеру дислокаційної структури на властивості хромовмісних сплавів [14,23,25,37,

42,51,57]; розробка нових підходів до моделювання при визначенні параметрів процесу термічної обробки [4,16,46,58]; дослідження та розробка нових технологічних процесів моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей хромовмісних сплавів [8,9,15,17,24,41,45,48-50,53,56,59]. У отриманих патентах запропоновані параметри нових технологічних процесів, методи оцінки якості виробів, виявлення та визначення дефектів кристалічної будови та формуємої неоднорідності структури, оптимальний склад нового зносостійкого матеріалу та технологія виробництва прокатних валків з регульованим процесом структуроутворення [28-35]. У довіднику [1] особисто автором розроблені матеріали четвертої глави; при написанні монографії [2] приймала участь у підготовці матеріалів до всіх розділів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи розглядалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на багатьох міжнародних науково-технічних та практичних конференціях у період 2012-2019р.р.: «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві» (Харків: ХНТУСГ, березень 2016, 2017р.р.); Інформаційно-аналітичний міжнародний технічний журнал «Промышленность в фокусе» (м. Харків, 2012-2019р.р.); Сучасні проблеми твердометрії, матеріалознавства і технології конструкційних матеріалів: міжнародна науково-технічна конференція (м. Харків, ХНАДУ, 24-25 вересня 2012р.); Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 70-річчю Південно-Казахстанського державного університету ім. М. Ауезова (Казахстан, м. Шимкент, 1-9 липня 2013р.); Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: XXII Уральська школа металознавців-термістів (м. Оренбург, Росія, 2-6 лютого 2014 р.); Инновационные технологии технического сервиса в АПК: міжнародна науково-практична конференція (ФГБОУ ВПО РГАУ-МСХА Москва, 9-10 жовтня 2014р.); Нові рішення в науці про метали і в технологіях їхньої обробки: міжнародна науково-технічна конференція (м. Харків, ХНАДУ, 26-27 вересня 2017р.); Проблеми надійності машин та засобів механізації с/г виробництва: міжнародна науково-практична конференція (Харків: ХНТУСГ, травень 2014, 2017р.р.); Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин: міжнародна наукова сесія (м. Харків, ХНТУСГ, березень 2018, 2019р.р.); Нові і нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: міжнародна науково-технічна конференція (м. Одеса, Одеський національний політехнічний університет, 26—29 вересня 2018р.); Молодь і с/г техніка в XXI столітті. XV міжнародний форум (м. Харків, ХНТУСГ, 4-5 квітня 2019р.); 10th Interdisciplinary Conference on Nature - Human - Culture (Krakow. Poland. Uniwersytet Pedagogiczny, 13-16 червня 2019р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 59 наукових працях, в тому числі: 12 статей в спеціалізованих наукових виданнях України і 13 статей у закордонних виданнях (з них включені до міжнародних наукометричних баз: SCOPUS [3-5], Web of Science [7,12,20,21]); 26 - в інших виданнях закордонних та України (з яких: монографія і довідник); отримано 8 патентів України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи викладено на 404 сторінках, у тому числі 9 додатків на 59 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 317 сторінок, 71 рисунок, 62 таблиці. Список використаних джерел нараховує 299 найменувань на 28 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовані мета та завдання досліджень, наведені основні отримані автором результати, визначені практична їх значимість і новизна. Показано зв'язок роботи з науковими темами і особистий внесок здобувача. Наведені дані про публікації та апробацію результатів роботи.

У першому розділі «Особливості структуроутворення хромовмісних сплавів та покриттів. Їх вплив на підвищення експлуатаційної стійкості виробів» проведено аналіз науково-технічної інформації та патентів, який показав, що перспективними матеріалами для виробів, що працюють в складнонапружених умовах і режимах термоциклічної дії, таких як прокатні валки чистових клітей листових станів, є хромовмісні сплави. Дослідження щодо застосування зміцнення поверхневого шару різних виробів, що працюють в складних умовах, підтвердили перспективність нанесення хромовмісних покриттів. Виявлено досвід використання такої технології і при зміцненні прокатних валків. Хромовмісні сплави і покриття, внаслідок впливу хрому на різні структурні складові, характеризуються високою зносостійкістю, необхідною твердістю.

Виявлено публікації, присвячені аналізу впливу хрому на структуру комплекснолегованих залізвуглецевих сплавів для підвищення стійкості прокатних валків. Легування дозволяє істотно змінювати структуру сплаву (співвідношення структурних складових, ступінь їх дисперсності) і рівень фізико-механічних властивостей. Як показали публікації, рівень властивостей хромистих чавунів залежить від типу формованої карбідної фази. Хром в поєднанні з іншими карбідоутворюючими домішками змінює склад фаз, частково заміщаючи атоми заліза в карбідах цементитного типу Me_3C або утворюючи леговані спецкарбіди типу Me_7C_3 і $Me_{23}C_6$. Структура хромовмісних сплавів має виражену анізотропією структури, обумовлену формованою неоднорідністю, спрямовану по тепловідведенню при кристалізації. Максимальний рівень властивостей таких валків, досягається при вузькому інтервалі хімічного складу чавуну робочого шару, з вмістом 15-21% Сг. Дані не містять відомостей про стан зерен металу при локальній неоднорідності, що сформована в межах однієї фази, а також не відомо її вплив на рівень локалізації деформацій.

Підвищення рівня властивостей виробів, виготовлених з хромовмісних сплавів або що мають такі покриття, і працюють в складнонапружених умовах, в значній мірі залежить від їх фізико-механічних властивостей, процесів структуроутворення, які протікають на різних етапах виготовлення та експлуатації виробів. Розглянуто чинники, що викликають руйнування робочої поверхні виробів. Це дозволить враховувати таку інформацію при моделюванні та прогнозуванні довговічності таких виробів, а також намітити шляхи ефективного підвищення їх

експлуатаційної стійкості.

Узагальнено інформацію про вплив різних експлуатаційних факторів на структурні зміни і сформульовані вимоги до матеріалу хромовмісних покриттів і сплавів для виробів, що працюють в складних умовах тертя. Найважливішими з них є: зниження максимальної температури циклічного впливу при експлуатації; зменшення структурної нестабільності фаз; зниження схильності металу робочого шару до локалізації деформацій та пороутворення.

Показано, що основними механізмами деградації структури є дислокаційний і дифузний процеси її формування. Для них спільним є те, що зародженню тріщин і руйнування робочого шару передує пластична деформація, яка формується в результаті термоциклічного впливу, що призводить до утворення зон з неоднорідною деформацією. Існуючі методики виявлення дислокаційних структур, не дозволяють достовірно оцінити ступінь локальної неоднорідності, сформованої як всередині одного зерна, так і в межах однакових фаз, в результаті впливу напружень і розвитку дифузійних процесів, з кількісним їх описом ступеня неоднорідності. Тому важливим завданням є розробка методів оцінки ступеня локальної неоднорідності структури.

Валки з високохромистого чавуну піддають відпалюванню при 600°C для зняття напружень. Вибір параметрів термообробки (швидкості нагріву, охолодження і часу витримки) залежить від маси виливки і вихідної структури матеріалу робочого шару і серцевини. При виготовленні хромовмісних двошарових листопрокатних валків ефективними можуть бути багатоступінчасті термообробки, що представляють комбінації низькотемпературних відпалювань, при нагріванні в областях магнітного перетворення карбідних фаз. Створювані в результаті самовільної магніострикції додаткові напруження II роду, сприяють субструктурному зміцненню, за рахунок розпаду залишкового аустеніту, підвищуючи зносостійкість і міцність робочого шару металу через зменшення його структурної нестабільності. Така обробка є додатковим технологічним процесом, що збільшує витрати на виготовлення виробів. В інформаційних джерелах не виявлено технології, яка б мінімізувала такі витрати, зі збереженням ефекту, одержуваного при використанні такого відпалу.

Підвищення експлуатаційної стійкості масивних виробів можливо забезпеченням створення нових технологічних процесів виготовлення, формуванням оптимальної структури і досягненням регламентованих споживчих властивостей. Однак, пошук інноваційних високотехнологічних процесів і рівня властивостей є складним і наукомістким завданням. Тому проблема підвищення рівня службових властивостей, контролю їх якості може ефективно вирішуватися шляхом створення і використання нових підходів прогнозування структуроутворення, що враховують зміну енергетичного стану системи, внаслідок дифузійних процесів.

Виявлені публікації в недостатній мірі висвітлюють відомості про методики і результати оцінки структурного стану хромовмісних сплавів і покриттів, які враховували б, крім фазового складу, анізотропію фаз і ступінь гетерогенності таких структур, щоб надійно прогнозувати зміну стану системи, яка формується в пері-

од усього життєвого циклу використання виробів.

У **другому розділі** «Матеріали та методики проведення досліджень» - розглянуто підходи для виконання поставленої мети. На основі сформуованих мети і завдань досліджень розроблена методологія їх проведення (рис.1), яка базується на аналізі та узагальненні основних факторів, що впливають на зниження експлуатаційної стійкості виробів у важконапружених умовах високих питомих тисків, термоциклювання і ступеня зношування робочої поверхні хромовмісних сплавів і покриттів. Методологічний підхід також включає теоретичні, експериментальні і практичні дослідження, які спрямовані на підвищення довговічності таких матеріалів за рахунок їх термообробки і зміцнення.

В якості основних матеріалів досліджень в роботі було використано хромовмісні чавуни, що утворюють робочий шар відцентроволитих листових валків станів гарячої прокатки виконання ЛПХНМд і ЛПХ18Нд, і мають, відповідно, наступний хімічний склад,%, 2.86-3.77С, до 1.9Сг, 0.2- 0.5Мо, 3.9-4.5Ni, а також 2.72-2.86С, до 18Сг, до 0,24V і 1,5Ni відповідно. Хромовмісні зміцнювальні покриття, наносили гальванічним способом з додатковим модифікуванням наноалмазами.



Рисунок 1 - Напрями досліджень, що використовували в дисертаційній роботі

Для отримання достовірної оцінки формованої структури і властивостей використовували комплексний підхід в дослідженнях із застосуванням сучасних методів і обладнання для проведення аналізу на всіх етапах виробництва і експлуатації виробів. Розроблено нові підходи та методики теоретичної і експериментальної оцінки процесів структуроутворення, засновані на виявленні фазового складу, властивостей, комп'ютерним аналізом цифрових зображень металографічних структур, з використанням розробленого методу оптико-математичного опису, що дозволив з мінімальними витратами коригувати технологічні процеси (лиття, термообробки) і забезпечити стабільну структуру і рівень властивостей робочого шару досліджуваних виробів.

Якість робочого шару валків станів гарячої прокатки і покриттів оцінювали за

рівнем фізико-механічних властивостей і сформованої структури (твердості, мікротвердості, рівню коерцитивної сили, дисперсності фаз, енергетичного стану системи, ступеня неоднорідності і анізотропії) експериментальними і теоретичними методами.

Для оптимізації структурного і фазового стану хромовмісних сплавів та покриттів розроблені ефективні технологічні процеси виготовлення виробів. Для цього проведено дослідження впливу легуючих і модифікуючих домішок, структурної спадковості, характеристики, що враховують фазовий склад і ступінь неоднорідності фаз, в тому числі і локальної, режимів термообробки, на структурний стан і рівень властивостей робочого шару. Отримано залежності, що зв'язують структурний стан матеріалу з рівнем його фізико-механічних і експлуатаційних властивостей, таких, як твердість і мікротвердість, коерцитивна сила, дисперсність фаз, щільність дислокаційної структури.

Розроблено нові підходи, що включають комплексну методику теоретичної оцінки рівня мікротвердості із застосуванням оптико-математичного аналізу цифрового металографічного зображення в локальних зонах, що відрізняються хімічним складом. Це дозволило побудувати комп'ютерні моделі, які враховують зміну енергетичного стану системи при різних технологічних процесах і оцінити мікротвердість в різних дисперсних фазах, структурних складових. Такий підхід використаний і для прогнозування впливу локальної неоднорідності фаз і їх частки на твердість сплаву, задаючи різні параметри технологічних процесів лиття та термообробки.

Для виявлення закономірностей і особливостей формування структури хромовмісних сплавів, а також змін, що відбуваються при термообробці, виконано комп'ютерне моделювання. При розробці такої методики, для найбільш достовірного прогнозу структурного стану і рівня властивостей хромовмісних сплавів, були використані і структуровані основні оцінюючі критерії, які дозволяли найбільш повно характеризувати вплив різних технологічних і експлуатаційних параметрів. Для детального опису локальних фрагментів зображення структур металу застосовували розроблену методику аналітичного дослідження, засновану на гідродинамічних аналогіях, що відбуваються при формуванні фаз (дисипація енергії, дифузійне перенесення, зміна щільності), на основі рівнянь Нав'є-Стокса. Математичною основою є розроблений метод оптико-структурного аналізу з оцінкою зображень, оцифрованих до формату .bmp, що розрізняються за статистичними характеристиками (розподілом пікселів). Для аналізу використовували оператори Лапласа (1) і дивергенцію (2), що описують неоднорідність хімічних елементів через дисипацію енергії при структурних змінах і щільність фрагмента (зони стиснення та розрядження) відповідно, в частинних похідних:

$$L(x, y) \equiv \Delta C(x, y) = \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial y^2}; \quad (1)$$

$$D(x, y) \equiv \text{div } C(x, y) = \frac{\partial C(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial C(x, y)}{\partial y} \quad (2)$$

Обчислення проводили методом скінчених різниць для двовимірної моделі, де кожній координаті пікселя цифрового зображення (x, y) надавали значення коду умовного кольору $c_{i,j}$. Досліджуване зображення поділяли на фрагменти (мат-

риці) $C(x,y)$ заданого розміру, в кожній точці якої обчислювали оператори, будували гістограми їх інтегрального розподілу, що дозволило оцінювати фази сплаву і ступінь їх локальної неоднорідності. Матрицю $C(x,y)$ розміром 3×3 пікселя (3) та оператори $L(x,y)$ (4) і $D(x,y)$ (5), а також варіацію (градієнт зображення), яким описували інтенсивність структурних напружень I і II роду внаслідок дифузії (6), в скінчено-різницевому виді представляли як:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{i-1,j-1} & c_{i-1,j} & c_{i-1,j+1} \\ c_{i,j-1} & c_{i,j} & c_{i,j+1} \\ c_{i+1,j-1} & c_{i+1,j} & c_{i+1,j+1} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$L_{ij} = c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}; \quad (4)$$

$$D_{ij} = c_{i,j-1} + c_{i-1,j} - 2c_{i,j} \quad (5)$$

$$|v(x,y)| \approx v_{i,j} = \frac{\sqrt{(c_{i,j-1} - c_{i,j})^2 + (c_{i-1,j} - c_{i,j})^2 + (c_{i,j+1} - c_{i,j})^2 + (c_{i+1,j} - c_{i,j})^2}}{2} \quad (6)$$

Неоднорідність, що визначає інтенсивність зміни щільності дислокаційної структури і ступінь дисперсності складових сплаву, оцінювали за допомогою енергетичних параметрів - функцій потужності дисипації енергії (M) і напружень (S):

$$M = D(x,y) \cdot L(x,y) \approx (c_{i,j-1} + c_{i-1,j} - 2c_{i,j}) \cdot (c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}), \quad (7)$$

$$S = D(x,y) - L(x,y) \approx (c_{i,j-1} + c_{i-1,j} - 2c_{i,j}) - (c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}) \quad (8)$$

Підхід для оцінки впливу режимів термічної обробки, включає створення комплексного аналізу прогнозування впливу структуроутворення на рівень твердості, відповідно до вимог НТД, шляхом побудови комп'ютерних математичних моделей, заснованих на методі скінчених елементів. Моделювання проводили на базі обчислювального експерименту, із застосуванням статистичних методів на основі даних, що включають як стандартні дослідження металографічних структур, вимірювання твердості, так і рівня коерцитивної сили. Адекватність розроблених моделей підтверджували експериментальним шляхом. Це дозволило прогнозувати рівень властивостей матеріалу, і, відповідно до цього, вносити корективи, а також забезпечувати надійне управління структуроутворенням. На підставі цього розробили нові оптимальні технологічні параметри процесів виготовлення виробів і забезпечили підвищення їх експлуатаційної стійкості, економічну ефективність.

У дослідженнях, спрямованих на розробку нових підходів до оцінки і моделювання структуроутворення, використовували різні методи підвищення якості робочої поверхні виробів, що забезпечують їх однорідність, такі як, оптимальний склад, термічна і радіаційно-термічна обробки, а також зміну осаджуваних зносостійких електролітичних покриттів хрому дисперсними наноалмазами, керованого процесу їх кристалізації.

У **третьому розділі** «Розробка нових підходів до теоретичної оцінки структуроутворення в хромовмісних сплавах» – розглядається новий підхід в дослідженнях мікроструктур по металографічним зображенням шляхом оцінки поєднань умовних кольорів і абсолютних значень лапласіана фрагмента зображення, що відображає дисипацію енергії системи при зміні структурного стану. Такий

підхід дозволяє локально з високою точністю виявляти структурні складові хромовмісних сплавів, з неоднорідним хімічним складом всередині однієї фази, шляхом оцінки показника гетерогенності, на основі кореляційних співвідношень між усіма виявленими фазами, структурними складовими, у взаємозв'язку з їх енергетичним станом. Порівняльно досліджували відображення структур (рис.2, табл.1), одержаних методами скануючої (1,3,4) та трансмісійної мікроскопії, автором (3,4) та іншими дослідниками (1,2), для того, щоб вияснити збіг таких результатів за різними методами аналізу. Показано, що запропонований підхід є ефективним.

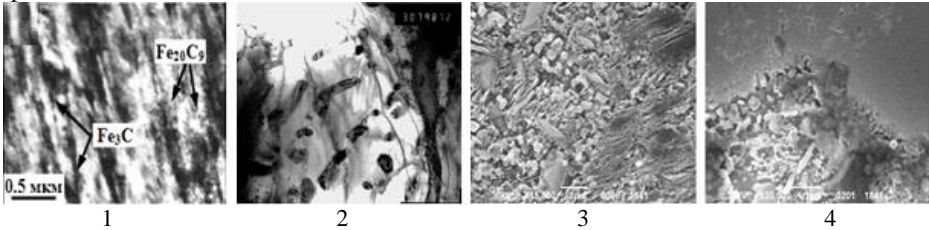


Рисунок 2 - Зображення мікроструктур високохромистих чавунів, отриманих різними методами аналізу

Таблиця 1 - Розподіл поєднань умовних кольорів досліджуваних мікроструктур

Вміст кольору, %, відповідно заданого інтервалу																№ фотографії	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
255	246	238	221	204	187	180	170	153	136	85	68	51	34	17	0		
фази фериту								бейніт/аустеніт		карбідні фази							
18,4	10,2	0	0	0	0	0	12,1	6,4	0	22,5	6,2	0,1	0	0	24,2		1
8,8	21,5	0	0	0	0	0	13,4	6,1	0	16,4	7,3	0	0	0	26,4		2
16,9	3,1	0	0	0	0	0	24,3	13,6	0	27,8	2,4	0	0	0	11,9		3
16,8	3,2	0	0	0	0	0	30,1	17,1	0	21,6	0,7	0	0	0	10,5	4	

Для оцінки ступеню неоднорідності структури, використаний параметр мінливості поєднання фаз (умовних кольорів), що описують мікроліквацію хімічних елементів при формуванні дефектів кристалічної будови (дислокацій) з виділенням компонентів, що їх декорують. Даний параметр дозволяє оцінити ступінь локальної неоднорідності, з точки зору розкиду концентрації компонентів всередині виявлених однотипних фаз. Мінливість структур в кожному заданому фрагменті зображення вираховували за допомогою операторів дивергенції і лапласіана, а також їх похідних, в скінчено-різницевої формі, де в якості координати брали піксель зображень, і оцінювали число збігів умовних кольорів груп фаз відносно середньої - в порівнянні з їх оточенням. Для оцінки ступеня неоднорідності структури в локальних зонах, що визначають розкид концентрацій компонентів в фазах, проводили статистичний аналіз розподілу умовних кольорів і мінливості фаз, які розраховували з використанням розподілу Пірсона.

Новий підхід в дослідженнях дозволив оцінити локальну неоднорідність фаз, яка формується в результаті процесів дифузії і деформації, завдяки зміні енергети-

чного стану системи, що відображає ступінь дисперсності хромовмісного сплаву. При цьому, ступінь дисперсності оцінювали по довжині рядів пікселів однакових умовних кольорів, послідовно розташованих в різних напрямках на площині цифрового зображення. Умовні кольори в кожній точці вираховували через зміну енергетичних параметрів системи (потужності дисипації енергії) і функції напружень (деформацій), з урахуванням їх знаків: позитивному значенню відповідав стан збільшення щільності дислокацій (стиснення), негативному - розрідження (зони скидання напружень), нейтральне (нульові значення) - відображає рівноважний стан. Проведено порівняльний структурний аналіз литого стану високохромистих чавунів та після циклічного низькотемпературного відпалу в інтервалі магнітних перетворень карбідних фаз. Виявлено зменшення середнього ступеня дисперсності в усіх напрямках для нейтральної (нульової) функції напружень \sim в 1,5 (з 2,95 до 1,92 пікселів) рази, а також одночасне збільшення з негативним і позитивним знаками, сумарно, \sim в 2,1 рази, що свідчить про інтенсифікацію процесів дифузії і формування додаткової локальної неоднорідності при пластичній деформації в результаті ефекту магніострикції карбідних фаз.

Показано, що функція потужності дисипації енергії і зміна її знаку на кожному етапі процесу виготовлення виробу, дозволяє прогнозувати виникнення нових фаз і формування локальної неоднорідності всередині них. Так, після проведення низькотемпературного циклічного відпалу в інтервалі магнітного перетворення карбідних фаз високохромистого чавуну, встановлено зміщення значень лапласіану, щодо нейтрального, в область позитивних значень, це свідчить про інтенсифікацію процесів структуроутворення у період процесу дисипації внутрішньої енергії. На основі цього відбувається збільшення кількості зон з локальною неоднорідністю, і в усіх напрямках має місце зменшення середнього значення нейтральної (нульової) функції \sim в 1,3 (з 2,35 до 3,15 пікселів) раз з одночасним збільшенням позитивних значень \sim в 1,13 (з 2,72 до 2,41 пікселів) раз, без змін негативних. Аналіз поєднань умовних кольорів фаз між такими фрагментами виявив значні зміни їх кількості і якісного складу: зміна умовних кольорів навколо всіх середніх значень (зменшується на 15,6% кількість аустеніту і до 3,5% фаз нелегованого фериту і з низьким вмістом вуглецю (номера інтервалу умовних кольорів 1 і 2); збільшується число фаз фериту з більш високим вмістом вуглецю і хрому (інтервал умовних кольорів від 3 до 6) до 6,1% і карбідних фаз: цементитного типу і різних типів вторинних карбідів - інтервали умовних кольорів 11, 12 і 16 на 0,4%, 3,6%, і 0,5% відповідно). Також виявлена локальна неоднорідність у первинних спеціальних карбідах типу Me_7C_3 - до 4,9% (інтервал умовних кольорів №15). Це є результатом розпаду залишкового аустеніту і формування нових фаз.

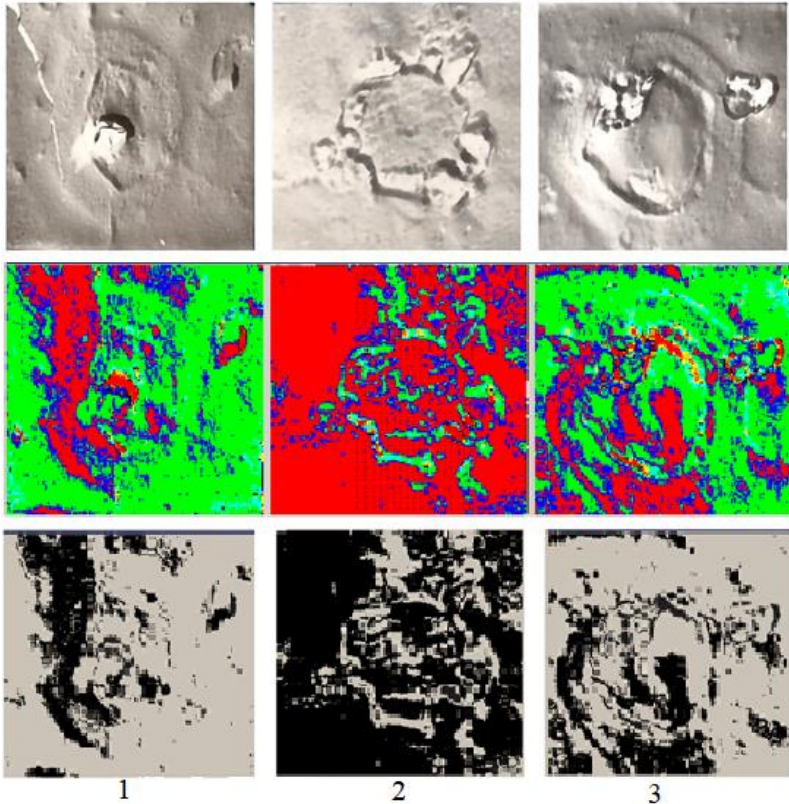
Порівняльною оцінкою функції потужності дисипації енергії для хромонікелевого (2,94%С; 0,34%Сг і 4,5Ni) та високохромистого (2,76%С і 16,4%Сг) валкових відцентроволитих чавунних валків (в литому стані і після відпалу в інтервалі магнітного перетворення карбідних фаз), встановлено, що після кристалізації довжина ланцюжків одного кольору в хромонікелевих чавунах значно більша, ніж в високохромистих. Термообробка ще більше підвищує дисперсність струк-

турних складових високохромистих чавунів, сприяючи значному зменшенню довжини таких ланцюжків, і, вносячи істотний внесок у зміну мікротвердості: рівень її в межах зерна аустеніту, що розпався, для феритокарбідної суміші після відпаду з нагріванням до 350° і 500°С знижується ~ на 10% в порівнянні з литим станом ($H_{50}362-437$ і $H_{50}333-392$ відповідно). У хромонікелевих чавунах після термічної обробки при $t = 190^{\circ}\text{C}$ і 220°C дисперсність істотно не змінюється, лише спостерігається деяке підвищення значень мікротвердості - $H_{50}221-260$ і $H_{50}238-277$ відповідно. Встановлено значний вплив термічної обробки на зміну знаку функції потужності дисипації енергії високохромистих чавунів - суттєво збільшується кількість параметрів з позитивним знаком за рахунок зменшення нейтральних значень. У хромонікелевих - переважає нейтральна функція потужності дисипації енергії, при кристалізації та забезпечуються найбільш повні структурні перетворення, що сприяють формуванню рівноважного енергетичного стану.

Досліджено мінливість фазового складу сплаву для 49 зразків валків із складом, що відрізнявся по концентрації хрому (від 16% до 32%Cr), для виключення відхилень, пов'язаних з різними системними факторами (режимом зйомки, значенням рівня напруги при електронній мікроскопії, ступенем збільшення зображення і інш.), оцінку неоднорідності фазового складу проводили через побудову кореляційних залежностей. Мінливість визначали в залежності від параметрів, отриманих при побудові гістограм розподілу поєднань умовних кольорів (груп фаз, а також описуючих дисипацію енергії). Встановлено тісний кореляційний зв'язок між параметрами мінливості, що оцінюють розкид по концентрації компонентів, з абсолютним значенням лапласіану умовних кольорів локальної зони (фрагменту), що описує структурну неоднорідність. Показано, що високі значення мінливості кольору тісно пов'язані ($R_{\text{мін}} = 0.93-0.97$) з групою фаз фериту, з підвищеним вмістом вуглецю (бейніту), для яких значення абсолютної величини лапласіана перевищує заданий фільтр (500). Одночасно виявлено неоднорідність груп фаз аустеніту, яка пов'язана з ліквідацією хімічних елементів, що потім позначається і на складових при його розпаді. У таких зонах виявлені значні відхилення ступеня неоднорідності фаз, що досягають 71%. На підставі розрахованих гістограм розподілів мінливості встановлено, що на цей фактор спосіб термообробки має незначний вплив.

Вперше досліджено механізм впливу пластичної деформації, що відповідає ефекту магніострикції, на структуроутворення в карбідних фазах. Для чого використовували параметр мінливості. Встановлено, що витримка сплаву в інтервалах магнітного перетворення карбідних фаз сприяє підвищенню щільності дислокаційної структури не тільки навколо включень, викликаючи розпад залишкового аустеніту, але також і всередині цих фаз. Показано, що за рахунок локальних стислих деформацій всередині масивних включень спецкарбідів хрому типу Me_7C_3 , що містять до 51% заліза, відзначається формування структурної неоднорідності (~ 9% від литого стану, розкид значень мікротвердості в середині зерен досягає 23%) і супроводжується виділенням нових груп дисперсних нестехіометричних карбідних фаз і фериту, які утворюють впорядковані дислокаційні струк-

тури (сітку), насичені хімічними компонентами (такими, як хром, залізо та вуглець), що входять до складу цих фаз. Така структуризація перешкоджає викришуванню карбідів і знижує їх схильність до руйнування при експлуатації. Ці ефекти спостерігаються тільки на масивних первинних карбідах. Локальна неоднорідність формується в зонах з підвищеною щільністю дислокацій.



Верхній рядок: електронні фотографії структури (1-3) ямок травлення та рельєфу, навколо одиначної дислокації карбідної фази хромопідкелевого чавуну, $\times 4700$.

Вакуумне травлення.

Середній рядок: сформована неоднорідність в зонах дислокаційної структури (червоний колір-інтервал №1, графітова плівка).

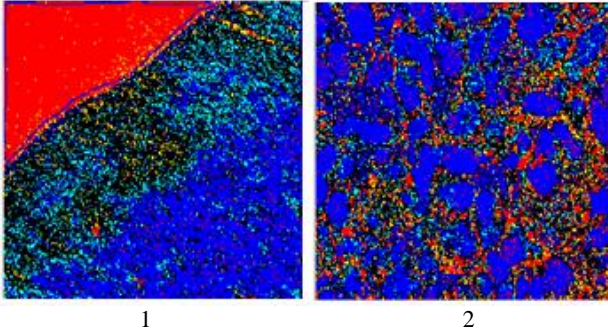
Нижній рядок: розподіл мінливості виявлених поєднань груп фаз (інтервали умовних кольорів) – інтервал №1: графітова плівка

Рисунок 3 – Дослідження деградації карбідної фази

Вперше досліджено чинники і характер деградації карбіду в чавунах з вмістом до 4.5%Ni (рис.3), який використовували для виробництва масивних виливків прокатних валків, що знижують їх експлуатаційну стійкість. Моделюванням оцінені процеси, які впливають на структуроутворення фаз металу при впливі робочих те-

температур і локальних деформацій на інструмент в процесі його експлуатації.

Наведено інформацію по типах поєднань фаз (різного кольору), що визначають нестабільність карбідної фази. На основі досліджень деградації карбідів, що є найважливішими складовими структури (визначає рівень твердості) при експлуатації, надаються рекомендації про підвищення їх стабільності, а також щодо зниження напружень за рахунок розпаду залишкового аустеніту при регламентованій кристалізації виливка в формі (рис.4). Показана доцільність розроблених комплексних підходів для оцінки впливу напружень і дифузії на структуроутворення, що дозволить моделювати і прогнозувати технології виробництва масивних виробів, для яких експериментальні підходи є досить витратними і не завжди ефективними з точки зору отримання необхідної інформації.



1

2

Червоний колір – Me_7C_3 ; темно червоний – $Me_{23}C_6$; чорний – Me_3C ; жовтий –аустеніт; голубий –ферит без дефектів, ненасичений вуглецем; білий –ферит з дефектами (дислокаціями), насичений вуглецем; синій –ферит, найбільш насичений вуглецем

Рисунок 4 - Розподіл мінливості виявлених поєднань груп фаз для зображень 1,2 високохромистих чавунів

Ця інформація про чинники і характер деградаційних процесів карбідної фази може бути ефективно використана при розробці нових комплексних технологій виробництва, зі збереженням необхідного рівня твердості і стабілізації карбідної фази різних типів чавунів.

У **четвертому розділі** «Нові теоретичні підходи до моделювання структуроутворення та оцінки прогнозування структурного стану, рівня властивостей хромовмісних сплавів» для прогнозування структуроутворення в хромовмісних сплавах проведено пошук оптимальних параметрів, які забезпечують найбільш якісну побудову моделей на основі математичного та експериментального аналізу, що можуть досить надійно враховувати процеси, що відбуваються при кристалізації і термообробці в умовах розвитку дифузії і напружень. Опис процесів структуроутворення проводили на основі формування фаз, за рахунок дисипації енергії в результаті дифузійних процесів і зміни щільності фрагментів, за допомогою лапласіана, дивергенції і варіації.

Моделювання проводили шляхом вирішення варіаційної задачі, на основі методу Монте-Карло, при якому за відомими статистичними характеристиками

створювали потоки випадкових чисел. Генерація таких потоків повністю збігалася з розподілом по гістограмі значень кодів умовних кольорів оригінального металографічного зображення. За допомогою певних перестановок пікселів в точках всередині і на границі кожного обраного фрагмента зображення, забезпечували імітацію фізичного процесу структуроутворення мінімізацією функціоналів (9) і (10), що включали абсолютні узагальнені величини лапласіана $|L_o|$, дивергенції $|D_o|$ і варіації $|v_o|$ для отримання зображення прогнозуємої структури.

$$F_1(\alpha) = \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{j=2}^{n-1} [\alpha \cdot |L_o| + (1-\alpha) \cdot |D_o|] = \min, \quad (9)$$

$$F_2(\alpha) = \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{j=2}^{n-1} [\alpha \cdot |v_o| + (1-\alpha) \cdot |D_o|] = \min, \quad (10)$$

де m і n - число строк і стовпців пікселів на зображенні; α - параметр функціоналу, який, виходячи з вимог зменшення лапласіану та збереження об'єму, знаходиться в межах $0 \leq \alpha \leq 1$. Розподіл генерованих потоків виконували різними способами для обґрунтування найбільш тісної подібності шляхом перестановки пікселів зображення або спеціальних фрагментів, утворених з них.

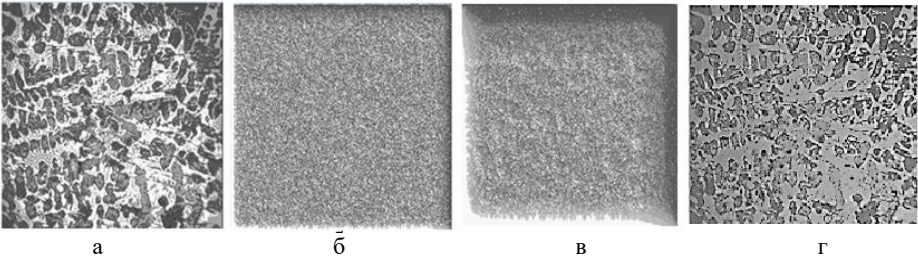
Отримані моделі загальної металографічної структури можуть бути модифіковані з урахуванням різних експериментальних умов, що вносяться змінами технологічних параметрів виробництва з завданням конкретних граничних умов. У високохромистому чавуні, де в результаті оптико-математичного аналізу було виявлено 11 інтервалів умовних кольорів, моделювання із застосуванням класичної схеми обчислень одержували результат досить близький до реальної структури. Проте, для побудови моделей в бінарних кольорах, при оцінці різних фаз і структурних складових, необхідно застосовувати узагальнену схему скінчених різниць, в якій використовують значення лапласіана, дивергенції та варіації. Розроблені алгоритми побудови таких моделей, що включали визначення текстури на основі формуємої її анізотропії. Для врахування цього чинника на властивості введені граничні умови в модель. Статистичним аналізом встановлено, що число поєднань умовних кольорів на фрагментах однакового розміру практично не змінюється для всіх зображень мікроструктури одного сплаву. Проте, зображення можуть відрізнятися кількістю пікселів кожного кольору. Отриманий результат указує на локальні неоднорідності всередині однакових фаз, внаслідок різних чинників: температурного інтервалу кристалізації, локальних напружень, дифузійних процесів, способу введення і складу модифікатора.

Отримані моделі з використанням різних підходів дозволяють з достатньою точністю відтворювати досліджувані мікроструктури. Поряд з розподілом умовних кольорів та їх поєднань, вони оцінюють і локальну неоднорідність всередині всіх наявних фаз. Аналіз, проведений шляхом поєднання розглянутих способів побудови статистичної моделі структури, дає найбільш повну оцінку розподілу фаз, їх неоднорідності, а також забезпечує інформацію про ефективні напрямки змін структури для отримання необхідного комплексу властивостей. Кореляційний аналіз структуроутворення, який описує твердість високохромистого чавуну і отримані показники в моделях, виявив повну відповідність з даними впливу

температурних параметрів термічної обробки.

Використання нових підходів до побудови комп'ютерних моделей металографічних структур хромовмісних сплавів за допомогою встановлення граничних умов та згідно рівняння Лапласа, забезпечили достатню точність зображень. Моделювання здійснювали, виконуючи обчислення методом ітерацій в скінченорізницевому вигляді для внутрішніх областей, заданих зображенням отриманих мікроструктур (рис.5). Знаходили значення умовних кольорів і їх розподіл при порівнянні з металографічним зображенням оригінальної структури, які забезпечували мінімальні відхилення. В якості граничних умов використовували групи (вихори) по 5 пікселів, для яких код умовного кольору змінювали, задаванням різних значень оператора Лапласа та розкиданих випадковим чином за структурою, в кількості не менш ніж 1/9 від загального числа пікселів на фотографії.

Розроблено рекомендації щодо визначення граничних умов, з урахуванням їх впливу на зміну параметрів, які описують дифузійні процеси в системі (середні абсолютні узагальнені величини лапласіана і потужності дисипації енергії). Розроблений підхід відповідає фізичній моделі, оскільки враховує характер дифузійних процесів для багатокомпонентних сплавів у вигляді вихорів всередині області зображення.



а) вихідна структура; б)-г) після 50, 100 і 150 ітерацій відповідно

Рисунок 5 - Моделі мікроструктур високохромистого валкового чавуну при заданих граничних умовах групами (вихорами) по 5 пікселів всередині області зображення

Запропоновані оцінюючі аргументи при теоретичному опису мікротвердості, які тісно пов'язані з фізико-хімічними процесами при формуванні структур. Це доводять високі значення коефіцієнтів кореляцій, як для одновимірних, так і багатовимірних залежностей. В литому стані мають місце прямі залежності (крім ступеня неоднорідності) мікротвердості від введених різних аргументів (усереднені значення абсолютної величини лапласіана, що описує дисипацію енергії, і його градієнт, як показника розкиду неоднорідності локальних зон; абсолютної величини дивергенції, яка характеризує зони ущільнення і розрідження в локальних зображеннях; показники неоднорідності структури і їх нейтральності). Максимальні коефіцієнти кореляції структур в литому стані при 4-х і 5-ти факторному аналізі досягають 0.74-0.75. Максимальні коефіцієнти кореляції, оброблених по режиму циклічного нагріву і ізотермічної витримки при температурах 190-500°C магнітного перетворення легованого цементиту і спеціальних карбідів, при 4-х факторному аналізі дорівнює 0,6 і при 5-ти факторному змінюються несуттєво - $\leq 0,65$. Знижен-

ня коефіцієнта кореляції після термообробки можна пояснити підвищенням неупорядкованості структури і зміною частки фаз, а також їх зв'язків.

Теоретична оцінка середньої мікротвердості по фотографії мікроструктури є певною новизною підходу і дозволяє оперативно визначати цей показник. Розрахунок виконано з урахуванням того, що виявляються фрагменти, для яких отримані залежності використаних факторів можуть бути непридатними (сильні відхилення значень у зв'язку з інтенсивною ліквідацією), і будуть потрібні додаткові статистичні експериментальні випробування. Проте, розрахунки цього не показали (табл.2). Можна вважати, що отримані середні значення мікротвердості по фотографії достовірно підтверджують експериментальну картину збільшення показників після термообробки \sim в 1,5 рази.

Проведено математичне комп'ютерне моделювання для оцінки локальної неоднорідності структурних складових, що включає використання нових оцінюючих параметрів - *M-трибок* (11):

$$S=2D-L;$$

$$M=8D \cdot L;$$

(11)

$$t_{i,j} \equiv t = -(2D+L),$$

які представляють собою упорядкований набір, що складається з трьох дійсних цілих чисел (S та M - функції напружень і потужності дисипації енергії, $t_{i,j}$ - визначника квадратної матриці, утвореної енергетичними параметрами), та обчислюється у фрагменті металографічного зображення.

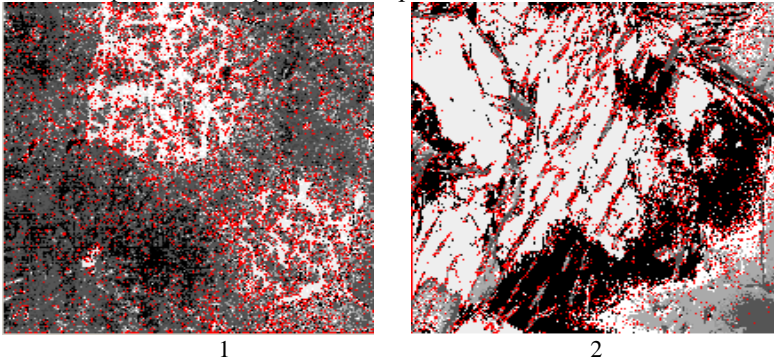
Таблиця 2 - Значення середньої мікротвердості H_{μ} , розраховані і експериментальні

Середня мікротвердість H_{50} , МПа					
в литому стані			після ТО		
експериментальні значення	4-х факторна модель	5-ти факторна модель	експериментальні значення	4-х факторна модель	5-ти факторна модель
447	381	402	563	660	644
658	508	557	648	663	666
275	353	368	706	714	731
473	436	468	574	644	650
437	432	477	735	755	782
288	363	372	644	664	689
437	426	463	604	660	644
437	434	465	619	663	666
466	486	534	704	714	731

При цьому, також був введений аналіз впливу підходу з поворотом зображень мікроструктури на різні кути, що дозволило, змінюючи і задаючи енергетичні параметри, провести найбільш достовірно оцінку зміни локальної неоднорідності структурних складових незалежно від напрямку вирізки зразка і отриманого зображення. Встановлено, що, хоча твердість сплаву зростає з підвищенням ступеня дисперсності, проте значимість цього параметра в обох напрямках, згідно анізотропії, нижче ніж у випадку кутів повороту. Моделювання кутів поворо-

ту дозволило встановити найтісніший їх зв'язок з усіма параметрами, що входять до складу М'-трибок, через які можна оцінити не тільки неоднорідність структурних складових, але і виявити особливості їх формування. Встановлено, що навіть відцентрове лиття і швидка кристалізація робочого шару завтовшки до 60 мм, повністю не усувають ліквідаційних явищ і неоднорідності формування структури, пов'язану з напрямом тепловідведення. На підставі виявленої анізотропії властивостей металу робочого шару рекомендовано оцінювати зв'язок структури з властивостями на поздовжніх шліфах (уздовж вісей нечітко виражених дендритів).

У **п'ятому розділі** «Оцінка локальної неоднорідності хромовмісних сплавів за виявленням і зміною дислокаційної структури» для вирішення завдання роботи запропоновано новий комплексний підхід з використанням оптико-математичного опису енергетичних параметрів структурних змін, для оцінки ступеня локальної неоднорідності, що виникає в різних фазах при формуванні напружень II роду. Такий підхід базується на виявленні змін дислокаційної структури, оцінках ступеня дисперсності фаз, а також функцій потужності дисипації енергії і напружень, які відображають енергетичний стан системи, в результаті процесів, що відбуваються при кристалізації, пластичній деформації і зміцненні (розглянутий метод радіаційно-термічної обробки - РТО). Оцінювали зони і характер локалізації деформації, роль структурного фактору (неоднорідності, дисперсності). Розглянуто вплив різних технологічних процесів на перебудову дислокаційної структури фаз і їх вплив на зародження і розвиток деградаційних процесів.



що утворилися в результаті: 1) РТО в сталі 90ХФ; 2) кристалізації в хромонікелевому чавуні. Червоним кольором показано розподіл щільності дислокаційної структури, при $L_{ij} \geq 10^4$ (порог чутливості методу оптико-математичного аналізу, який характеризує найбільш енергетично нерівноважний стан структури)

Рисунок 6 - Розподіл функції напружень (S)

Оцінювали неоднорідності структурних змін, що відбуваються при кристалізації робочого шару двохшарових валків з хромонікелевих легуваних чавунів, з температурною витримкою в області магнітного перетворення цементиту, показано, що тривале перебування металу робочого шару в інтервалі магнітного перетворення карбідів (190°-230°С) додатково створюються локальні напруження, збільшуючи щільність дислокацій в карбідних включеннях (рис.6).

Одноразово формуються впорядковані структури в вигляді стінок, сприяючи подрібненню цієї фази. Дифузією виявлено декоруння таких зон. Спостережувані структурні зміни дозволяють коригувати параметри лиття, стабілізувати властивості сплаву і в процесі експлуатації. Дисперсність цих фаз, що характеризує їх локальну неоднорідність, приведено в табл.3.

Таблиця 3 - Величина дисперсності фаз в локальних областях (3×3) зображення

Виявлені фази, %							Середнє значення	№ фото (рис.6)
ферит	аустеніт	карбіди	ферит + аустеніт	ферит + карбіди	карбіди + аустеніт	ферит + аустеніт + карбіди+ графіт		
17.143	1.5013	7.288	2.073	4.649	1.917	3.041	5.780	1
4.945	1.117	4.752	1.417	5.523	1.511	3.386	4.233	2

При пошуку новітніх технологій для зміцнення прокатних валків був випробуваний новий підхід радіаційно-термічної обробки. Для цього на НЛМК було побудовано спеціальний каньйон (камеру) із замкнутим циклом охолодження водою технологічного процесу зміцнення. Обробка РТО виявила зміни структурно-фазового стану, які є результатом сумарного впливу швидкого ступеневого нагріву від 150 до 550°C поверхневого шару валка скануючим електронним пучком з одночасним формуванням радіаційних дефектів і фазових перетворень, зміною дислокаційної структури. Встановлено, що після обробки валкової хромовмісної сталі 90ХФ в результаті розпаду залишкового аустеніту, спостерігається збільшення частки карбідної фази, формуються роздроблені її включення, відзначається утворення карбідної евтектики (загальне зростання числа дисперсних спецкарбідів - від 10,6% до 21,1%), а також формування голчастих структур в матриці (від 16,3% у вихідному до 35,3% в зміцненому стані). Оптико-математичний аналіз зображень мікроструктур після РТО виявив і локальні зміни, що відбуваються поблизу фаз з підвищеною концентрацією вуглецю (графіту і цементиту). У деяких зонах, внаслідок дифузії, відзначається часткове розчинення окремих включень цементиту і перліту з виділенням графіту по дислокаційним стінкам. Виявлено впорядкування дислокаційної структури в карбідній фазі. З підвищенням щільності дислокацій відзначається зниження потужності дисипації енергії, що свідчить про зниження інтенсивності процесів, що протікають. Дислокаційна структура феритних ділянок істотно відрізняється, від формованої в цементиті. У першому випадку вона має вигляд сіток з комітками різних розмірів. У другому - визначається її велика неоднорідність. При впорядкуванні дислокаційної структури, спостерігаються високі показники дисперсності функції напружень, що характеризують її щільність.

Апробація розробленого нового комплексного підходу щодо визначення локальної структурної неоднорідності при виготовленні виробів і в результаті експлуатації, показала його повну адекватність і повторюваність при використанні для різних хромовмісних матеріалів, а також способів їх виробництва і зміцнення. Дослідженнями показано, що за допомогою параметрів, які відображають зміни енергетичного стану системи, можливо з досить високою точністю виявляти дефекти кристалічної будови - дислокації, аналізувати їх поведінку і вплив на

подрібнення фаз, пошкоджуваність зерен, виявляти зміни структури і оцінювати фазовий наклеп та дифузійні процеси.

У **шостому розділі** «Розробка параметрів термічної обробки моделюванням характеристик для прогнозування структуроутворення в хромовмісних сплавах» для обґрунтування і розробки ефективних параметрів термічної обробки (ТО) валків листових станів гарячої прокатки запропоновано комплексний підхід оцінки їх структуроутворення на основі використання спеціальних експериментальних і теоретичних досліджень мінливості фазового складу і його впливу на властивості (твердість і коерцитивну силу) при пошуку оптимальних параметрів. Це дозволяє прогнозувати фазовий склад і локальну неоднорідність, а також структурний стан складних гетерогенних сплавів. Здійснити таку оцінку вдалося на основі моделювання зміни енергетичного стану системи, що враховує дифузійні процеси, що протікають, не вдаючись до застосування руйнівних методів досліджень. Використання таких моделей дозволяє розробляти нові високотехнологічні процеси підвищення рівня експлуатаційних властивостей, одночасно зі скороченням термінів і зниженню матеріальних і трудових витрат при постановці на виробництво продукції з нових матеріалів і технологій.

Розробку оптимальних режимів і параметрів процесу термічної обробки проводили на пробах, відібраних від робочого шару високохромистих двошарових листових валків станів "1700" і "2000" гарячої прокатки. За основу були прийняті 18 експериментальних режимів відпалу, здійснювані в виробничих умовах на валках виконання ЛПХ17Нд (леговані до 17%Cr і до 1,5%Ni зі спецкарбідами Me_7C_3 , Me_6C_{23} і Me_xC_y в основі). Показники твердості і коерцитивної сили робочого шару до і після обробки змінювалися в межах від 57HS до 77HS і від 18.2 до 45.6 А/см відповідно. Аналізували металографічні зображення 76 зразків від цих валків в литому стані і після термічної обробки.

Грунтуючись на накопиченому досвіді, проведених численних досліджень, розроблено оцінюючі критерії, які найбільш повно характеризують структурний і енергетичний стан системи, дозволяють прогнозувати склад, рівень твердості. Для отримання адекватних математичних моделей, близьких до реального процесу ТО, обчислювальний експеримент проводили, оцінюючи статистично значущу кількість функцій (P_i), що описують різні характеристики. Оцінювали 4 умовні групи, в яких: I - відображає характеристики, що обчислюють шляхом застосування гідродинамічних аналогій щодо процесів структуроутворення; II - параметри обчислюють за аналогією розподілу бозе-частинок з урахуванням мікростану сплаву; III - описують неоднорідність по мінливості умовних кольорів в різних комбінаціях поєднань (для фрагмента 3×3 пікселя); IV - оцінюють твердість, фізичні і технологічні параметри термічної обробки.

При моделюванні для оцінки конкретної структури використовували фактор спадковості металу (12) за показниками – литого стану. Введення цього фактору, практично для всіх досліджуваних варіантів ТО, підвищує коефіцієнт кореляції при моделюванні, в середньому на 9.8%. Врахування цього показника дозволяє, не змінюючи коефіцієнтів кореляції, при виробництві нових виробів, прогнозувати рі-

вень їх споживчих властивостей і ступінь структурної неоднорідності після ТО.

$$H_i = \frac{P_{iТО}}{P_{iЛ}}, \quad (12)$$

де H_i - фактор спадковості металу i -ї характеристики; $P_{iЛ}$ -величина оцінюваної характеристики в литому стані; $P_{iТО}$ - після кожного n -го режиму ТО.

На початковому етапі уніфікували різні часові, температурні параметри і швидкості проведення процесу. В подальшому такі наведені (усереднені) показники, значно спростили завдання по формуванню вихідних даних і зменшили витрати часу на розробку об'рунтованих параметрів інноваційних технологій.

Другий етап моделювання включав обчислювальний експеримент, завданням якого був аналіз чинників, що найбільше впливають на структуру і властивості сплаву в результаті промислових експериментальних режимів ТО. За основу брали значення характеристик, розрахованих для прототипних структур. В результаті обрані оптимальні характеристики мінімального ступеня неоднорідності і регламентованого рівня твердості структури сплаву. Встановлено, що в процесі термічної обробки найбільший вплив на твердість надають, в порядку зменшення, такі характеристики, як: ступінь дисперсності фаз, що залежить від спадкових властивостей (до 56%); неоднорідність структури за мінливістю умовних кольорів в поєднаннях (до 16%); функція потужності дисипації енергії (до 9%); показник коерцитивної сили (3%). Низькі показники останніх чинників в даному випадку можуть бути пов'язані з більш вузькими межами статистичної вибірки, що визначає рівень і стабільність процесу виробництва, а також із зоною відбору проб - торцевого кільця від валка, яка характеризується найбільшою швидкістю кристалізації.

На третьому етапі проводили математичне моделювання режимів термічної обробки, де в якості параметрів використовували дані, отримані на попередньому. Побудовано моделі де змінювали 1000 параметрів і режимів термічної обробки високохромистого чавуну - відпали дестабілізуючі аустеніт. Рішення оптимізаційної задачі для функцій, що характеризують твердість, фазовий склад сплаву (частки аустеніту і голчастих структур), а також структурну неоднорідність у вигляді мінливості поєднання умовних кольорів і потужності дисипації енергії, дислокаційної структури показало, що найбільші значення для аналізованих характеристик відповідають ступеню неоднорідності структури після термічної обробки при 3-х ступеневому високотемпературному режимі нагріву зі швидким охолодженням (нормалізацією): нагрівання до $T=920^{\circ}\text{C}$, з 2-я ступенями технологічних зупинок при нагріванні: 269.5°C і 600°C та загальним часом режиму $\tau=25.5$ год, часом тільки нагрівання і охолодження $\tau_2=13.2$ год. Проте, такий режим термічної обробки не прийнятний для двошарових валків з різномірною металу. Така обробка буде призводити до зниження твердості нижче заданого рівня.

Оптимальним, як компромісне рішення, що враховує розглянуті характеристики і вимоги, які пред'являються до рівня твердості, є ступеневий низькотемпературний режим термічної обробки (рис.7, табл. 4). В результаті досягаються оптимальні характеристики структурного стану, з урахуванням чинника спадковості, які забезпечують необхідний інтервал значень: твердості від 63.4HNS до 69.2HNS

(середнє - 67.5HS), спостерігається незначне її зменшення (~ на 1-1.5%) в порівнянні з литим станом; зростання голчастих структур від 14.3% до 19.4% (середнє - 16.9%); а доля залишкового аустеніту - не перевищує 1.8%.

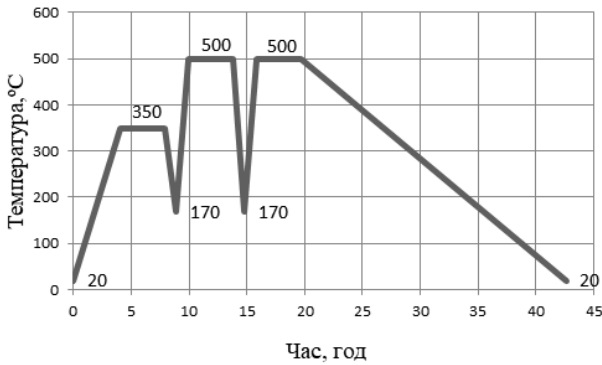


Рисунок 7 - Рекомендована схема режиму ТО, що забезпечує отримання оптимальних значень аргументів функцій, які враховують формування: частки структур фериту, насичених вуглецем, і залишкового аустеніту; мінливість поєднання фаз (умовних кольорів) в локальних зонах; а також потужність дисипації енергії і твердості

Таблиця 4 - Математичні моделі режимів процесу термічної обробки, отримані при оптимізації аргументу функції твердості (P_{107}), та гістограми розподілу твердості (1-3), які відповідають міні, середньому і максимуму значенням фактору спадковості H_i n -го модельованого режиму ТО

Гістограма 1 n=5, $P_{107max}=64HS$					Гістограма 2 n=6, $P_{107max}=67.5HS$					Гістограма 3 n=3, $P_{107max}=71HS$				
$T_1, ^\circ C$	τ_1, Γ	$T_2, ^\circ C$	τ_2, Γ	P_{107}, HS	$T_1, ^\circ C$	τ_1, Γ	$T_2, ^\circ C$	τ_2, Γ	P_{107}, HS	$T_1, ^\circ C$	τ_1, Γ	$T_2, ^\circ C$	τ_2, Γ	P_{107}, HS
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
337.4	042.7	342.8	17.8	63.4	337.5	042.7	343.0	18.6	67.3	337.4	042.6	342.8	17.6	69.2
162.1	43.8	256.7	4.8	64.0	159.6	47.4	253.6	5.1	67.5	145.1	50.0	235.9	5.3	71.0
159.6	47.4	253.6	5.1	64.1	159.0	45.7	252.9	5.0	67.5	144.0	47.8	234.5	5.1	71.0
159.0	45.7	252.9	5.0	64.1	157.8	40.4	251.5	4.5	67.5	140.9	48.9	230.8	5.2	71.1
111.3	27.0	194.5	3.4	65.4	111.3	27.0	194.5	3.4	68.8	111.3	27.0	194.5	3.4	71.8
110.3	41.7	193.3	4.6	65.6	110.3	41.7	193.3	4.6	69.0	110.3	41.7	193.3	4.6	72.0
110.1	31.5	193.0	3.7	65.5	110.1	31.5	193.0	3.7	68.9	110.1	31.5	193.0	3.7	71.9

При цьому, мінливість поєднань умовних кольорів, виявлених фаз на фрагменті зображення розміром 3×3 пікселя, змінюється від 3.6 до 7.9 (середнє - 5.4 пікселя) і від 0.6 до 1.8 (середнє - 1.3 пікселя) відповідно. Одночасно потужність дисипації енергії, істотно зростає від 397.3 до 1215.0 (середнє - 709.0). Визначено оптимальні температурні параметри циклічної термообробки (нагрів до 350°C і двох ступенів при 500°C), які підтвержені промисловим режимом такої обробки валків. Ефект досягнутий в результаті нагрівання в областях магнітних перетворень легованого цементиту і спецкарбідів хрому.

На четвертому етапі досліджень запропонований підхід до моделювання здійснювали математичним моделюванням на їх відповідність реальним експериментальним розрахункам. Встановлено, що збіжність результатів задовільна.

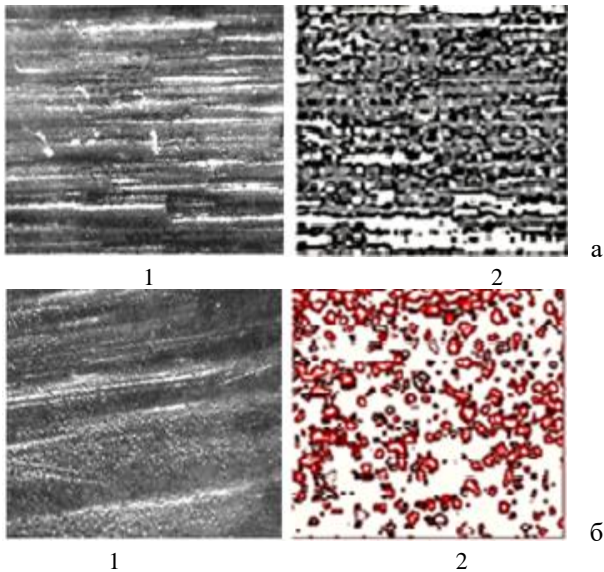
У **сьомому розділі** «Промислова апробація розробок і оцінка їх ефективності» виконана промислова апробація розробок зі створенням нових технологічних процесів виробництва прокатних валків і покриттів із хромовмісних матеріалів. Розробки засновані на теоретичних і експериментальних оцінках процесів структуроутворення таких матеріалів при виробництві та експлуатації виробів, що дозволило обґрунтувати ефективність їх підвищеної та стабільної стійкості.

Запропоновано новий технологічний процес виробництва двошарових листопркатних валків чистових клітей з хромовмісних чавунів, що відливаються в металеві форми відцентровим методом, і підхід до моделювання умов кристалізації виливків з витримкою робочого шару протягом ~ 6 год в інтервалі магнітного перетворення цементиту і спеціальних карбідів. Моделюванням показано, що підвищення споживчих властивостей досягається попереднім підігрівом металеві форми при заливанні робочого шару валків з хромонікелевого чавуну при $190-210^{\circ}\text{C}$, а з високохромистого - $350-500^{\circ}\text{C}$. Така технологія дозволяє істотно знизити частку залишкового аустеніту, більш ніж в 2 рази, стабілізувати рівень твердості, мінімізувати рівень напружень, що важливо для підбору валків в комплект і їх ефективної експлуатації. Нова технологія виливки базується на основі явища магнітоструктурних змін, і вона найбільш ефективна для легованих чавунів з часткою карбідних фаз в інтервалі 25-40%. Показано, що зміна споживчих властивостей - твердості можна контролювати і по коерцитивній силі, яка є стабільною при термічній обробці в інтервалі температур магнітного перетворення карбідів легованих чавунів. Запропонована технологія виливки і регламентовані умови кристалізації дозволяють виключити термічну обробку.

Застосування хромування для підвищення стійкості прокатних валків листопркатних станів не показали суттєвої ефективності через складність технологічного процесу, а також малої товщини зміцнюючого покриття і умов експлуатації, які характеризуються високими питомими тисками і значними переточуваннями робочого шару, тому такі розробки були перенесені на деталі машинобудування, що працюють в умовах тертя і зношування. При виконанні розробок, які відрізнялися б обґрунтованою науковою та практичною значимістю, вивчили кінетику і механізм зношування деталей паливної апаратури машин, у яких зміцнення нових деталей у виробництві здійснювали нанесенням плівкових покриттів W-Co-C. На основі отриманої інформації були з'ясовані переваги і недоліки такої технології, на підставі чого запропонували нову технологію їх відновлення в умовах ремонтного виробництва. Найбільш простим і доступним є метод електролітичного хромування.

Виходячи з отриманих попередніх результатів, потрібно було забезпечити технічні та екологічні вимоги. Їх реалізацію здійснили на основі використання додаткового модифікування такого покриття ультрадисперсними алмазами (УДА). Важливим з'явилася і необхідність рівномірного розподілу таких включень з мінімальним їх агрегуванням в електроліті і рівномірним розподілом в

покритті. Рівень властивостей отриманого модифікованого електролітичного покриття був вище раніше використовуваного плівкового, оскільки відрізнявся стабільністю, більш високою мікротвердістю (з H_{50} -1027 - плівкового до H_{50} -1420) і значною товщиною граничного шару, для нанесення якого не було потрібно спеціального устаткування, витратних матеріалів і додаткових енергоресурсів. Для рівномірної кристалізації УДА створили спеціальний пристрій (магнітну мішалку). Порівняння структури покриттів, отриманих при перемішуванні електроліту в процесі кристалізації без- і з модифікуванням УДА показало, що при відсутності руху частинок структура покриття формується більш крупнозернистою і характеризується значним ступенем агрегування включень алмазів. При перемішуванні - формується дрібнозерниста структура, що пояснюється більш швидким підведенням іонів до поверхні катода. Мікрорентгеноспектральний аналіз показав значну наявність хрому (до 40%) всередині агрегатів УДА, що свідчить про достатню однорідність структури отриманого покриття. Це підтверджують і вимірювання мікротвердості в зоні наявності агрегатів алмазів і поза ними, де вона практично не змінюється, від H_{50} -1350 до H_{50} -1361 відповідно.



1-початкова фотографія зразка; 2 - дивергенція

Рисунок 8 - Розподіл розрахункових абсолютних значень показників, що характеризують процес тертя в деформаційних зонах між смугами на поверхні металу покриттів, нанесених по технології без перемішування УДА (а) і з перемішуванням (б)

Методом математичного опису виконаний порівняльний аналіз металографічних зображень поверхні тертя структур, що формуються в результаті експлуатації, хромовмісних електролітичних покриттів, відповідно розробленої технології модифікування УДА. Встановлено, що на зміцненій поверхні число зон ковзання

і їх мікрорельєф при експлуатації зменшуються в 2-3 рази. Виявлено однозначне зменшення структурної неоднорідності покриття, нанесеного за розробленою технологією. За розрахунками, зони зображення, для яких сумарне значення параметра, що характеризує сформований в процесі тертя рельєф поверхні (зони стиснення і скидання), відрізняються абсолютними значеннями дивергенції, які перевищують 20% для покриття, нанесеного по технології без перемішування УДА. Після експлуатації вони становлять 24,7%. За новою розробленою технологією такий показник знижується до 13,4%. Це характеризується і зменшенням неоднорідності, в середньому в 2-3 рази. Зміни, які відбуваються при експлуатації на поверхні тертя наведені на рис.8. Технічний ефект модифікування структури покриття за розробленою технологією, шляхом введення в електроліт заряджених фаз УДА, що осаджуються спільно з хромом на попередньо активовану обробкою поверхню, забезпечує рівномірній розподіл такої модифікуючої домішки, що змінює умови кристалізації, при яких відсутнє газовиділення, підвищується твердість в 1.5-2,0 рази (коефіцієнт тертя знижується до 20%).

Фактичний економічний ефект від виконаних розробок щодо підвищення властивостей змцнювальних покриттів при відновленні деталей в умовах ремонтного підприємства ТОВ «Дизельсервіс», м. Харків склав 73,8 тис. грн при обсязі виробництва 57 одиниць. Економічний ефект від використання нової технології модифікування хромованих покриттів робить доступним і доцільним процес відновлення і зміцнення вузлів і деталей різних закордонних виробників, що працюють в умовах великих навантажень при терті, абразивному зносі і кавітації в Україні. Очікуваний економічний ефект від виконаних розробок щодо підвищення стійкості прокатних масивних валків листових станів буде складати 910 тис. грн при обсязі їх виробництва 1300т. Нові технологічні процеси виробництва і зміцнення, а також оригінальні підходи і методи досліджень захищені 8 патентами України.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, які узагальнюють і забезпечують вирішення актуальної науково-технічної проблеми – підвищення експлуатаційної стійкості виробів із використанням процесів моделювання та прогнозування структуроутворення, властивостей у хромовмісних сплавах та покриттях.

1. Аналіз літературних публікацій, патентів, а також власних багаторічних досліджень показав, що істотним недоліком у формуванні стабільної структури і експлуатаційних показників в хромовмісних сплавах є залежність їх властивостей і технологічних параметрів виробництва виробів від спадковості литого металу. Їх нестабільність призводить до кристалізації підвищеної частки залишкового аустеніту, локалізації деформацій в робочому шарі при експлуатації і його деградації, руйнування. Додаткове легування істотно не змінює долю залишкового аустеніту. У зв'язку з цим, важливим є розробка таких умов кристалізації і термообробки, які дозволяють мінімізувати частку такої фази і знизити її вплив на рівень напружень.

2. На основі досліджень запропоновано загальний комплексний підхід оцінки впливу різних факторів виробництва на структуроутворення та властивості сплавів. Для цього використовували оптичну електронну мікроскопію, рентгеноструктурний аналіз, оцінку твердості, мікротвердості та рівня напружень, згідно рівня коерцитивної сили. Для оцінки структурного стану виробів використовували нові розроблені методики досліджень з використанням оптико-математичного опису фазового складу, а також процесів впливу дифузії, щільності фрагментів, що формуються, дисипації енергії. Велика увага приділялася оцінкам неоднорідності фаз, їх дисперсності, структурній анізотропії, а також спадкоємним властивостям металу виробів. Додатково дифузійні процеси при розпаді аустеніту та деформації зі створенням нових фаз, та їх склад, оцінювали експериментально та теоретично.

3. Розроблено нові підходи до теоретичної оцінки структуроутворення хромовмісних сплавів і покриттів, які включають поєднання умовних кольорів (фаз) і абсолютних значень лапласіана матриці (відповідно фрагменту зображення). Для опису ступеня неоднорідності формуємої структури використовували параметр мінливості поєднань фаз, що оцінює мікроліквіацію хімічних компонентів, в тому числі, і в області дефектів кристалічної будови - дислокацій. Процеси дифузії і деформації описували через зміну енергетичного стану системи, відповідно ступеню дисперсності структури. Така оцінка структуроутворення пройшла перевірку мінливості фаз при експериментальному проведенні низькотемпературної циклічної ТО в інтервалі температур магнітного перетворення карбідних фаз і показала достатній збіг результатів. Така термообробка сприяє формуванню нових фаз і це дозволяє прогнозувати оцінка функції потужності дисипації енергії.

Встановлені чинники і виконана оцінка характеру деградації фази карбіду в валковому хромовмісному чавуні. Показано, що вона визначається процесами, пов'язаними з формуванням дислокаційної структури і дифузії, при яких відбувається поява карбідних фаз типу $Me_{23}C_6$ та Me_xC_y , а також квазікристалічний графіт, ферит і бейніт. Виявлено типи поєднань таких фаз, доля їх співвідношення, а також визначена ступінь нестабільності карбідної фази Me_7C_3 . Розроблено рекомендації щодо підвищення її стабільності. Отримана інформація щодо чинників і характеру деградаційних процесів карбідної фази, які визначають загальну експлуатаційну стійкість прокатних валків, та це є ефективним для використання при розробках нових комплексних технологій їх виробництва, зі збереженням необхідного рівня твердості. Вперше отримані результати показують, що інтенсифікація дифузійних процесів в умовах локальних деформацій супроводжується зміною щільності дислокацій і створенням упорядкованої структури. Показано, що локальні напруження, які формуються від ефекту магнітострикції, сприяють розпаду залишкового аустеніту і формуванню нових дисперсних фаз.

4. Для прогнозування структуроутворення проведено визначення параметрів, що мають найбільший вплив на його зміну. Оцінки ґрунтувалися на розподілі фаз, отриманні гістограм їх розподілу, оцінках дисипації енергії в результаті роз-

витку процесів дифузії і зміни щільності аналізованих фрагментів. При моделюванні використовували метод Монте-Карло, при якому, на основі фактичних статистичних характеристик, створювали потоки випадкових чисел. Аналізом різних моделей було встановлено, що для достовірної оцінки необхідно враховувати анізотропію структури і властивості, а також локальну неоднорідність сформованих фаз і визначати граничні умови, за рівнянням Лапласа. Теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили вплив використаних технологічних факторів на структуроутворення і твердість (основний нормований критерій відповідно до НТД) і показали ідентичність їх оцінки.

5. При моделюванні локальної неоднорідності структурних складових рекомендується використовувати комплексний параметр M' -трийок, який становить собою упорядкований набір факторів, що складається із трьох дійсних цілих чисел (S і M - функції напружень і потужності дисипації енергії, а також t_{ij} - детермінанта квадратної матриці, утвореної енергетичними параметрами), обчислюваних через дивергенцію і оператор Лапласа в розглянутій точці металографічного зображення. У такий аналіз був додатково введено метод оцінки (задаючи і змінюючи енергетичні параметри) мікроструктури з поворотом зображення на кути від 1° до 45° . Це пов'язано з тим, що при відборі проб для досліджень у вигляді кільця від торця валка не завжди вдається чітко встановити напрям тепловідведення (визначити поздовжній і поперечний напрям). Даним аналізом чітко виявляється максимальна неоднорідність фаз сплаву.

6. На основі використання розробленого оптико-математичного методу опису енергетичних параметрів структуроутворення запропоновано провести перевірку ефективності комплексного підходу для оцінки ступеня локальної неоднорідності, яка формується в різних фазах при розвитку напружень II роду. Розробки базуються на виявленні, аналізі змін дислокаційної структури і дисперсності фаз. Крім того, використовується функція потужності дисипації енергії, що відображає процеси, що відбуваються при литті, пластичної деформації, термообробці. Встановлено, що в процесі кристалізації масивних виливків з хромовмісних сплавів, при їх тривалому охолодженні (до 76 год) і в залежності від параметрів технології виробництва, відзначається формування дефектів кристалічної будови, які, в залежності від виникаючих локальних деформацій, сприяють інтенсифікації дифузійних процесів.

7. Для розробки оптимальних параметрів і режимів термічної обробки аналізували 18 експериментальних процесів відпалу на валках з високохромистого чавуну. Виявлено критерії, які найбільш повно відображають структурний і енергетичний стан системи і визначають зв'язок з твердістю і коерцитивною силою. Аналіз проводили в 4 етапи, які відображали вплив різних чинників (теоретичних і експериментальних). Встановлено, що у всіх досліджуваних варіантах термообробки така технологічна операція підвищує коефіцієнт кореляції, в середньому, на 9.8%. Найбільший вплив на твердість надають: ступінь дисперсності фаз, пов'язаної зі спадковістю (до 56%); неоднорідність структури за мінливістю умовних кольорів (16%); функція потужності дисипації енергії (9%); показник коерцитив-

ної сили (3%). Оптимальним режимом термічної обробки високохромистого чавуну є триступеневий відпал (350°C, 500°C, 500°C), при якому забезпечується твердість, яка відповідає вимогам НТД (63.4-69.2НС). Її зниження, в порівнянні з литим станом, незначне (на 1.0-1.5%). Одночасно частка голчастих структур зростає з 14.3% до 19.4%, а залишкового аустеніту - не перевищує 1.8%. Отримані математичні моделі добре узгоджуються з результатами експериментів.

8. Експерименти по застосуванню процесу хромування для зміцнення робочої поверхні прокатних валків листових станів виявилися не ефективними у зв'язку з технічними можливостями реалізації такого процесу, а також через велику їх масу і вимоги по глибині зони зміцнення. Тому досліджували деталі малого розміру (паливної апаратури машин). Застосування електролітичного хромування покриттів з модифікуванням дисперсними алмазами дозволило в процесі експлуатації оперативно відновлювати робочу поверхню, навіть при попередньому плівковому зміцненню плазмовим методом W-Co-C. Для його реалізації розроблена спеціальна технологія і пристосування, що забезпечує рівномірний розподіл такої модифікуючої домішки, яка змінює умови кристалізації (відсутнє газовиділення, підвищується твердість в 1.5-2.0 рази, коефіцієнт тертя знижується до 20%). При модифікуванні електроліту дисперсними алмазами неоднорідність покриття, оцінена теоретично. Вона зменшується в 2.0-3.0 рази.

9. На основі теоретичних і експериментальних досліджень виробництва хромовмісних сплавів і покриттів розроблені методи моделювання і встановлено внесок різних параметрів, що описують зв'язок структуроутворення зі споживчими властивостями виробів. Це дозволило прогнозувати і обґрунтувати параметри технологічного виробництва та відновлення виробів при експлуатації.

Фактичний економічний ефект від виконаних розробок щодо підвищення властивостей зміцнювальних покриттів при відновленні деталей в умовах ремонтного підприємства ТОВ «Дизельсервіс», м. Харків, склав 73,8 тис. грн обсягом – 57 одиниць. Очікуваний економічний ефект на металургійних підприємствах від виконаних розробок щодо підвищення стійкості прокатних масивних валків листових станів буде складати 910 тис. грн. при обсязі їх виробництва 1300т. Нові технологічні процеси виробництва і зміцнення, а також оригінальні підходи і методи досліджень захищені 8 патентами України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Скобло Т.С., Сидашенко О.І., Александрова Н.М., Белкин Е.Л., Власовець В.М., Ключко О.Ю., Мартиненко О.Д. Производство и применение прокатных валков. *Довідник: Під ред. проф. Скобло Т.С. Х.: ЦД № 1. 2013. 572 с.*
2. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сидашенко О.І., Белкин Е.Л. Теоретические и экспериментальные основы прогнозирования структурообразования, свойств высокоуглеродистых легированных сплавов. *Монографія: Під ред. проф. Т.С. Скобло. Х.: Діса плюс. 2019. 278с.*
3. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L. Structure of high-chromium cast iron. *Steel in Translation. 2012. 42 (3). P.261–268.*

4. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Sidashenko A.I., Sokolov R.G. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers. *Steel in Translation*. 2013. 43(9). P.603-606.
5. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л., Сидашенко О.І. Новые подходы в исследовании неоднородности гетерогенных структур. *Металофізика та новітні технології*. 2018. 40 (2). С.255-280.
6. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Исследование структуры высокохромистого комплекснолегированного чугуна с применением методов математического анализа. *Сталь*. 2012. №3. С.46-52.
7. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. 78(6). С.35-42.
8. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сидашенко О.І., Соколов Р.Г. Разработка технологии термообработки двухслойных прокатных валков из легированных чугунов. *Сталь*. 2013. №9. С.77-80.
9. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Тришевський О.І. Разработка методов повышения эксплуатационной стойкости изделий из высокохромистого чугуна. *Автомобільний транспорт: зб. наук. праць. Х.: Харківський національний автомобільно-дорожній університет*. 2012. Вип.31. С.136-146.
10. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сидашенко О.І., Белкин Е.Л. и др. Оценка структурообразования при деформации в малоуглеродистых сталях. *Сталь*. 2014. №9. С.65-70.
11. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Математическая оценка особенностей структурообразования высоколегированных чугунов. *Материаловедение*. М.: Наука и технологии. 2014. №8. С.6-11.
12. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. та інші. Разработка методов оценки структуры рельсов, закаленных ТВЧ. *Сталь*. 2014. №3. С.74-82.
13. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Определение микротвердости структурных составляющих высокохромистых чугунов в результате математической обработки их изображений. *Х.: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства: Проблеми надійності машин та засобів механізації с/г виробництва*. Вип. 151. 2014. С.183-189.
14. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сидашенко О.І., Белкин Е.Л. Особенности структурообразования в высокохромистых чугунах. *Х.: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства..* Вип.146. 2014. С. 186-191.
15. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сидашенко О.І. та інші. Особенности износа деталей топливной аппаратуры современных дизельных двигателей. *Проблеми трибології*. 2014. №1. С.6-13.
16. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Исследование структуры высоколегированных сплавов математическим методом. М.: *Вестник Московского государственного агроинженерного университета*. 2015. 69 (№5). С.31-36.
17. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сидашенко О.І. та інші. Исследование влия-

ния УДА при восстановлении и упрочнении деталей узлов топливной аппаратуры. *Проблеми трибології*. 2015. 75 (№1). С. 106-112.

18. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. та інші. Оценка степени неоднородности карбидов гетерогенных сплавов методом оптико-математического анализа при помощи изменчивости условных цветов. 2016. *Х.: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Вип.168. С.174-186.

19. Ключко О.Ю. Применение методов оптико-математического анализа оценки дисперсности структуры высокоуглеродистых сплавов. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. №6. С.112-117.

20. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л., Сидашенко О.І. Исследование структуры высокохромистых чугунов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. 83(№5). С.27-38)

21. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л., Сидашенко О.І. Математический анализ оценки дисперсности структуры легированных чугунов. *Сталь*. 2017. №2. С.51-54.

22. Ключко О.Ю. Оценка оптико-математическим методом локальной неоднородности высокоуглеродистых сплавов, образованной в результате РТО. *Х.:Вісник Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2017. Вип. 183. С.20-30.

23. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. Исследование локальной структурной неоднородности в сером чугуне оптико-математическим методом. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. №8. С.193-200.

24. Skoblo T., Klochko O., Belkin E., Sidashenko A. Effective Technological Process of Crystallization of Turning Rollers' Massive Castings: Development and Analysis. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy: NY, USA*. May 2017. 2(3). P.34-39.

25. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сидашенко О.І. та інші. Оценка локальной структурной неоднородности в отливках из серого чугуна. Научно-практический журнал: *Агротехника и энергообеспечение*. ФГБОУ ВО Орловский ГАУ. 2017. 17(№ 4). С. 141-150.

26. Ключко О.Ю. Новая методика оценки и исследования структур, моделированием их локальной неоднородности. *Х.: Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2018. Вип. 80. С.80-89.

27. Ключко О.Ю. Математичне моделювання металографічного зображення за допомогою рішення граничних задач для рівняння Лапласа. *Математичне моделювання*. 2018. 38 (№1). С124-133.

28. Спосіб оцінки стану зношення деталей інжекторів дизельних двигунів: пат. 88376 Україна: МПК F02M 65/00(2014.01) /Скобло Т.С., Шержуков І.Г., Ключко О.Ю. та інші.; № u201312592; заявл. 28.10.2013; опубл. 11.03.2014, Бюл.№ 5.

29. Спосіб оцінки зношування і залишкової товщини робочого шару деталей з плівковими покриттями: *пат. 99408 Україна*: МПК G01B 21/08 (2006.01) /Скобло Т.С., Ключко О.Ю. та інш.; № u201406168; заявл.04.06.2014; опубл. 10.06.15, Бюл. № 11.

30. Спосіб одержання зносостійких електролітичних покриттів, зміцнених наночастинками: *пат. 95887 Україна*: МПК C25D 15/00 (2015.01) /Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сідашенко О.І. та інш.; № u201408166; заявл.18.07.2014; опубл. 12.01.15., Бюл. № 1.

31. Зносостійкий високолегований чавун: *пат. 102160 Україна*: МПК C22C 37/00 (2015.01) /Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сідашенко О.І.; № u201500809; заявл.02.02.2015; опубл. 26.10.15., Бюл. № 20.

32. Спосіб виробництва прокатних валків: *пат. 105761 Україна*: МПК B21B 27/00, B22D 23/00 (2015.01) /Скобло Т.С., Автухов А.К., Ключко О.Ю. та інш.; №u201507442; заявл.24.07.2015; опубл. 11.04.16, Бюл. № 7.

33. Спосіб виявлення неоднорідності фаз у високовуглецевих сплавах: *пат. 120043 Україна*: МПК C22C 38/00 (2017.01) /Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сідашенко О.І., Белкін Й.Л.; № u201702695; заявл.22.03.2017; опубл. 25.10.17, Бюл. № 20.

34. Метод визначення гетерогенної структурної неоднорідності: *пат. Україна*: МПК C22C 38/00 (2019.01) /Скобло Т.С., Романюк С.П., Ключко О.Ю. та інш.; № u201805708; заявл.22.05.2018; висн. про видачу 1.08.2019.

35. Спосіб відновлення деталей зміцнюючим покриттям: *пат. Україна*: МПК F02M 65/00 (2019.06) /Скобло Т.С., Плугатарьов А.В., Ключко О.Ю. та інш.; №u201905575; заявл. 07.06.2019; висн. про видачу 22.10.2019.

Праці апробаційного характеру:

36. Klochko O. The predicting methods for the structural state of heterogeneous alloy. Book of Abstracts: *10th Interdisciplinary Conference Nature-Human-Culture with the Statement of the Polish ASAP Chapter*. Wydawnictwo Uniwersytetu Pedagogicznego. Poland, Kraków, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/333648370_Book_of_Abstracts

37. Скобло Т.С., Ключко О.Ю. та інш. Особенности износа ножей для переработки сахарной свеклы. *Сб. трудов Междун. научно-практич. конф., посвящ. 70-летию ЮКГУ им. М.Ауэзова* (Казахстан, м.Шимкент, 1-9 липня 2013р.). Шимкент, 2013. С.185-197.

38. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. Исследование особенностей структурообразования высокоуглеродистых легированных сплавов методом математического описания. *Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов*: материалы XXII Уральской школы металловедов-термистов. Оренбург, 2014. С.139-142.

39. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Тимченко В.А. Исследование влияния графитизирующих добавок на повышение технологичности валковых высокохромистых чугунов. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2019. 75 (№3). С. 52-56.

40. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Ключко О.Ю. та інш. Неразрушающие ме-

тоды контролю качества валков. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2017. 56 (№7). С. 53-58.

41. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сідашенко О.І. та інші. Разработка технологии повышения стойкости листопркатных валков. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2017. 59 (№10). С. 53-58.

42. Ключко О.Ю., Шевченко Е.В. Методы выявления дислокаций, для определения неоднородности фаз. *Нові і нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: матеріали міжн. наук.-техн. конф. (м. Одеса, ОНПУ 26–29 вересня 2018р.)*. Одеса, 2018. С.69-71.

43. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л., Тришевський О.І. Исследования микроструктур гетерогенных сплавов методом математического анализа при помощи сочетаний условных цветов и абсолютных значений лапласианов. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2015. 31 (№7). С.52-56.

44. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. Новые подходы описания гетерогенной структуры высокоуглеродистых сплавов математическим методом. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в Фокусе*. 2014. №2. С.46-50.

45. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сідашенко О.І. Структура и свойства термообработанных заэвтектоидных сталей для прокатных валков. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 45 (№8). 2016. С.56-58.

46. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сідашенко О.І. Новый сплав для изделий, работающих в условиях повышенного износа и высоких циклических механических и температурных нагрузок. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2015. 36 (№12). С. 56-58.

47. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. та інші. Исследование особенностей структурообразования в гетерогенных сплавах. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2016. №3. С.53-58.

48. Скобло Т.С., Плугатарьев А.В., Ключко О.Ю. та інші. Способ определения износа деталей инжекторов дизельных двигателей. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в Фокусе*. 2013. №12. С.52-54.

49. Т.С.Скобло, О.Ю.Ключко, Р.Г.Соколов Анализ эксплуатационной стойкости рабочих прокатных валков широкополосных станов из высокохромистого чугуна. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в Фокусе*. 2013. №5. С.54-56.

50. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Плугатарьев А.В. та інші. Особенности износа деталей топливной аппаратуры с пленочным покрытием. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2015. 25(№1). С.57-58.

51. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сідашенко О.І. та інші. Особенности структурной деградации в отливках из серых чугунов, работающих в условиях нагружения. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 41(№4). 2016. С.55-57.

52. Ключко О.Ю. Исследование энергетического состояния микроструктуры

рельсової сталі при допомозі оптико-математического аналізу. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2018. 68 (№7). С.57-58.

53. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сідашенко О.І. Хромосодержащие покрытия, виды, применение и технологии получения. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2019. 74 (№2). С. 52-56.

54. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Й.Л. Исследование зависимости микротвердости структурных составляющих легированных чугунов оптико-математическим анализом. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2018. 71(№10). С.54-57.

55. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сідашенко О.І. та інш. Особенности износа деталей топливной аппаратуры двигателей внутреннего сгорания. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2019. 77 (№5). С. 56-58.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

56. Клочко О.Ю., Скобло Т.С. та інш. Анализ температурных полей отливок прокатных валков при кристаллизации. *Ежемесячн. промышл. журнал: Промышленность. Focus Plus*. Харьков: Полиарт. 2012. №8. С.38-44.

57. Скобло Т.С., Безлюдько Г.Я., Клочко О.Ю. та інш. Влияние пластической деформации на структуру и свойства стали 20. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в Фокусе*. 2013. №11. С.25-30.

58. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сідашенко О.І. та інш. Расчет контактных напряжений в прокатных валках, возникающих при эксплуатации. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2017. 52(№3). С.54-58.

59. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сідашенко О.І. та інш. Разработка нового методического подхода к выявлению дефектных структур в рельсовых сталях *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 51(№2). 2017. С.53-58.

АНОТАЦІЯ

Клочко О.Ю. Теоретичне та експериментальне моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей хромовмісних сплавів та покриттів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство (13 – Механічна інженерія). Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України. Харків, 2019.

У дисертаційній роботі представлені нові науково обґрунтовані результати, які узагальнюють і забезпечують вирішення актуальної науково-технічної проблеми – теоретичного і експериментального моделювання і прогнозування основних факторів, що впливають на структуроутворення і властивості хромовмісних сплавів та покриттів для коригування складу, технології виробництва, експлуатації виробів, що працюють в складних умовах тертя і зношування. На основі дос-

ліджень запропоновано загальний комплексний підхід оцінки впливу різних факторів виробництва на структуроутворення та властивості хромовмісних сплавів, який полягає в поєднанні сучасних методів дослідження з новими розробленими методиками оптико-математичного оцінювання фазового складу, що описують процеси дифузії, щільності фрагментів, та вони базуються на основних положеннях зміни енергетичного стану системи. Розроблено нові підходи до теоретичної оцінки структуроутворення хромовмісних сплавів і покриттів, що включають визначення поєднань фаз (умовних кольорів) і абсолютних значень лапласіана матриці (фрагмента зображення), через які досліджені неоднорідність сформованих фаз і їх дисперсність, структурна анізотропія, що утворилась при виготовленні та експлуатації виробів. Запропоновано принципово новий підхід для опису ступеня неоднорідності сформованої структури з використанням мінливості фаз (умовних кольорів) та їх поєднань, що оцінює мікроліквіацію хімічних компонентів, в тому числі, і в області дефектів кристалічної будови – дислокацій. Оптико-математичним методом через зміну енергетичного стану системи описано процеси дифузії при розпаді аустеніту і розвитку процесів локальної деформації. Показано, що інтенсифікація дифузійних процесів супроводжується зміною ступеня дисперсності структури, підвищенням щільності дислокацій, виділенням окремих фаз фериту, насичених вуглецем, а також бейніту, карбідів нестехіометричного складу, а також їх взаємозв'язком. Встановлені чинники і оцінено характер деградації карбідної фази в валковому хромовмісному чавуні. Показано, що таку деградацію визначають процеси, пов'язані з формуванням дислокаційної структури і дифузії, при яких відбувається поява нових типів карбідних фаз нестехіометричного складу, квазікристалічного графіту, а також фериту та бейніту. Виявлено типи поєднань таких з'єднань. Для прогнозування структуроутворення розроблено новий підхід до моделювання за допомогою вперше визначених параметрів, що мають найбільший вплив на його зміну. Цей підхід ґрунтується на оцінках мінливості фаз (згідно умовних кольорів), отриманні гістограм їх розподілу та дисипації енергії в результаті розвитку процесів дифузії і зміни щільності аналізованих фрагментів. Розроблено методику визначення оптимальних параметрів і режимів термічної обробки масивних прокатних валків із хромовмісного сплаву математичним моделюванням за допомогою критеріїв, які найбільш повно відображають його структурний і енергетичний стан та визначають зв'язок з твердістю і коерцитивною силою. Проведена теоретична оцінка структурної неоднорідності хромовмісного зміцнювального покриття, модифікованого наноалмазами за розробленою технологією, з дослідженням зміни абсолютного значення дивергенції, яке характеризує рельєф поверхні (створення зон стиснення і скидання), що формуються на поверхні тертя деталей при експлуатації. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що згідно представлених нових науково обґрунтованих теоретичних та експериментальних результатів моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей, розроблені та узагальнені ефективні параметри кристалізації та термообробки. Отримані дані дозволяють з високою точністю оцінювати і прогнозувати вплив різних чинників на рівень

властивостей робочого шару і експлуатаційну стійкість виробу в цілому, корегувати структуроутворенням і технологічним процесом виготовлення виробів. На основі розробок створені сучасні прогресивні технології, що дозволили забезпечити підвищення експлуатаційних властивостей масивних виробів з хромовмісних сплавів, які працюють в складних умовах зношування та тертя. Узагальнення результатів, отриманих при застосуванні електролітичного хромування покриттів з модифікуванням дисперсними алмазами для зміцнення робочої поверхні на деталях малого розміру (паливної апаратури машин), дозволило розробити спеціальну технологію їх нанесення. Це змінює умови кристалізації, в наслідок чого стає відсутнім газовиділення, істотно зменшується неоднорідність і підвищується твердість (знижується коефіцієнт тертя) такого покриття. Економічний ефект від впровадження нових розробок, захищених патентами, на ТОВ «Дизельсервіс», м.Харків, складає 73,8 тис. грн при обсязі виробництва 57 одиниць. Очікуваний економічний ефект від впровадження нових технологій, захищених патентами, на вальцеливарних підприємствах складе 910 тис. грн. при обсязі виробництв 1300 т.

Ключові слова: хромовмісні сплави і покриття, прогнозування структуроутворення, моделювання, оптико-математична оцінка, споживчі властивості, технологічні параметри, стабільність структури, неоднорідність

АННОТАЦІЯ

Ключко О.Ю. Теоретическое, экспериментальное моделирование и прогнозирование структурообразования и свойств хромосодержащих сплавов и покрытий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2019.

В диссертационной работе представлены новые научно обоснованные результаты, обеспечивающие решение актуальной научно-технической проблемы – теоретического и экспериментального моделирования и прогнозирования основных факторов, влияющих на структурообразование и свойства хромосодержащих сплавов и покрытий для корректировки состава, технологии производства, эксплуатации изделий, работающих в сложных условиях трения и износа. На основе исследований предложен комплексный подход оценки влияния различных факторов производства на структурообразование и свойства таких сплавов, заключающийся в сочетании современных методов исследования с новыми разработанными методиками оптико-математического оценивания фазового состава, описывающих процессы диффузии, плотности фрагментов, базирующихся на основных положениях изменения энергетического состояния системы. Разработаны новые подходы к теоретической оценке структурообразования, включающих определение сочетаний фаз (условных цветов) и абсолютных значений лапласиана матрицы (фрагмента) изображения, с помощью которых исследованы неоднородность формирующихся фаз и их дисперсность, структурная анизотропия, образовавшаяся при изготовлении и эксплуатации изделий. Предложен

принципиально новый подход для описания степени неоднородности формирующейся структуры с использованием изменчивости фаз (условных цветов) и их сочетаний, оценивающей микроликвацию химических компонентов, в том числе, и в области дефектов кристаллического строения - дислокаций. Оптико-математическим методом через изменение энергетического состояния системы описаны процессы диффузии при распаде аустенита и развитии процессов локальной деформации. Показано, что интенсификация диффузионных процессов сопровождается изменением степени дисперсности структуры, повышением плотности дислокаций, выделением отдельных фаз феррита, насыщенных углеродом, а также бейнита, карбидов нестехиометрического состава, и их взаимосвязью. Установлены факторы и оценен характер деградации карбидной фазы в валковом хромсодержащем чугуна. Показано, что такую деградацию определяют процессы, связанные с формированием дислокационной структуры и диффузии, при которых происходит появление новых типов карбидных фаз нестехиометрического состава, квазикристаллического графита, а также феррита и бейнита. Выявлены типы сочетаний таких соединений. Для прогнозирования структурообразования разработан новый подход к моделированию с помощью впервые определенных параметров, имеющих наибольшее влияние на его изменение. Этот подход основан на оценках изменчивости фаз (согласно условных цветов), получении гистограмм их распределения и диссипации энергии в результате развития процессов диффузии и изменения плотности анализируемых фрагментов. Разработана методика определения оптимальных параметров и режимов термической обработки массивных прокатных валков из хромсодержащих сплавов математическим моделированием с помощью критериев, наиболее полно отражающих их структурное и энергетическое состояние, а также связь с твердостью и коэрцитивной силой. Проведена теоретическая оценка структурной неоднородности хромсодержащего упрочняющего покрытия, модифицированного наноалмазами по разработанной технологии, исследование изменения абсолютного значения дивергенции, характеризующей рельеф поверхности (создание зон сжатия и сброса), формирующегося на поверхности трения деталей при эксплуатации. Практическое значение полученных результатов заключается в разработке и обобщенных эффективных параметров кристаллизации и термообработки. На основе чего созданы современные прогрессивные технологии, обеспечивающие повышение эксплуатационных свойств массивных изделий из хромсодержащих сплавов и работающих в сложных условиях износа и трения. Экономический эффект от внедрения разработок в производство по данным ООО «Дизельсервис», г.Харьков, составляет 73,8 т.грн. при объеме производства 57 единиц. Ожидаемый экономический эффект от внедрения новых технологий на вальцелитейных производствах составит 910 т. грн. При объеме производства 1300т.

Ключевые слова: хромсодержащие сплавы и покрытия, прогнозирование структурообразования, моделирование, оптико-математическая оценка, потребительские свойства, технологические параметры, стабильность структуры, неоднородность

ANNOTATION

Klochko O.Y. Theoretical and experimental modeling and prediction of the structure formation and properties of chromium-containing alloys and coatings. - Qualification scientific work (manuscript).

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences by specialty 05.02.01 - Material Science. – Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The Thesis presents the new scientifically substantiated results that summarize and provide solution of the actual scientific and technical problem: theoretical and experimental modeling and prediction of the main factors which affect structure formation and properties of chromium-containing alloys and coatings. This study is applicable for correction of composition, manufacturing process and production operations under the difficult conditions of friction and wear. On the basis of the studies presented in my Thesis, the general complex approach of the influence estimation of various factors of production on the structure formation and chromium-containing alloys properties is offered. This approach consists in combination of modern research methods with newly developed methods of optical-mathematical estimation of phase composition, which describe processes of diffusion, fragments density, and are based on the estimates of change of the system energy state. The new approaches to theoretical estimation of the structure formation of chromium-containing alloys and coatings have been developed, including specification of phases combinations (conventional colors) and absolute values of the Laplacian matrix (image fragment), through which we have studied the heterogeneity and dispersion of the formed phases, as well as structural anisotropy that has appeared during the production and service. We propose a fundamentally new approach to describe the degree of heterogeneity of the formed structure. Do so, the data on phase variability (conditional colors) and combinations of phases is used followed by the evaluation of chemical components coring, in the vicinity of crystalline structure defects (dislocations), included. Taking to account energy state change of the system, we apply our optical-mathematical method to describe diffusion processes in the decay of austenite and development of local deformation processes. It has been shown that the intensification of diffusion processes is accompanied by change in the degree of structure dispersion, increase in the dislocation density and by separation of individual carbon-saturated ferrite, bainite and non-stoichiometric carbide phases, and by their interconnection. We determine factors and features of carbide phase degradation in roll chromium-containing cast iron. It is shown that such degradation is determined by the processes associated with the formation of dislocation structure and diffusion, in which occur the new types of carbide phases of non-stoichiometric compositions, quasicrystalline graphite, ferrite and bainite. The types of combinations of such compounds are identified. To predict structure formation, a new approach to modeling has been developed using the parameters first defined by the Author that have the greatest impact on changing it. This approach is based on estimations of phase variability (according to conventional colors), obtaining histograms of their distribution and energy dissipation as a result of the development of diffusion processes and analyzed

fragments density changes. We have carried out a technique for determining the optimal parameters and modes of heat treatment of massive rolling rolls of chromium-based alloy by mathematical modeling and using the criteria that to the fullest extent possible reflects its structural and energy state and determine the relation between hardness and coercive force. A theoretical estimation of the structural heterogeneity of chromium-containing nano-diamond modified coating has been made. The practical importance of the obtained results is that according to the newly presented scientifically substantiated theoretical and experimental results of modeling and prediction of structure formation and properties, effective crystallization and heat treatment parameters are developed and generalized. On the basis of our implementations, the modern advanced technologies have been created allowing one to increase the operational properties of massive articles of chromium-containing alloys, which operate in difficult conditions of wear and friction. According to the manufacturer, the economic effect of the results introduces is 73.800UAH with the volume of production 57 units. The expected economic impact from the introduction of our technology is 910.000UAH with the volume of production 1300t.

Keywords: chromium-containing alloys and coatings, structure forming prediction, modeling, optical-mathematical estimation, consumer properties, technological parameters, structure stability, heterogeneity

