

Запорізький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

НЕТРЕБКО ВАЛЕРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 669.15 – 196



**НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ
МЕХАНІЧНИХ І СЛУЖБОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ**

05.02.01 – Матеріалознавство

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Запоріжжя – 2019 р.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Запорізькому національному технічному університеті (ЗНТУ) Міністерства освіти і науки України (МОН України), м. Запоріжжя.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки та техніки України **Волчок Іван Петрович**, професор кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України у галузі науки та техніки **Міщенко Валерій Григорович**, завідувач кафедри прикладної фізики і наноматеріалів, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

доктор технічних наук, професор **Власовець Віталій Михайлович**, професор кафедри тракторів і автомобілів, директор ННІ механотроніки і систем менеджменту, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, м. Харків

доктор технічних наук, професор **Єфременко Василь Георгійович**, завідувач кафедри фізики, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

Захист відбудеться «26» березня 2019 р. о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01 Запорізького національного технічного університету (вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Запорізька область, 69063).

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Запорізького національного технічного університету за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64 та на сайті університету у розділі «Наука» – «Спеціалізована вчена рада».

Автореферат розісланий «19_» лютого__ 2019 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01

доктор технічних наук, професор



О.А. Міт'єв.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема підвищення експлуатаційної стійкості деталей значної вартості, що експлуатуються в агресивних середовищах, є важливою для багатьох галузей України, особливо для гірничовидобувної, металургійної, хімічної та будівельної, у яких відбувається подрібнення й транспортування абразивних матеріалів у вигляді гідроабразивних сумішей. У зв'язку з низькою стійкістю деталей перекачувальних насосів, пульпопроводів, футеровок кульових млинів та інших механізмів під час експлуатації в умовах інтенсивного абразивного, гідроабразивного та корозійного зношування збільшуються витрати на ремонт та обслуговування обладнання. Для виготовлення цих деталей використовують високохромисті зносостійкі чавуни (ЗЧХ) різних систем легування. Найбільш використовуваними є хромонікелеві чавуни.

Розроблені Ю. Н. Тараном, А. О. Жуковим, К. П. Буніним та іншими вченими методи та принципи формування структури чавунів дозволили суттєво підвищити експлуатаційні властивості цих матеріалів. Але, більшість відомих марок були розроблені з метою отримання максимального терміну використання окремих деталей, іноді із погіршенням їх технологічних властивостей. Сучасні вимоги до виробів із ЗЧХ передбачають наявність суперечливих властивостей, а саме, значної зносостійкості та задовільної оброблюваності різанням. Для покращення оброблюваності таких чавунів (ЗЧХ) проводять пом'якшувальну термічну обробку (відпал), а після механічної обробки нормалізацію для відновлення твердості. Такий підхід потребує значних витрат енергоресурсів. Проте, термічною обробкою неможливо покращити оброблюваність різанням деяких високохромистих чавунів (300X28H2 та 250X12Г3Н3) через присутність значної кількості (понад 30 %) евтектичних карбідів, що забезпечують потрібну зносостійкість, та аустенітної металевої основи, що зміцнюється під час різання.

Існуючі уявлення про формування карбідних фаз, що утворюються в ЗЧХ, процесах розподілу та перерозподілу хімічних елементів під час кристалізації, охолодження виливку у формі та термічної обробки не дозволяють ефективно впливати на підвищення експлуатаційних властивостей та оброблюваності різанням виробів з цих матеріалів. На цей час не існує єдиної думки щодо формування карбідів у системі Fe-C-Cr. Це зумовлено тим, що кристалізація евтектики відбувається у інтервалі температур, а також з наявністю трьох перитектичних перетворень карбідів у рідкому стані та двох перитектоїдних у твердому. Крім цього, під час нагрівання та охолодження відбуваються поліморфні перетворення заліза (металевої основи) на фоні змінної розчинності вуглецю та хрому. Карбідні фази, що утворюються в процесі термічної обробки знаходяться за межами діаграми Fe – Fe₃C. На цю проблему звертають увагу С. В. Бобирь, В. З. Куцова, Л. Ю. Іонова та інші дослідники. Дані щодо хімічного складу

карбідів, наведені Е. Гудремоном, М. Л. Бернштейном, К. П. Буніним та іншими, свідчать, що головним карбідоутворювальним елементом є залізо, не зважаючи на значний вміст хрому. Отже, відома діаграма системи Fe-C-Cr потребує доповнення.

У ливарних цехах підприємств України, які виготовляють запасні частини та деталі механізмів, що експлуатуються в умовах абразивного, корозійного та гідроабразивного зношування, використовують чавун 300X28H2. Він має досить високу зносостійкість та задовільну корозійну стійкість. Головним недоліком цього чавуну є незадовільна оброблюваність різанням. Аналіз літератури та досвід застосування виробів із цього чавуну доводять існування суперечливих даних щодо його експлуатаційної стійкості у різних умовах використання. Отже, оптимізація хімічного складу та режимів термічної обробки ЗЧХ для різних умов експлуатації із урахуванням технологічних потреб є міжгалузевою науково-технічною проблемою. У зв'язку з цим, тема дисертаційної роботи є актуальною та має практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана згідно з тематикою науково-дослідних робіт кафедри «Композиційні і порошкові матеріали та технології» і кафедри «Обладнання та технології зварювального виробництва» ДВНЗ «ЗНТУ», а саме:

- ДБ 02912 «Підвищення конструктивної міцності сплавів на основі заліза та алюмінію» (№ держ. реєстрації – 0113U005194);
- ДБ 02712 «Підвищення надійності і зносостійкості матеріалів і деталей машин та обладнання» (№ держ. реєстрації – 0115U004669);
- ДБ 02715 «Забезпечення надійності та зносостійкості матеріалів і деталей машин та обладнання, що експлуатуються в екстремальних умовах» (№ держ. реєстрації – 0115U004671);
- ДБ 02915 «Підвищення механічних і службових властивостей сплавів на основі алюмінію та заліза» (№ держ. реєстрації – 0115U004672).

У вищеназаних роботах здобувач брав безпосередню участь як виконавець та використав здобуті результати у дисертації.

Мета й завдання дослідження. Головна мета роботи полягала в розвитку наукових і технологічних основ підвищення властивостей високохромистих чавунів та створенні на цій основі нових марок чавунів для різних умов експлуатації з урахуванням технологічних вимог. Зважаючи на те, що механічні, технологічні й експлуатаційні властивості ЗЧХ зумовлені їх хімічним складом, структурою металевої основи та кількістю карбідної фази, для підвищення їх властивостей необхідно було вирішити такі наукові й практичні завдання:

- провести систематизацію карбідних фаз та внести доповнення у діаграму Fe-C-Cr;

- вивчити закономірності й удосконалити теоретичні основи формування структури ЗЧХ на всіх етапах технологічного процесу виготовлення виливків;

- дослідити вплив карбідоутворювальних елементів (Cr та Mn) на формування металевої основи біля карбідів, а саме зони на межі розподілу фаз карбід – основа під час охолодження виливків у формі й термічної обробки;

- вивчити закономірності розподілу та перерозподілу легувальних елементів між фазами у процесі кристалізації, охолодження виливків у формі й термічної обробки;

- встановити взаємозв'язок між хімічним складом і структурою ЗЧХ, з одного боку, та їх твердістю, корозійною і гідроабразивною стійкістю й оброблюваністю різанням лезовим інструментом, – з іншого;

- розробити на підставі отриманих даних склади високохромистих комплекснолегованих чавунів та режими їх термічної обробки для різних умов експлуатації з урахуванням оброблюваності різанням;

- перевірити отримані результати під час виготовлення виливків із ЗЧХ на підприємствах України та надати рекомендації промисловій сфері щодо виробництва виливків із високохромистих комплекснолегованих чавунів. Використати матеріали досліджень у навчальному процесі.

Об'єкт досліджень – процеси формування й перетворення карбідної фази і металевої основи та зміни властивостей високохромистих чавунів.

Предмет дослідження – закономірності впливу хімічного складу на формування структури та властивості ЗЧХ, а також на розподіл легувальних елементів у литому стані та їх перерозподіл під час охолодження виливків у формі й термічної обробки.

Методи досліджень: Теоретичні дослідження розроблялись на основі фундаментальних положень матеріалознавства, металознавства, термічної обробки металів, корозійного руйнування і різних видів зношування матеріалів та металообробки різанням. Лабораторні й промислові дослідження виконано на сучасному устаткуванні та вимірювальній апаратурі, що пройшли метрологічний контроль і державну повірку. Плавлення сплавів проводили в індукційних та дугових печах.

Також були застосовані сучасні методи: мікроструктурного й локального мікрорентгеноспектрального аналізу. Для експериментальних досліджень механічних властивостей, оброблюваності різанням, зносостійкості та корозійної стійкості застосували відповідну науково-дослідну апаратуру. Обробка результатів досліджень та побудова різних математичних залежностей виконувалась із застосуванням методу мінімізації квадратів відхилень функції, методів математичної статистики та планування багатofакторного експерименту, а також кореляційного й регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів. Результати, які були отримані, мають наукове значення та суттєво сприяють розвитку основ матеріалознавства й структуроутворення у високохромистих комплекснолегованих чавунах у литому й термообробленому станах, а також дають змогу значно підвищити властивості цих матеріалів у процесі експлуатації при різних умовах зношування. Наукова новизна роботи полягає в такому:

1. Проведено систематизацію карбідних фаз та внесено доповнення в діаграму Fe-C-Cr у частині утворення карбідів у високохромистих чавунах. Раніше такі дослідження для високохромистих чавунів не проводились. Виявлені закономірності формування хімічного складу карбідів під час кристалізації та охолодження виливків у формі дали змогу визначити вимоги до складу, структури й термічної обробки досліджуваних чавунів з метою забезпечення високої експлуатаційної стійкості виробів за різних умов експлуатації та технологічних вимог.

2. Доведено, що хімічна ліквідація кристалів карбідів під час первинної кристалізації призводить до виникнення структурної неоднорідності. Карбіди, що утворюються у рідкому стані системи, мають шарувату будову із поступовим зменшенням вмісту хрому від центральних шарів до поверхневих та відповідні зміни кристалічної ґратки. Це дало змогу визначити механізм перерозподілу хімічних елементів під час охолодження виливків у формі та оптимізувати хімічні склади чавунів для виробів, що експлуатуються без термічної обробки.

3. Теоретично обґрунтовано та практично підтверджено перетворення карбіду заліза $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ під час термічної обробки (нормалізації) у карбіди $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ та $(\text{Cr,Fe})_3\text{C}_2$. Раніше такі дослідження не проводились. Виявлено, що процес перетворення карбідів відбувається шляхом виникнення у середині карбіду нової високохромистої фази, що викликає перерозподіл хрому та заліза і призводить до утворення зон твердого розчину заліза із низьким вмістом хрому в середині карбідів та металевій основі навколо карбідів. Отримані дані дадуть змогу керувати процесами формування хімічного складу металевої основи біля карбідів під час термічної обробки.

4. Вперше встановлено закономірності процесів, що відбуваються в зонах біля карбідів під час охолодження виливків у формі й термічної обробки. Раніше такі дослідження не проводились. Отримані закономірності дають змогу розробляти технологічні процеси виготовлення литих деталей для механізмів та виробів, що експлуатуються в різних агресивних середовищах.

5. Виявлено, що легування Mn впливає на розподіл Cr між фазами під час кристалізації, охолодження виливків у формі і термічної обробки (відпал чи нормалізація) та посилює збіднення на хром зон біля карбідів. Доведено, що зростання вмісту марганцю у чавуні збільшує збіднення

хромом зон біля карбідів. Кількісні дані про розподіл легувальних елементів у високохромистих чавунах при кристалізації, охолодженні виливків у формі та їх перерозподіл під час відпалу і нормалізації дають змогу оптимізувати хімічні склади та режими термічного оброблення чавунів для конкретних умов експлуатації.

6. Вперше встановлено, що за відпалу при 690...720 °С під час ізотермічної витримки (нижче за A_{c1}) у високохромистих чавунах, додатково легованих марганцем (понад 2 %), виникає ефект локального $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворення у зонах біля карбідів. Виникнення такого ефекту пояснюється зниженням температури перетворення внаслідок збільшення у цих зонах вмісту марганцю при зменшенні концентрації хрому. Перерозподіл хрому і марганцю відбувається внаслідок стабілізації карбідів. Виявлення цього ефекту дало змогу розвинути уявлення щодо формування хімічного складу металевої основи у зонах біля карбідів під час термічної обробки.

7. Запропоновано модель руйнування виробів із високохромистих чавунів під впливом ефекту Ребіндера та рух абразивних частинок. Особливістю такого зношування є те, що рух дрібних абразивних частинок уздовж карбідів призводить до появи тріщин та відокремлення значних фрагментарних об'ємів. Встановлення зв'язку між станом зон біля карбідів та зносостійкістю чавунів під час гідроабразивного зношування у середовищі із пульпою та без неї дало змогу оптимізувати хімічні склади чавунів для виробів, що експлуатуються в подібних умовах.

8. Встановлено залежності структури, механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей досліджуваних чавунів від вмісту С, Cr, Mn та Ni у литому стані та після різної термічної обробки. Встановлені залежності твердості, корозійної стійкості, розподілу елементів та оброблюваності різанням від компонентів сплаву за різних режимів термічної обробки дають змогу зменшити собівартість литва з високохромистих чавунів при одночасному збільшенні експлуатаційної стійкості виробів за різних умов експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на підставі теоретичних узагальнень та встановлених закономірностей структуроутворення в системі Fe-C-Cr-Mn-Ni розроблено склади зносостійких чавунів та режими їх термічної обробки для різних умов експлуатації з урахуванням технологічних вимог, а саме:

1. На підставі проведених досліджень було рекомендовано до впровадження у виробництво склади чавунів та режими їх термічної обробки, що дають змогу отримати економічний ефект у розмірі 3,18 млн грн на рік, у тому числі: на підприємстві ПП «СТРОЙМАШ» – 925,68 грн (акт від 16.01.2015 р.), ТОВ «ТВІНС-СЕРВІС ЛТД» – 573,804 тис. грн (акт від 14.03.2016 р.) та ТОВ «Запорізький титаномagneзійовий комбінат» – 1680,45 тис. грн (акт від 29.04.2016 р.).

2. Розроблено та захищено патентом на винахід чавун складу: 2,5...3,5 % C; 17...19,5 % Cr, 1,5...2,3 % Mn, 1,0...1,5 % Ni, 0,8...1,2 % Si та домішки (патент 113363 Україна). Цей зносостійкий сплав доцільно використовувати для виробництва особливо важливих деталей, що потребують значного обсягу механічної обробки лезовим інструментом.

3. Отримані наукові та практичні дані використовуються в початковому процесі на кафедрі «Обладнання та технологія зварювального виробництва» ЗНТУ при вдосконаленні курсів лекцій з навчальних дисциплін «Триботехніка та основи надійності машин», «Фізичні і металургійні процеси при наплавленні та напиленні», «Поверхневі фізико-хімічні процеси» та «Основи наукових досліджень», а також при виконанні студентами лабораторних, практичних і дипломних робіт (Акти впровадження від 12.12.2016 р. та 12.12.2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення дисертаційної роботи, що виносяться на захист, сформульовані автором особисто. Автору також належить ініціатива в постановці завдань та обґрунтуванні мети, планування та проведення досліджень, обробка й аналіз результатів експериментів, узагальнення відомих та отриманих експериментальних даних стосовно складу, структури, властивостей і використання зносостійких чавунів у литому стані та після термічної обробки, систематизація й теоретичне обґрунтування формування карбідних фаз, що утворюються у високохромистих чавунах, участь у промислових випробуваннях та впровадженні розробок у виробництво та навчальний процес.

Здобувачу належать 16 одноосібних публікацій, а саме: у фахових виданнях України і Білорусі [4]–[6], [9]–[14], [16], [18], [20]–[22], [25] та патент України [26]. Окрім цього, 13 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях [27]–[29], [31]–[38], [40]–[41], з яких дві зарубіжні [33], [41]. Особистий внесок автора у працях, опублікованих у співавторстві [1]–[3], [7], [8], [15], [17], [19], [23], [24], [30], [39] полягає в такому: аналіз літературних даних, постановка й обґрунтування мети дослідження, планування та проведення наукового експерименту, мікрорентгеноспектральні вимірювання хімічного складу фаз, натурні випробування, дослідження мікроструктури та властивостей, моделювання процесів перетворення карбідних фаз, аналіз та опис результатів, підготовка рукопису.

Апробація результатів дисертації. Матеріали та основні положення дисертаційної роботи були викладені, обговорені та здобули позитивну оцінку на 21 наукових конференціях і семінарах (у тому числі 5 зарубіжних), а саме: Міжнародних науково-технічних конференціях «Литейное производство и металлургия. Беларусь», Мінськ, Республіка Білорусь (2012, 2013, 2014 рр.); конференції «Інноваційні ресурсозбереженні матеріали та зміцнені технології», Маріуполь (2012 р.); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах», Запоріжжя (2012 р.); VI International Conference DEVELOPMENT TRENDS IN

MECHANIZATION OF FOUNDRY PROCESSES, Krakow – Inwald, Poland (2013); Перший Міжнародний науково-технічний конференції-виставці «Повышение надежности и долговечности оборудования нефтегазовой и химической промышленности», Бердянск (2013 р.); Стародубовських читаннях «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування», Дніпро (2013, 2014 рр.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпро (2013, 2014, 2015, 2016 та 2017 рр.); XIII Міжнародний науково-технічний конференції «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів», Запоріжжя (2014 р.); XXIII Міжнародному науково-технічному семінарі «Високі технології: тенденції розвитку / HIGH TECHNOLOGIES: TENDENCIES OF DEVELOPMENT», Одеса (2015 р.); III Міжнародний науково-технічний конференції «Машини та пластична деформація металів», Запоріжжя (2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука», Маріуполь (2015, 2016, 2017 рр.), International research and practical conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences». Radom, Republic of Poland (27–28 December, 2017).

Публікації. Основні результати і положення дисертації опубліковані в 41 науковій праці, включаючи 8 публікацій у зарубіжних фахових виданнях, з яких 1 публікація у журналі, що індексується в НБД Scopus, та 7 публікацій у журналах, що індексуються в НБД Google Scholar, а також 17 публікацій у фахових виданнях України, з яких 13 індексуються в НБД Index Copernicus, 1 патент України на винахід та 15 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг становить 383 сторінок, у тому числі 286 сторінок основного тексту, 56 таблиць, 160 рисунків, список використаних джерел (301 найменування) – на 29 сторінках, 8 додатків – на 42 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми та викладена сутність роботи. Проаналізовано стан проблеми, визначені мета й завдання роботи. Охарактеризовано наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, що виносяться на захист. Показано зв'язок роботи з науковими темами і особистий внесок здобувача. Наведені дані про публікації та апробацію результатів роботи, вказано структуру та обсяг дисертації.

Перший розділ містить аналітичний огляд наукових праць, що присвячені науковій проблемі, яка вирішується в дисертаційній роботі, а саме впливу хімічного складу та термічної обробки на структуру і властивості високохромистих чавунів із метою підвищення їх технологічних та

експлуатаційних властивостей. Уявлення про систему Fe–C–Cr формувались у процесі вивчення карбідних фаз. Відповідно до існуючих положень у високохромистих чавунах утворюються Fe_3C (цементит), із максимальною розчинністю хрому до 20 %, та карбіди M_{23}C_6 , M_7C_3 , M_3C_2 , в яких головним карбідоутворювальним елементом вважається хром.

У роботах А. О. Жукова та Г. І. Сильмана наводяться дані про існування карбіду Fe_7C_3 у системі Fe–C. Е. Гудремон, М. Л. Бернштейн, К. П. Бунін та інші дослідники наводять дані про карбіди, що містять 24...36 % Cr, в яких головним карбідоутворювальним елементом є залізо. Отже, у хромистих чавунах утворюються карбідні фази, що існують за межами системи Fe–Fe₃C і виникає потреба у систематизації подібних фаз. Таким чином, сучасна діаграма Fe–C–Cr не відображає усіх даних про утворення карбідних фаз у цій системі.

На підставі праць провідних вчених у галузі металургії, матеріалознавства, металознавства, металофізики, фізичної хімії, тертя і зношування: Н. Г. Гиршовича, Ю. М. Таран-Жовніра, В. Л. Найдека, К. П. Буніна, А. О. Жукова, Г. І. Сильмана, М. Е. Гарбера, І. І. Ципіна, М. М. Тененбаума, І. В. Крагельського, Б. І. Костецького, М. М. Хрущева, М. А. Бабічева та інших були визначені тенденції створення матеріалів для різних умов експлуатації. Проте, процеси формування структури і розподіл хімічних елементів у високохромистих чавунах під час охолодження виливків у формі та механізми їх руйнування в умовах гідроабразивного зношування та виникнення ефекту Ребіндера майже не досліджені.

Окрім того, під час розробок більшості марок зносостійких чавунів не були враховані технологічні вимоги (оброблюваність різанням). Проведено аналіз різних процесів руйнування виробів із ЗЧХ та інших матеріалів. Показано, що у переважній більшості руйнація починається на межі розділу фаз карбід-основа, особливо за корозійного процесу та у рідкому середовищі під дією ефекту Ребіндера. На підставі літературного огляду проблеми, визначені мета і задачі дослідження.

У другому розділі наведено опис методик та обладнання, що застосовувались під час експериментальних досліджень високохромистих чавунів різного хімічного складу (табл. 1). Плавлення сплавів проводилось в печах ІСТ–0,06, ІСТ–0,16/0,32/91 та ДСП–1,5 із кислото футеровкою.

Таблиця 1 – Діапазон зміни хімічного складу у досліджуваних чавунів

Хімічний елемент, мас. %						
C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
1,04...3,94	0,80...1,30	0,56...6,49	11,17...30,68	0,16...3,05	до 0,02	0,03...0,06

Для забезпечення високої точності хімічного складу чавунів, згідно плану експерименту, попередньо були виплавлені модельні сплави, у які додавалися легувальні елементи з урахуванням угару. Чавун розливали у форми, що були попередньо висушені, за температури заливки 1390...1410 °С. Із отриманих стрижнів довжиною 350 мм та діаметром 30 мм виготовляли зразки діаметром 25 мм з висотою 10 мм (рис. 2.1). З бокової поверхні зразків було зроблено маркування, що мало зберігатися за будь-яких умов дослідження. На боковий (циліндричний) поверхні та внизу справа маркувався номер складу досліджуваного чавуну, а над ним – номер зразка.

Для порівняння експлуатаційних та технологічних властивостей було обрано універсальний чавун 300X28H2 ТУУ 27.5-00194731-013-2002. Цей чавун у стані литва мав задовільну корозійну стійкість (0,72 г/м²год) у середовищі НСІ із рН=2,5. Корозійне руйнування мало місцевий характер і відбувалося шляхом значного травлення металевої основи біля карбідів. У середовищі сухого електрокорунду чавун мав значну зносостійкість (0,07 г/м²год). Присутність води збільшила втрати маси чавуну у 20 разів (1,53 г/м²год), а за присутності пульпи (частинок до 0,5 мкм) знос збільшився ще у два рази (3,04 г/м²год). Наявність карбідів (38 %) із мікротвердістю понад 1400 HV₅₀ призвела до значного зносу різця –39,6 мкм/м.

Оцінювання фізичного та механічного впливу різця на структуру ЗЧХ виконували на чавуні, що містив 3,33 % С, 19,2 % Cr, 5,86 % Mn, 2,84 % Ni та 1,1 % Si, за схемою точіння, наведеною на рис. 1а. Перед точінням торцева поверхня зразку була оброблена як металографічний шліф реактивом Марбле (рис. 1.б) та мала нанесені координатні риски через 2 мм (рис. 1.в). Точіння виконували за режимів: $n - 400 \text{ хв}^{-1}$; $t - 0,8 \text{ мм} / 1,5 \text{ мм}$; $s - 0,2 \text{ мм/об}$.

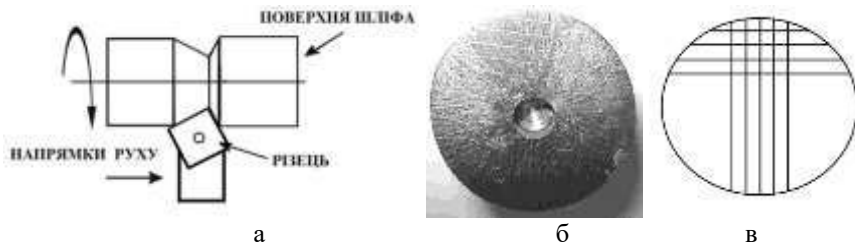


Рисунок 1 – Схема точіння зразка (а), вигляд зразка із рисками після травлення (б) та координатні риски (в)

Аналіз фізичного та механічного впливу різця на структуру та властивості ЗЧХ здійснювали шляхом порівняння структури та мікротвердості металевої основи, яку вимірювали від поверхні до центру зразка перед та після механічної обробки. Оброблюваність чавунів різанням при точінні визначалася методом еквівалентної інтенсивності зношування різця за методикою А. С. Кондратова. Визначали швидкість різання

матеріалів, що відповідає періоду стійкості $T = 60$ хв, а також вимірювали знос різця на одиницю довжини різання. Точіння виконували за режимів: $p - 200 \dots 630 \text{ хв}^{-1}$; $t - 0,8 \text{ мм}$; $s - 0,15 \text{ мм/об}$. Мастильно-охолоджувальну рідину не використовували.

Оцінку загальної корозійної стійкості чавунів виконували у водному розчині HCl (кислотне середовище) із $pH = 2,5$ за температури $18 \dots 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Зразки (усі одночасно) знаходились у підвішеному стані в розчині кислоти. Контроль pH середовища відбувався через 2-3 дні з оцінюванням змін у середовищі та коригуванням кислотності до рівня $pH = 2,5$. Оцінку загальної корозії обраховували за втратою маси з одиниці площі поверхні зразків за певний час ($\text{г/м}^2\text{год}$). Вплив абразивного та гідроабразивного середовища на зносостійкість чавунів досліджувався у масі абразивних частинок (електрокорунд нормальний марки 14А, зерно F12 ТУУ 26.8-00222226-016:2006, фракції 3,5 мм) на установці барабанного типу. Оцінку зношування виконували за втратою маси з одиниці площі поверхні зразків за певний час ($\text{г/м}^2\text{год}$).

Обробка результатів проводилась із використанням методів математичної статистики та кореляційного й регресійного аналізів. Регресійні залежності були отримані з використанням методу мінімізації квадратів відхилень функції. Дисперсійний аналіз отриманих залежностей проводили відповідно до стандартних методик із використанням критеріїв: адекватності F – критерій (Фішера); значущості t – критерій (Ст'юдента) та відтворення G – критерій (Кохрена).

Використання сучасного обладнання для дослідження мікроструктури, локального мікрорентгеноспектрального аналізу, вимірювання твердості, мікротвердості, швидкості корозії, оброблюваності різанням та зносостійкості за гідроабразивного зношування, що пройшло метрологічну повірку, дало змогу отримати результати з достатньою точністю. Достовірність отриманих результатів було забезпечено використанням відомих методик, які базувалися на основних фундаментальних положеннях матеріалознавства, фізичного металознавства, корозійного та абразивного зношування, основ металообробки різанням, а також даних практичних випробувань на підприємствах України.

У третьому розділі наведено результати досліджень закономірностей формування структури у системі Fe–C–Cr–Mn–Ni та розподілу хімічних елементів поміж фазами (карбідами та металевою основою) під час первинної кристалізації і охолодженні виливку у формі. Властивості карбідів зумовлені їх природою, а саме тим, що вони є тверді розчини на базі хімічної сполуки.

На підставі літературних даних та власних розрахунків проведена систематизація карбідів, що утворюються у системах Fe–C–Cr та Fe–C–Mn. Запропонована ідентифікація карбідної фази у атомарних відсотках із перерахуванням у масові дозволила визначити зони існування різних карбідів. Встановлено, що при заміщенні в карбідах атомів заліза на атоми

хрому чи марганцю, при збереженні співвідношення у атомарних відсотках, значно змінюється вміст цих елементів у масових відсотках. Результати аналізу дають змогу стверджувати, що легування цементиту хромом збільшує масовий вміст С від 6,69 мас.% до 6,8 мас. %, а в карбіді Cr_3C вміст вуглецю становить 7,15 мас. %. Так само вміст вуглецю в карбіді Fe_7C_3 становить 8,44 мас. %, а в Cr_7C_3 – 9,01 мас. %. У карбідах M_{23}C_6 при зміні атомів заліза на атоми хрому вміст вуглецю змінюється з 5,31 мас. % на 5,68 мас. %. У карбіді Fe_3C_2 вміст вуглецю становить 12,54 мас. %, а в Cr_3C_2 – 13,34 мас. %.

У карбіді M_7C_3 за однакової атомарної концентрації хрому та заліза 35 ат. %, вміст хрому у мас. % становить 44,0 %, а заліза 47,3 %. Збільшення вмісту хрому у карбідах сприяє зростанню масової частки вуглецю (рис. 2а). Визначені граничні концентрації хрому та заліза, у різних карбідах, за зміни головного карбідотворюючого елементу заліза на хром (рис. 2б).

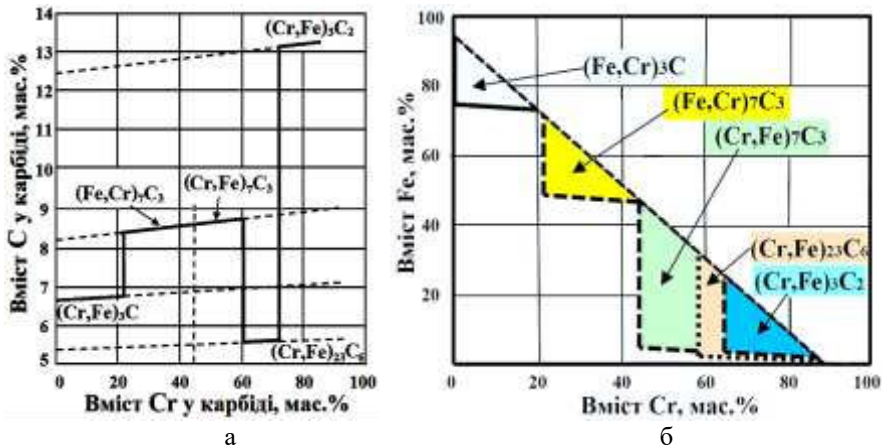
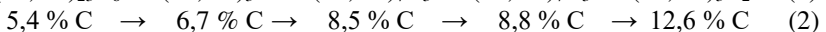
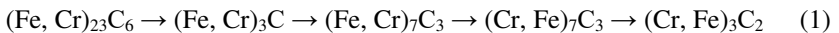


Рисунок 2 – Зміни вмісту С в карбідах у залежності від кількості Cr (а) та вміст хрому і заліза в карбідах різних типів у системі Fe–C–Cr (б)

Аналіз отриманих результатів довів існування концентрацій хрому і заліза, за яких можуть утворюватись карбіди із різним типом кристалічної ґратки та різним вмістом вуглецю (див. рис. 2б). Утворення карбідних фаз у системі Fe–C–Cr починається із карбідів, що мають мінімальний вміст вуглецю. В подальшому, відбувається їх трансформація у напрямку збільшення вмісту хрому та вуглецю, за схемою:



Спираючись на отримані та існуючі дані про хімічний склад та тип кристалічної ґратки карбідів, що утворюються у високохромистих чавунах, запропоновані доповнення у діаграмі Fe-C-Cr за 20 °C у відповідній частині (рис. 3).

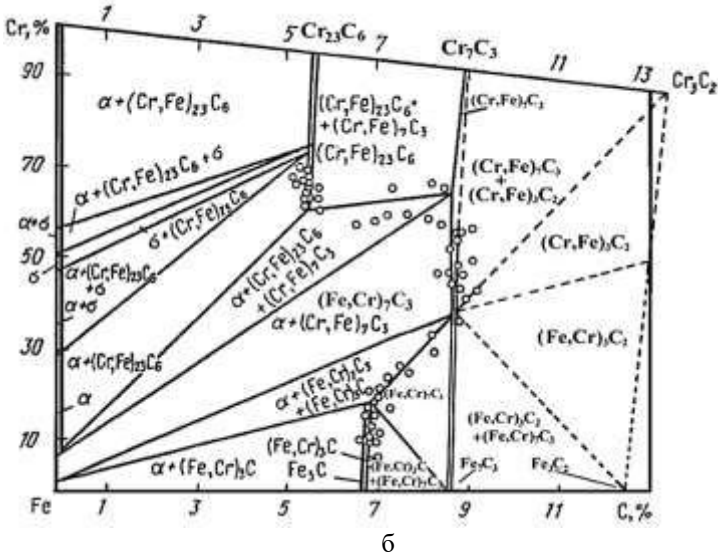
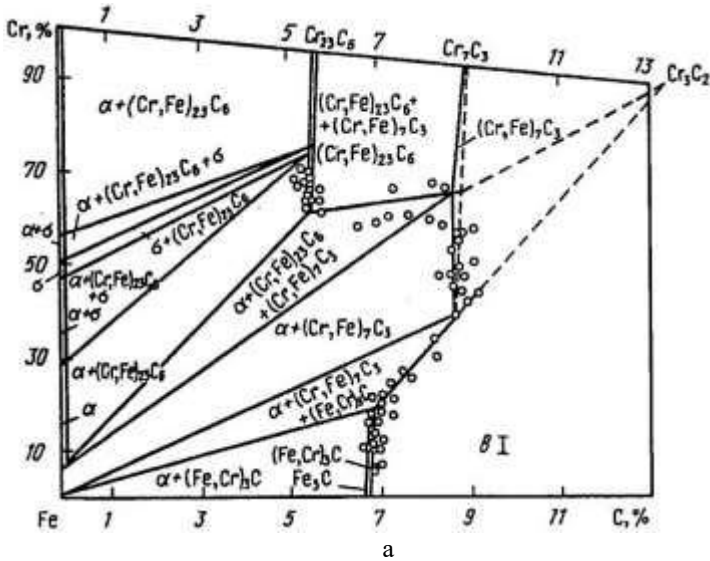


Рисунок 3 – Діаграма системи Fe-C-Cr: існуюча (а) та доповнена (б)

Згідно розробок К. П. Буніна, карбідна фаза є ведучою під час кристалізації евтектики. Тобто, хімічний склад карбіду, а саме вміст Cr у ньому, під час кристалізації евтектики змінюється у відповідності до рівноваги $\text{Cr}_{\text{РІДИНА}} - \text{Cr}_{\text{КАР}}$, а після затвердіння $\text{Cr}_{\text{ОСН}} - \text{Cr}_{\text{КАР}}$.

Під час охолодження виливку у формі вміст атомів хрому в карбідах зростає шляхом заміщення ними атомів заліза і марганцю. Зменшення швидкості дифузії у твердому стані, у порівнянні із рідким, не дозволяє утворюватися металевій основі із рівномірним розподілом елементів. Це призводить до збіднення на хром зон біля карбідів. Карбіди, що утворювались у рідкому стані чавуну та не мали контакту із металевою основою під час охолодження були виявлені в усадкових порах (рис. 4). Це дозволило визначити зміни у хімічному складі фаз на межі розподілу карбід – основа у процесі охолодження виливку у формі. Схема визначення хімічного складу в локальних об'ємах карбідів та металевій основі наведена на рис. 5.

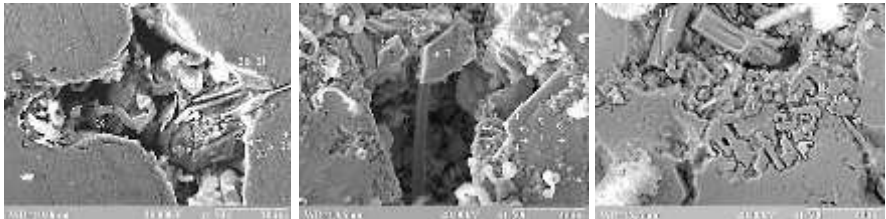


Рисунок 4 – Карбіди, що утворилися у рідкому стані і не контактували з основою

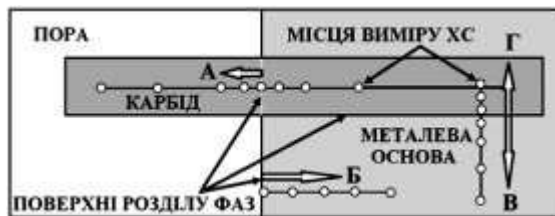


Рисунок 5 – Схема вимірювань хімічного складу фаз в локальних об'ємах.

Встановлено, що хімічний склад фаз, що утворилися у рідкому стані чавуну змінюється під час охолодження виливку у формі, що обумовлено залежністю термодинамічних характеристик карбідів від температури. Зміни вмісту хрому у карбідах (див. схему рис. 2), на відстані від межі розподілу фаз у чавуні із 11,9 % Cr (рис. 6а) та 19,7 % Cr (рис. 6б) доводять, що під час кристалізації утворюється карбідна фаза, що має як хімічну так і структурну неоднорідність. Первинні карбіди, є твердими розчинами в яких концентрація хрому зменшується від центральних шарів до поверхневих.

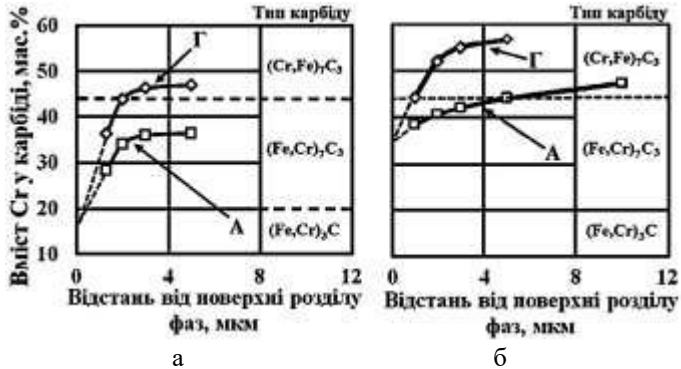


Рисунок 6 – Зміни вмісту Cr в карбідах у чавунах із 11,9 % Cr (а) та 19,7 % Cr (б) від поверхні розподілу фаз карбід–пора: напрямок А та карбід–основа: напрямок Γ

Під час охолодження виливку у формі, між карбідами та основою відбувався перерозподіл елементів. Заміщення атомів заліза та марганцю атомами хрому, що мають більшу спорідненість до вуглецю, призводить до утворення біля карбідів збіднених на хром та збагачених марганцем і залізом зон (рис. 7). Вирівнювання хімічного складу металевої основи не відбувається через низьку швидкість дифузії.



Рисунок 7 – Зміни вмісту Cr в основі чавунів із 11,9 % Cr (а) та 19,7 % Cr (б) від поверхні розділу фаз основа – пора: напрямок Б та карбід – основа: напрямок В

Вплив хрому в чавуні на його концентрацію в зонах біля карбідів досліджували на сплавах, що містили 2,8...3,1 % C, 11,74...29,86 % Cr, 1,72...2,17 % Mn, 1,1...1,5 % Ni та 0,8...1,2 % Si (рис. 8а). Вплив кількості

Mn на його розподіл між фазами та концентрацію хрому в зонах біля карбідів досліджували в чавунах: 300X16HC (4 сплави) із концентрацією марганцю 0,7...6,2 % (рис. 8б) та 230X25C (2 сплави) із вмістом 1,7 % Mn та 6,5 % Mn. Встановлено, що збільшення вмісту хрому в чавуні зменшує його хімічну неоднорідність у металевій основі, а зростання марганцю збільшує (див. рис. 8).

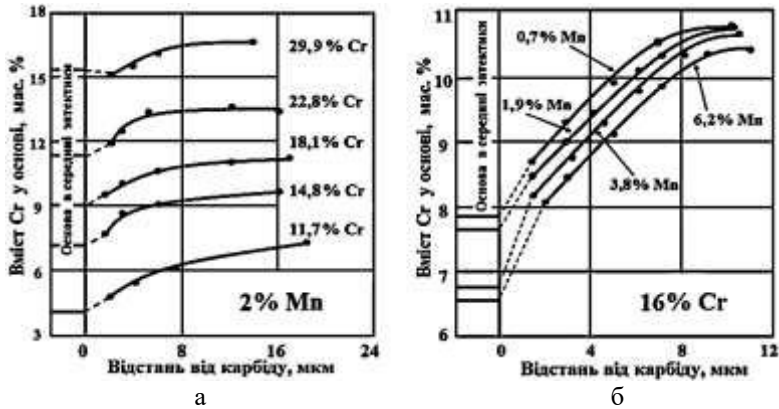


Рисунок 8 – Вплив вмісту в чавуні Cr (а) та Mn (б) на концентрацію хрому у зонах біля карбідів

Специфіка впливу хрому та марганцю на концентрацію хрому у зонах біля карбідів пояснюється розподілом цих елементів. Зокрема, збільшення хрому в сплаві зменшує хімічну неоднорідність металевої основи. За збільшення марганцю в чавуні його присутність у первинних карбідах збільшується, що призводить до того, що під час охолодження виливків у формі заміщення атомів марганцю та заліза на атоми хрому відбувається у більшій кількості і, як наслідок, збіднення хромом зон біля карбідів збільшується. Зміни у хімічному складі карбідів за збільшенням вмісту марганцю у чавуні наведено на рис. 9.

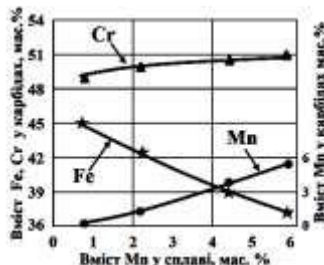


Рисунок 9 – Вплив Mn на хімічний склад карбідів у чавуні 300X16HC

Аналіз розподілу марганцю поміж карбідами та основою виявив, що за вмісту 0,7 % марганцю у чавуні 300X16HC його концентрація у карбідній фазі становила до 0,2 %. Збільшення вмісту марганцю у чавуні до 4,0 % поступово вирівняло коефіцієнт його розподілу $K_{Mn} = Mn_{OCH} / Mn_{KAP}$ до 1 (рис. 10).

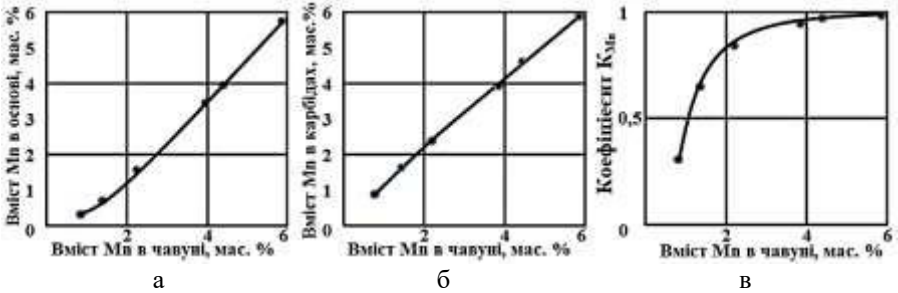


Рисунок 10– Вплив вмісту Mn у чавуні 300X16HC на його концентрацію в основі (а), карбідах (б) та розподіл між фазами (в)

Подібні зміни у розподілу хрому та марганцю відбувалися і в чавуні 230X25C. Вплив легувальних елементів на розподіл хрому та марганцю, а також властивості чавунів досліджували із застосуванням методів математичної статистики. Отримано залежності мінімального вмісту хрому в основі (Cr_{OCH}^{MIN}), вмісту марганцю в основі (Mn_{OCH}), кількості карбідів (K) та твердості (HV_{50}^{OCH} , HV_{50}^{KAP} та HRC) від вмісту в чавуні C, Cr, Mn, та Ni:

$$Cr_{OCH}^{MIN} = 3,711 - 0,806C + 0,313Cr + 0,009Cr^2 - 0,054Ni^2 - 0,082CMn - 0,139CNi + 0,011MnCr + 0,028CrNi, \text{ мас. \%}; \quad (3)$$

$$Mn_{OCH} = 0,72C + 0,697Mn + 0,145Cr - 0,058CMn - 0,039CCr - 0,022CNi + 0,007MnCr - 1,945, \text{ мас. \%}; \quad (4)$$

$$K = 5,46C - 0,78Mn + 5,83Ni + 1,35C^2 - 1,56CNi + 0,03MnCr - 0,36MnNi - 0,13CrNi + 2,37, \text{ об. \%}; \quad (5)$$

$$HV_{50}^{OCH} = 49,68Cr - 6,139C^2 - 0,897Cr^2 + 9,29CMn + 6,261CNi - 1,729MnCr + 4,232MnNi - 113,959; \quad (6)$$

$$HV_{50}^{KAP} = 969,96 - 165,75C + 102,02Ni + 9,31CMn + 10,41CCr - 2,3CrNi; \quad (7)$$

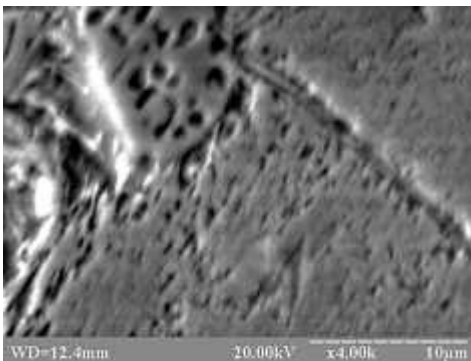
$$HRC = 9,961C + 2,755Mn + 0,416Cr + 2,134Ni - 1,299C^2 - 0,316Mn^2 - 0,606Ni^2 + 0,485C Mn + 0,113C Cr - 0,092Mn Cr + 10,676. \quad (8)$$

Отримані залежності мінімального вмісту хрому в основі, загальної твердості та мікротвердості фаз від хімічного складу чавуну дозволили визначити оптимальні склади чавунів для різних умов експлуатації із

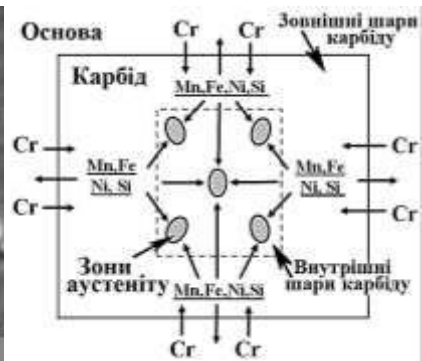
урахуванням технологічних вимог. Максимальну твердість 57,8 HRC має чавун із вмістом 3,91 % C, 25,57 % Cr, 3,67 % Mn та 1,76 Ni.

Четвертий розділ присвячено вивченню впливу термічної обробки на розподіл (перерозподіл) елементів, формування карбідів та металевої основи на межі розділу фаз карбід-основа та на властивості чавунів. Вплив термічної обробки вивчали за найбільш розповсюджених режимів: відпалу при 690 °C і 720 °C із витримкою 9 годин та нормалізації від 1050 °C із витримкою 1,5 год та 4,5 год. Відповідно до діаграм Fe-C-Cr нагрівання викликає карбідні перетворення зі зміною типу карбиду, але ці діаграми не враховують зміни хімічного складу карбідів, перерозподілу елементів та вмісту хрому у металевій основі на межі розділу фаз карбід-основа, а також властивостей фаз і чавуну в цілому. Термічна обробка сприяє утворенню стабільних карбідних фаз із більшим вмістом хрому та вуглецю, що зменшує концентрацію хрому в металевій основі.

Відпал за 690 °C та 720 °C збільшує неоднорідність розподілу хрому в металевій основі, а нормалізація зменшує. Аналіз розподілу елементів поміж фазами за відпалу при 690 °C та 720 °C виявив зменшення концентрації хрому у зонах біля карбідів та збільшення вмісту марганцю та заліза. У чавунах, що містили понад 2 % Mn зміна хімічного складу зон біля карбідів призвела до появи локальних $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворень під час ізотермічної витримки. Виникнення такого ефекту пояснюється зниженням температури $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворення заліза зумовленого збільшенням, у цих зонах, вмісту марганцю при зменшенні концентрації хрому. За нормалізації від 1050 °C металева основа чавуну 250X12ГЗНЗ не зазнала змін у той час, як у середині карбідів утворилися зони аустеніту (рис. 11а). Схему перерозподілу елементів із утворенням зон аустеніту в карбідах наведено на рис.11б.



а



б

Рисунок 11 – Карбіди в чавуні 250X12ГЗНЗ після нормалізації від 1050 °C (а) та схема перерозподілу елементів із утворенням зон аустеніту (б)

За первинної кристалізації до складу карбідів потрапляють атоми карбідоутворювальних елементів (Mn, Fe, Ni та Si) із меншою спорідненістю до вуглецю ніж у хрому. Зростання вмісту хрому в карбідах під час термічної обробки зумовлено прагненням системи до зменшення вільної енергії. Збільшення концентрації хрому в карбіді можливе за внутрішньої перебудови або зовнішнього постачання, за рахунок збіднення металевої основи. Збільшення концентрації хрому в поверхневих шарах карбіду відбувається за рахунок збіднення металевої основи біля карбіду.

Формування нової фази із більшим вмістом хрому в середині карбідів відбувається внаслідок перерозподілу елементів із вивільненням значної кількості атомів заліза та інших елементів, що концентрувалися і утворили в середині карбідів зони аустеніту (див. рис. 11). Отже, цей процес подібний до розпаду твердого розчину. Первинний метастабільний карбід заліза із низьким вмістом хрому перетворювався на високохромистий карбід та аустеніт. Відмінність процесу полягала у тому, що мало місце зовнішнє постачання хрому із металевої основи, що призводило до утворення біля карбіду зон збіднених хромом. Встановлено можливі схеми трансформації карбідів: $(\text{Fe,Cr})_3\text{C} \rightarrow (\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$; $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3 \rightarrow (\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$; $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3 \rightarrow (\text{Cr,Fe})_3\text{C}$. Влив ТО на розподіл хрому між фазами досліджували на сплавах із хімічним складом, наведеним у табл. 2.

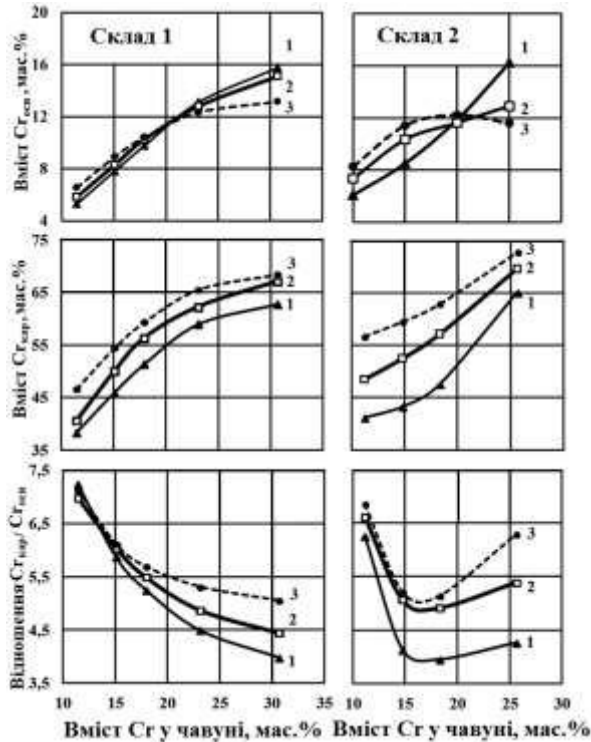
Таблиця 2 – Хімічний склад чавунів, мас. %

Склад	C	Cr	Mn	Ni	Si
1	2,9...3,1	11,43...30,68	0,7...0,8	2,0...2,1	1,0...1,2
2	2,4...2,5	11,17...25,62	1,7...1,9	1,3...1,4	0,9...1,2

Відпал та нормалізація сприяли утворенню більш термодинамічно стабільних фаз, що призвело до збільшення вмісту хрому у карбідах і відповідно до перерозподілу хрому (рис. 12) та вплинуло на твердість чавуну (рис. 13). У чавунах, що містили до 20 % хрому відпал збільшив мінімальний вміст хрому в основі унаслідок дифузійних процесів (гомогенізації) (див. рис. 12).

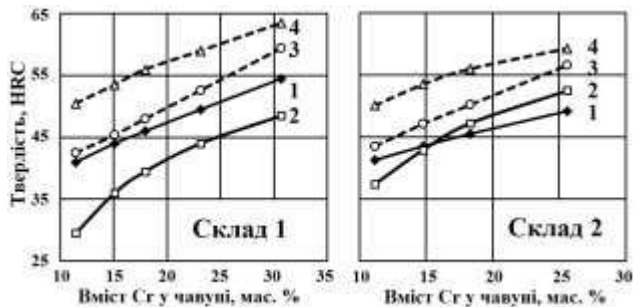
За нормалізації вміст хрому в основі чавунів із більшим вмістом хрому зменшувався унаслідок збільшення вмісту хрому у карбідах та збіднення хромом зон біля карбідів під час охолодження через утворення вторинних карбідів. Зменшення вмісту вуглецю в чавунах (склад 2), що містили понад 15 % хрому сприяло підвищенню макротвердості після відпалу, що зумовлено зниженням температури A_{c1} та утворенням структур гартування.

Карбідні фази, що утворилися під час кристалізації, містили до 2 % Mn, до 0,5 % Si та до 0,2 % Ni. Після термічної обробки кремній та нікель були практично відсутні у складі карбідів. Розподіл марганцю поміж фазами залежав від його загального вмісту в чавуні та кількості хрому.



1 – в литому стані без ТО; 2 – після відпалу за 720 °С; 3 – після нормалізації від 1050 °С із витримкою 4,5 год

Рисунок 12 – Вплив виду ТО та вмісту хрому у чавуні на його розподіл поміж фазами



1 – у стані литва без ТО; 2 – після відпалу за 720 °С; 3 – після нормалізації від 1050 °С із витримкою 1,5 год; 4 – після нормалізації від 1050 °С із витримкою 4,5 год

Рисунок 13 – Залежність твердості чавуну від вмісту хрому та виду ТО

Застосування методів математичної статистики дозволило отримати після різних видів термічної обробки залежності концентрації хрому та марганцю в основі, мікротвердості фаз та твердості чавуну в цілому від вмісту C, Cr, Mn та Ni після різних видів термічної обробки.

$$Cr_{OCH}^{690} = -2,238C + 1,525Cr + 1,776Ni + 0,365C^2 - 0,022Cr^2 - 0,721Ni^2 - 0,041CCr + 0,116CNi - 0,006MnCr - 5,224, \text{ мас. \%}; \quad (9)$$

$$Cr_{OCH}^{720} = 10,445 - 2,736C - 0,972Mn + 2,019Ni + 0,005C^2 + 0,001Mn^2 + 0,018Cr^2 - 0,007Ni^2 + 0,184CMn - 0,002CCr + 0,037MnCr - 0,145CrNi - 0,004(Cr/C), \text{ мас. \%}; \quad (10)$$

$$Cr_{OCH}^{1050-4,5} = 2,079Mn + 0,985Cr - 0,335Mn^2 - 0,121CCr + 0,733CNi - 0,126CrNi - 4,83, \text{ мас. \%}; \quad (11)$$

$$Mn_{OCH}^{690} = 0,707 - 0,207C + 1,09Mn + 0,038Cr - 0,261Ni - 0,015MnCr + 0,10MnNi - 0,043(Cr/C), \text{ мас. \%}; \quad (12)$$

$$Mn_{OCH}^{720} = 1,01Mn + 0,043(Cr/C) - 0,225, \text{ мас. \%}; \quad (13)$$

$$Mn_{OCH}^{1050-4,5} = 0,419C + 1,124Mn + 0,07Cr + 0,085Ni - 0,04Mn^2 - 0,002Cr^2 - 0,003Ni^2 + 0,04MnCr + 0,081(Cr/C) - 2,291, \text{ мас. \%}; \quad (14)$$

$$HRC^{690} = -9,922Mn - 3,094Cr + 12,889Ni - 1,517C^2 + 0,038Cr^2 - 1,527Ni^2 + 1,22CMn + 0,459CCr - 2,502CNi + 0,454MnCr + 70,458; \quad (15)$$

$$HRC^{720} = 16,605Mn + 3,555Cr - 1,282Mn^2 - 0,043Cr^2 - 1,724Ni^2 - 0,157CCr + 1,782CNi - 0,326MnCr + 0,658MnNi - 15,44; \quad (16)$$

$$HRC^{1050-1,5} = 11,22C + 2,38Cr - 4,91Ni - 0,45CCr - 0,18MnCr + 1,39MnNi + 8,7; \quad (17)$$

$$HRC^{1050-4,5} = 8,196C - 0,897CMn - 2,761CNi + 0,323CrNi + 38,379. \quad (18)$$

Отримані залежності дозволили оптимізувати хімічний склад чавуну та визначити режими термічної обробки виробів до конкретних умов експлуатації із урахуванням технологічних вимог. Максимальну твердість 67,8 HRC після нормалізації від 1050 °C із витримкою 4,5 год мав чавун із вмістом 3,91 % C, 25,57 % Cr, 0,6 % Mn та 0,19 % Ni.

П'ятий розділ присвячено підвищенню оброблюваності різанням високохромистих чавунів, додатково легованих марганцем та нікелем. За точіння та свердління відбувався силовий вплив різця на поверхню різання, а внаслідок тертя стружки об різець та різця об поверхню різання відбувалось підвищення температури деталі.

Аналіз структури поверхневих шарів чавуну виявив, що під час точіння відбувалося значне дроблення карбідної фази внаслідок пластичної деформації (рис. 14а, б). Окрім цього, у зоні пластичної деформації утворювались мікротріщини (рис. 14в). Пластична деформація призвела до зростання твердості поверхневих шарів. Результати вимірювання мікротвердості основи на відстані від поверхні різання за різних режимів точіння та свердління представлені на рис. 15.

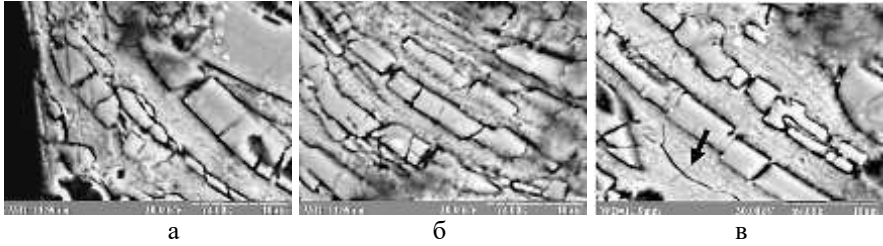


Рисунок 14 – Дроблення карбідів у поверхневих шарах (а, б) та утворення мікротріщин в основі (в)

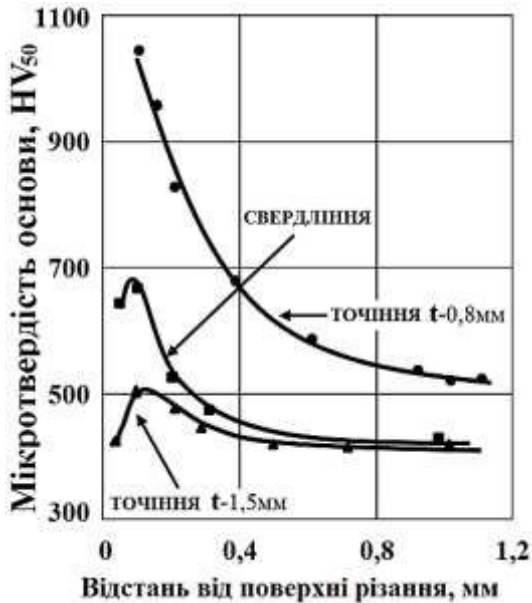


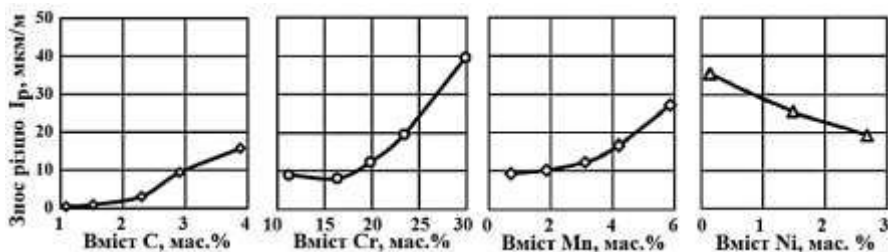
Рисунок 15 – Зміна мікротвердості основи під поверхню різання за різних режимів точіння та свердління

За глибини різання 0,8 мм збільшення температури поверхні було незначним. Перевага силового фактору над тепловим призвела до значного наклепу і підвищення мікротвердості на поверхні деталі до 1050 HV₅₀. За глибини різання 1,5 мм відбулося значне підвищення температури, що частково нейтралізувало процеси зміцнення. Встановлено, що за глибини різання 0,8 мм зона зміцнення сягала понад 1,2 мм, а за глибини різання 1,5 мм розмір зони зміцнення зменшився до 0,4 мм. Зменшення глибини зміцнення обумовлено нагріванням виробу у процесі різання і релаксацією напружень. Відсутність охолодження сприяє процесам зниження поверхневої

твердості. Позитивний вплив подрібнення карбідної фази на оброблюваність різанням за наступного проходу відповідає сучасним уявленням та тенденціям підвищення оброблюваності зносостійких матеріалів із карбідними фазами, але має негативні наслідки для зносостійкості. Вплив С, Cr, Mn та Ni на оброблюваність різанням під час точіння досліджувався на чавунах, склад яких наведено в табл. 3. Залежність зношування різця (I_p) від вмісту С, Cr, Mn та Ni представлено на рис. 16.

Таблиця 3 – Хімічний склад чавунів

Хімічний елемент, мас. %				
С	Cr	Mn	Ni	Si
1,1...3,8	17,8	1,5	0,2	1,3
3,1	11,4...29,9	1,6	1,4	1,1
2,5	18,9	0,7...5,9	0,2	1,3
3,4	19,7	5,7	0,2...2,7	1,0

Рисунок 16 – Вплив С, Cr, Mn та Ni на зношування різцю (I_p)

Вплив вуглецю на оброблюваність різанням визначався кількістю карбідної фази. Інтенсивність зношування різця суттєво збільшувалася за вмісту вуглецю понад 2,4 % (див. рис. 16). Збільшення в чавуні вмісту хрому із 11 % до 17 % зменшувало інтенсивність зношування різця (див. рис. 16), що пояснюється утворенням карбідної евтектики із карбідами $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ замість суцільної сітки легованого цементиту. Подальше зростання вмісту хрому у чавуні суттєво збільшувало знос різця, що пояснюється заміщенням карбідів заліза, легованих хромом із твердістю 800...1000 HV_{50} на високохромисті карбіди $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ (1200...1700 HV_{50}), а також твердорозчинним зміцнення металевої основи. За кількості марганцю до 2 % знос різця збільшувався незначно. При цьому збільшення зносу різця відбувалося тільки за рахунок твердорозчинного зміцнення основи. Зі збільшенням вмісту марганцю з 2 % до 4 % знос різця також збільшувався. Це пояснюється появою структур гартування із твердістю 800...900 HV_{50} . За подальшого збільшення вмісту марганцю знос різця значно збільшився

внаслідок утворення аустенітної металевої основи і підвищення її твердості внаслідок наклепу до 1000 HV₅₀. Легування нікелем знижувало інтенсивність зношування різця через утворення аустеніту, менш схильного до наклепу. У випадку комплексного легування чавуну С, Cr, Mn та Ni зношування різця (I_p) визначається таким регресійним рівнянням:

$$I_p = 24,32C - 3,41Mn - 6,99Cr + 0,51Mn^2 + 0,22Cr^2 + 0,80Ni^2 + 0,95CMn - 0,51CCr - 1,75CNi + 4,94(Cr/C) - 0,14(Cr/C)^2, \text{ мкм/м} \quad (19)$$

Мінімальний знос різцю 0,18 мкм/м спостерігався в чавуні, що містив 1,1 % С, 14,8 % Cr, 2,3 % Mn та 1,2 % Ni. Отримана регресійна залежність впливу складу чавуну на оброблюваність різанням лезвійним інструментом дозволила визначити хімічний склад зносостійкого чавуну з підвищеною оброблюваністю різанням, на який отримано патент 113363 Україна.

Шостий розділ містить результати дослідження процесів руйнування високохромистих чавунів у різних умовах експлуатації, а саме корозійному та гідроабразивному середовищах. Аналіз зон руйнування виявив, що у досліджених чавунах мали місце загальна та місцева корозія. В усіх досліджуваних чавунах у тій чи іншій мірі мали місце різні види корозії. Так, загальна корозія виникала на поверхні виробів із чавунів, що мали феритну або аустенітну основи. Вона є характерною для чавунів, що містять більше 12 % хрому в основі, і вражає тільки металеву основу.

У чавунах, що мали концентрацію хрому в основі менше 12 % або мали ділянки основи із різним вмістом хрому, меншим і більшим за 12 %, виникала нерівномірна загальна корозія, що поступово перетворювалася на виразкову (рис. 17). Цей вид корозії призводив до викришування цілих фрагментів.

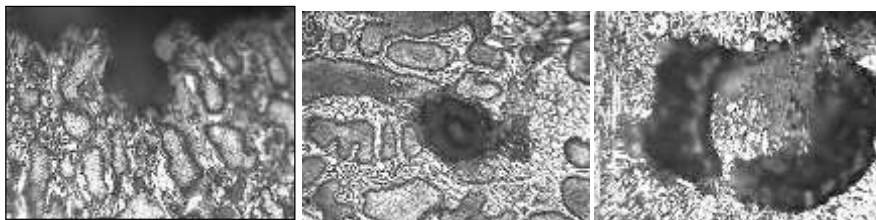


Рисунок 17 – Вигляд виразкової корозії, х 400

У високохромистих чавунах із низьким вмістом вуглецю, за утворення карбідів Me₂₃C₆, а також чавунах додатково легуваних марганцем у зонах на межі розподілу фаз карбід-основа виникала корозія подібна до міжкристалічної. У чавунах із вмістом марганцю понад 2,0 % основа в середині евтектики та біля карбідів кородувала значно більше ніж зони в середині зерен.

На підставі проведеного аналізу зроблено висновок про те, що руйнування чавунів починається на межі розподілу фаз карбід – основа. При цьому його характер залежить від хімічного складу чавуну, що визначається вмістом хрому у зонах біля карбідів, та в середині евтектичних колоній. Отже, на процес корозії впливає формування структури чавуну та розподіл і перерозподіл елементів поміж фазами під час кристалізації та охолодження виливку. Після математичної обробки результатів було отримано регресійну залежність втрати маси за корозії (I_k) у середовищі HCl із pH=2,5 від вмісту C, Cr, Mn, та Ni:

$$I_k = 0,6882C - 0,6509Cr - 1,3049Ni + 0,0276Mn^2 + 0,0126Cr^2 + 0,349Ni^2 - 0,1849CMn + 0,0185MnCr + 8,93, \text{ г/м}^2\text{год} \quad (20)$$

Мінімальну швидкість корозії 0,19 г/м²год мав чавун із мінімальним вмістом вуглецю (1,09 %) і марганцю (0,6 %) за максимального вмісту хрому (25,57 %) та 1,87 % нікелю. Максимальна швидкість корозії спостерігалася у чавуні, що містив 3,91 % C, 11,43 % Cr, 0,6 % Mn та 0,19 % Ni. Ці дані відповідають класичним уявленням щодо корозійних процесів руйнації високохромистих чавунів.

Зношування чавунів у умовах сухого тертя, у середовищі щебеню та електрокорунду, не призвело до значних втрат маси. Проте, за гідроабразивного зношування у середовищі електрокорунду втрати маси зросли у 20 разів і більше, а за наявності пульпи (частинок менших за 0,5 мкм) іще у двічі, тобто, у 40 разів. Зростання зносу в умовах гідроабразивного зношування пояснюється ефектом Ребіндера, що виникає внаслідок контакту поверхні зразка із рідиною.

Особливість руйнації поверхні чавунів за гідроабразивного зношування полягала у тому, що у середовищі пульпи одночасно містились як частинки корунду розміром 3,5 мм, що залишали подряпини подібні до різання за механічної обробки, так і дрібні частинки розміром до 0,5 мкм, що руйнували металеву основу уздовж карбідів. Дрібні частинки, подібні до полірувальної пасти, проникали у дефекти поверхні і накопичувалися у зонах руйнації. Абразивні частинки рухаючись у потоці рідини уздовж дендритів та зон розподілу фаз карбід-основа руйнували металеву основу, утворюючи жолобки (рис. 18а), що поступово перетворювалися на тріщини (рис. 18б) та сприяли відокремленню цілих фрагментів (рис. 18в). Натомість, макродефекти (маркування, відбитки виміру твердості) не ініціювали руйнівного процесу. Радіальний напрямок утворених канавок та тріщин свідчить про те, що напружений стан на межі розділу фаз карбід-основа і дендритна структура чавунів, значно впливають на процеси руйнації за гідроабразивного зношування у середовищі із пульпою. Утворення поверхневих тріщин, як правило, починалося на межі розділу фаз карбід – основа, при цьому, внаслідок постійного руху частинок пульпи, відбувалося поглиблення зон руйнування.



а – жолобки; б – тріщини; в – відокремлення фрагментів

Рисунок 18 – Види руйнування за гідроабразивного зношування у пульпі

Завдяки ефекту Ребіндера утворювався гідродинамічний клин, що сприяв розповсюдженню тріщин. Рухоме середовище сприяло постійному циклічному трамбуванню дрібних частинок корунду у мікрodefекти та тріщини, що посилювало руйнівну силу гідродинамічного клину (рис. 19).

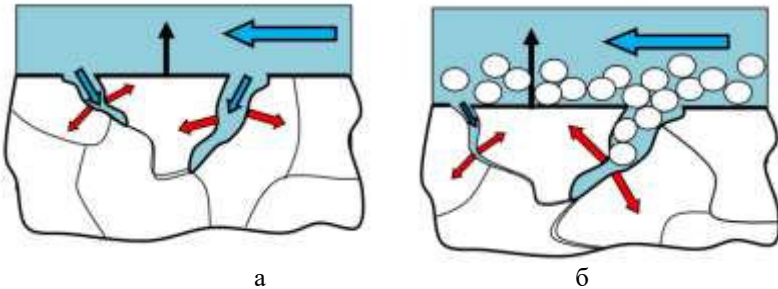
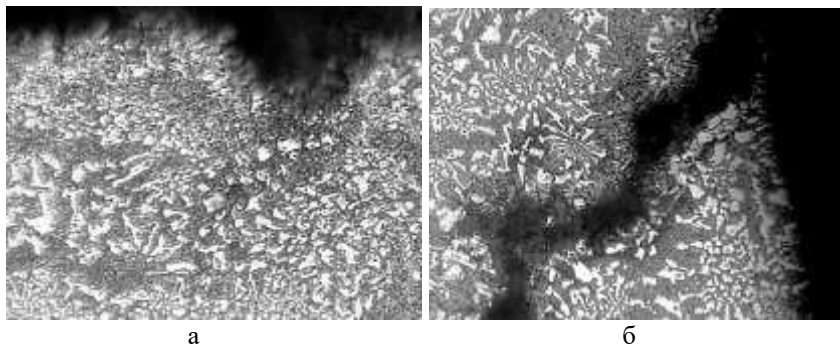


Рисунок 19 – Схема руйнації поверхні за гідродинамічного клину (а) та гідродинамічного клину із утрामбовуванням частинок пульпи (б)

Потік дрібних абразивних частинок корунду (пульпи) рухаючись уздовж карбідів, дендритів та мікрodefектів, подібно до руху по жолобу, розширював та заглиблював зону руйнації, що призводило до утворення тріщин, які розповсюджувалися та призводили до відокремлення цілих фрагментів (див. рис. 18в). Внаслідок ефекту Ребіндера, на поверхні зразку утворювалися рихлоти (рис. 20а) які видалялися потоком пульпи. За подальшого заглиблення утворювалися магістральні тріщини. Напрямок руху тріщини змінювався оминаючи скупчення карбідів та евтектичних колоній, що мали значно більшу твердість ніж металева основа (рис. 20б). Таке розповсюдження тріщини свідчить про значний вплив на процес руйнування за гідроабразивного зношування стану металевої основи на межі розділу фаз карбід – основа. Зменшення вмісту хрому на межі розподілу фаз карбід-

основа впливає на механічні і корозійні властивості металевої основи та схильність до міжкристалічної корозії.



а – рихлоти на поверхні зразка; б – тріщина, що змінила напрямок руху
Рисунок 20 – Мікроструктура чавунів біля поверхні та русла тріщини, х320

Відпал чавунів, особливо за 690 °С значно збільшив втрату маси, що пояснюється змінами хімічного складу металевої основи біля карбідів, а саме, зменшенням вмісту хрому та утворенням зон аустеніту (виникнення двофазної металевої основи). Після нормалізації від 1050 °С із витримкою 4,5 год втрати маси були на рівні із чавунами без термічної обробки. Позитивний вплив нормалізації, у порівнянні із відпалом, пояснюється гомогенізацією металевої основи. За результатами дослідження встановлені регресійні залежності втрати маси (г/м²год) високохромистих чавунів за гідроабразивного зношування у середовищі із пульпою (І_{пульп}) та без (І_{Г-А}) від вмісту С, Cr, Mn та Ni:

$$I_{\text{пульп}} = 12,801 - 2,069\text{Mn} - 0,937\text{Cr} - 0,605\text{Ni} - 0,636\text{C}^2 - 0,081\text{Mn}^2 + 0,388\text{Ni}^2 + 0,287\text{CMn} + 0,224\text{CCr} + 0,096\text{MnCr} - 0,091\text{MnNi} + 0,250(\text{Cr/C}), \text{ г/м}^2\text{год}; \quad (21)$$

$$I_{\text{Г-А}} = 15,20 - 1,891\text{Mn} - 0,913\text{Cr} - 0,390\text{Ni} + 0,360\text{C}^2 + 0,015\text{Cr}^2 + 0,631\text{Ni}^2 - 0,034\text{CMn} - 1,252\text{CNi} + 0,080\text{MnCr} + 0,279\text{MnNi} + 0,042\text{CrNi} - 0,077(\text{Cr/C}), \text{ г/м}^2\text{год}; \quad (22)$$

$$I_{\text{пульп}}^{1050-4.5} = 8,741 - 1,66\text{Mn} - 0,216\text{Cr} - 2,954\text{Ni} + 0,346\text{Ni}^2 + 0,226\text{CMn} - 0,18\text{CNi} + 0,033\text{MnCr} + 0,307\text{MnNi} + 0,082\text{CrNi}, \text{ г/м}^2\text{год}. \quad (23)$$

Визначено склади чавунів із мінімальними втратами маси у стані литва та після різного виду термічної обробки. Так, у середовищі із пульпою мінімальні втрати маси (І_{пульп}) 0,08 г/м²год мав чавун у литому стані, що містив 1,1 % С, 11,5 % Cr, 5,4 % Mn та 1,4 % Ni. За відсутності пульпи

мінімальні втрати ($I_{Г-А}$) 0,36 г/м²год були у чавуну складу 1,1 % С, 25,5 % Cr, 0,6 % Mn та 0,4 % Ni у стані без термічної обробки. За нормалізації, мінімальні втрати ($I_{Пулльп}^{1050-4.5}$) 0,31 г/м²год спостерігали у чавуну, що містив 1,09 % вуглецю, 25,57 % хрому, 5,4 % марганцю та 0,19 % нікелю.

У сьомому розділі міститься інформація щодо розробки нових комплекснолегованих високохромистих чавунів для різних умов експлуатації з урахуванням технологічних вимог. Промислові чавуни повинні мати не тільки високі показники стійкості за певних умов експлуатації, а також, відповідати певним технологічним вимогам виробництва.

Стійкість за певних умов експлуатації визначається хімічним складом, структурою та властивостями сплаву. До технологічних вимог належать: складність процесу отримання виробів, здатність до механічної обробки різанням тощо. Отримання чавунів, що відповідають потрібним умовам у литому стані без термічної обробки визначено пріоритетним напрямком. Для експлуатації в умовах абразивного зношування головним показником стійкості є твердість матеріалу. Для запобігання утворенню первинних карбідів, що негативно впливають на зносостійкість, ступінь евтектичності чавуну повинна бути < 1. Таким вимогам відповідає чавун 320X22Г2Н.

Зносостійкий чавун із підвищеною оброблюваністю різанням повинен відповідати одночасно двом критеріям, тобто мати компромісні вимоги: достатню зносостійкість (твердість більша за 46 HRC) та задовільну оброблюваність різанням (знос різцю менший за 15 мкм/хв). Таким вимогам відповідає чавун 280X18Г2Н. За умов корозійного руйнування рекомендовано чавун 110X24Н2. Для експлуатації в умовах гідроабразивного зношування у середовищі без пульпи пропонується чавун 110X24Н, подібний до корозійностійкого, але із меншим вмістом нікелю. В умовах гідроабразивного зношування у середовищі із пульпою рекомендовано використовувати чавун 110X12Г5Н2 без термічної обробки.

Порівняння властивостей сталонного чавуну 300X28Н2 та розроблених за показниками: твердості (HRC), втратами маси за корозії (I_K), втратами маси за сухого абразивного зношування ($I_{знос}$), втратами маси за гідроабразивного зношування у середовищі без пульпи ($I_{Г-А}$), втратами маси за гідроабразивного зношування у середовищі із пульпою ($I_{Пулльп}$), зносу різцю до довжини різання (I_P) у литому стані та після нормалізації від Рекомендовані чавуни, за окремими показниками, перевищують властивості чавуну 300X28Н2 у декілька разів (див. табл. 3).

Впровадження у виробництво нових складів чавунів та рекомендацій щодо вибору режимів їх термічної обробки дають змогу зменшити собівартість виробів із високохромистих чавунів за рахунок покращення оброблюваності різанням, підвищити експлуатаційну стійкість виробів. та отримати значний (очікуваний) економічний ефект – 3,18 млн грн на рік.

Таблиця 4 – Порівняння властивостей еталону та розроблених чавунів

Чавун	Твердість, HRC		Втрати маси, г/м²год						I _p , мкм/м
	Без ТО	Нормалізація	I _к	I _{знос}		I _{Г-А}		I _{Г-А} ^{ПУЛЬП}	
				Без ТО	Без ТО	Нормалізація	Без ТО	Нормалізація	Без ТО
300X28H2 (еталон)				0,07	0,07				
Зносостійкий та корозійностійкий 180X24H2				0,13	0,14				
Зносостійкий, 320X22Г2Н				0,07	0,07				
Гідроабразивно стійкий у пульпі, 110X12Г5Н				0,92	0,90				
Корозійностійкий 110X24Н				0,60	0,70				
Зносостійкий із підвищеною оброблюваністю, 280X18Г2Н				0,12	0,11				

Так, на підприємстві ПП «СТРОЙМАШ» були виготовлені колеса робочі із чавуну 110X12Г5Н та диски захисні із чавуну 280X18Г2Н для шламового насосу ГраУ 400/20. Промислові випробування деталей насосів проводили під час переробки техногенних копалин у Донецькій області. За результатами випробувань, стійкість робочого колеса насоса ГраУ 400/20 із чавуну 110X12Г5Н була у 1,6...1,8 рази більше порівняно з чавуном 300X28H2. Підвищена оброблюваність чавуну 280X18Г2Н, за збереження експлуатаційної стійкості, зменшує собівартість 1 т литва на 264,36 грн. Оптимізація хімічного складу чавуну 300X28H2, з метою запобігання утворенню заєвтектичних карбідів та вилучення термічної обробки із технологічного процесу, зменшує собівартість 1 т литва на 336,49 грн. в умовах ТОВ «ЗТМК», (м. Запоріжжя). Економічна ефективність використання чавуну 320X22Г2Н, оптимізованого складу та технологічного процесу відновлення ковшів елеваторів в умовах ТОВ «ТВІНС-СЕРВІС ЛТД», (м. Запоріжжя), становить 573804 грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі подано науково обґрунтовані дослідження у сфері матеріалознавства, а саме розвинуті уявлення про формування карбідної фази та металевої основи в зоні розподілу фаз карбід – основа на всіх етапах технологічного процесу виготовлення виробів із високохромистих зносостійких чавунів, додатково легованих марганцем та нікелем. Досліджено процеси і механізми руйнування цих матеріалів в умовах впливу корозійного середовища та гідроабразивного зношування, а також та під час механічної обробки різанням. Отримані результати сприяли вирішенню важливої науково-технічної проблеми щодо підвищення властивостей та експлуатаційної стійкості виробів з високохромистих чавунів та зменшення витрат на їх виробництво.

За результатами досліджень можна зробити такі висновки:

1. Під час первинної кристалізації чавунів у системі Fe-C-Cr утворюються метастабільні карбіди, у яких вміст хрому зменшується від центральних до поверхневих шарів, що зумовлює в них водночас хімічну і структурну неоднорідності.

2. У ЗЧХ хром переважно концентрується в карбідах, а нікель – в основі. Розподіл марганцю між фазами залежить від його кількості в чавуні та від вмісту хрому. При збільшенні марганцю в чавуні його концентрація у фазах вирівнюється. Збільшення вуглецю, що зв'язує хром та марганець у карбіди, призводить до зменшення їх концентрації в металевій основі, у цей час вміст нікелю в основі зростає пропорційно до кількості карбідів. Збільшення концентрації хрому в чавуні сприяє підвищенню концентрації марганцю в основі.

3. У процесі охолодження вилівка у формі відбувається збільшення вмісту хрому в карбідах, що зумовлено заміщенням атомів марганцю та заліза на атоми хрому; це, у свою чергу, призводить до виникнення біля карбідів зон, збіднених на хром та збагачених на марганець і залізо.

4. Відпал і нормалізація збільшують вміст хрому в карбідах. Але внаслідок відпалу хімічна неоднорідність основи зростає, а після нормалізації – зменшується. Під час нормалізації від 1050 °C відбувається утворення високохромистої фази, при цьому вивільнені атоми заліза та інших елементів утворюють всередині карбідів та навколо них зони твердого розчину (аустеніту або фериту).

5. Виявлено, що за відпалу при 690...720 °C під час ізотермічної витримки (нижче за A_{c1}) у високохромистих чавунах, додатково легованих марганцем (понад 2 %), виникає ефект локального $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворення у зонах біля карбідів. Виникнення такого ефекту пояснюється зниженням температури перетворення внаслідок збільшення у цих зонах вмісту марганцю та заліза при зменшенні концентрації хрому.

6. За вмісту в чавуні 14...19 % хрому утворюється карбідна евтектика у кількості, достатній для руйнування суцільної сітки цементиту, що покращує оброблюваність різанням лезовим інструментом.

7. Виникнення ефекту Ребіндера та присутність дрібних частинок (пульпи) різко збільшує втрати маси чавунів під час гідроабразивного зношування. Зниження гідроабразивної стійкості відбувається внаслідок руйнування меж розподілу фаз карбід – основа. Збільшення обсягів руйнування під впливом дрібних частинок призводить до утворення тріщин, що поступово перетворюються на магістральні та викликають фрагментарні руйнування.

8. Відпал значно погіршував показники стійкості під час гідроабразивного зношування через зменшення вмісту хрому в зонах біля карбідів, що підсилювало дію ефекту Ребіндера та вплив пульпи на процес руйнування.

9. Розроблені марки чавунів для різних умов експлуатації з урахуванням технологічних вимог мають підвищені показники експлуатаційної стійкості при зменшенні собівартості виробництва.

10. Наукові здобутки, що наведені в розділах 3, 4, 5 та 6, використовуються в навчальному процесі на кафедрі ОТЗВ ЗНТУ і містяться в лекційному матеріалі дисциплін «Руйнування матеріалів при різного виду зношуваннях», «Поверхневі фізико-хімічні процеси» та інших.

11. Впровадження у виробництво нових складів чавунів та рекомендацій щодо вибору режимів їх термічної обробки дають змогу зменшити собівартість виробів із високохромистих чавунів за рахунок покращення оброблюваності різанням, підвищити експлуатаційну стійкість у різних умовах експлуатації та отримати значний економічний ефект.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові роботи, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Нетребко В. В., Волчок І. П. Особенности легирования марганцем износостойких высокохромистых чугунов. *Литье и Металлургия*. 2012. № 3. С. 162–165. (НБД [Google Scholar](#))

2. Belikov S., Volchok I., Netrebko V. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron. *Archives of Metallurgy and Materials*. Vol. 58. 3. 2013. P. 895–897. (НБД [Scopus](#))

3. Нетребко В. В., Волчок І. П. Особенности легирования хромом износостойких чугунов. *Литье и металлургия*. 2013. № 3. С. 75–78. (НБД [Google Scholar](#))

4. Нетребко В. В. Особенности легирования белых износостойких чугунов. *Литье и Металлургия*. 2014. № 2. С. 37–41. (НБД [Google Scholar](#))

5. Нетребко В. В. Влияние отжига на твердость Cr-Mn-Ni чугунов. *Литье и Металлургия*. 2015. № 2. С. 95–101. (НБД [Google Scholar](#))

6. Нетребко В. В. Особенности процессов образования карбидов и распределения Cr, Mn и Ni в белых чугунах. *Литье и Металлургия*. 2015. № 3. С. 40–46. **(НБД Google Scholar)**

7. Нетребко В. В., Волчок І. П. Влияние химического состава на скорость коррозии высокохромистых чугунов. *Литье и Металлургия*. 2016. № 4. С. 38–43. **(НБД Google Scholar)**

8. Нетребко В. В., Волчок І. П. Влияние химического состава чугуна на содержание Cr в основе после нормализации от 1050 °С. *Литье и Металлургия*. 2018. № 1. С. 34–40. **(НБД Google Scholar)**

9. Нетребко В. В. Особенности межфазного распределения марганца в высокохромистых чугунах. *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць*. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ» 2013. Вип. 26. С. 88–93. **(НБД Index Copernicus)**

10. Нетребко В. В. Особенности распределения хрома в высокохромистых чугунах. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування: зб. наук. праць*. Дніпро: ПГАСА, 2013. Вип. 65. С. 346–349.

11. Нетребко В. В. Особенности легирования белых коррозионностойких чугунов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: науковий журнал*. Запоріжжя: ЗНТУ. 2014. № 1. С. 109–112. **(НБД Index Copernicus)**

12. Нетребко В. В. Влияние химического состава и структуры на обрабатываемость высокохромистых чугунов. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування: зб. наук. праць*. Дніпро: ПГАСА, 2014. Вип. 74. С. 104–107.

13. Нетребко В. В. Влияние физических и тепловых процессов на структуру и свойства высокохромистого чугуна при обработке резанием. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту: науковий журнал*. Дніпро: ДНУЗТ. 2014. № 6 (54). С. 97–103. **(НБД Index Copernicus)**

14. Нетребко В. В. Влияние углерода и хрома на обрабатываемость резанием износостойких чугунов легированных никелем и марганцем. *Вісник двигунобудування: науково-технічний журнал*. Запоріжжя: АО «Мотор Січ». 2015. № 1. С. 94–97. **(НБД Index Copernicus)**

15. Беликов С. Б., Волчок І. П., Нетребко В. В. Оптимизация состава и свойств износостойких высокохромистых чугунов. *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць*. Харків: НТУ «ХП», 2015. Вип. 1 (25). С. 18–26. **(НБД Index Copernicus)**

16. Нетребко В. В. Влияние отжига на твердость высокохромистых чугунов, легированных Mn и Ni. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: науковий журнал*. Запоріжжя: ЗНТУ. 2015. № 2. С. 65–70. **(НБД Index Copernicus)**

17. Волчок І. П., Нетребко В. В. Влияние легирования и термической обработки на распределение элементов и свойства высокохромистых чугунов. *«Науковий Вісник» Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. праць*. Краматорськ: ДДМА. 2015. № 3 (18Е). С. 52–59.

18. Нетребко В. В. Влияние нормализации на твердость Cr-Mn-Ni чугунов. *Вісник двигонобудування: науково-технічний журнал*. Запоріжжя: АО «Мотор Січ». 2016. №1. С. 129–133. **(НБД Index Copernicus)**

19. Нетребко В. В., Волчок І. П. Особенности термической обработки высокохромистых чугунов легированных Mn и Ni. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: науковий журнал*. Запоріжжя: ЗНТУ. 2016. № 1. С. 53–57. **(НБД Index Copernicus)**

20. Нетребко В. В. Влияние химического состава высокохромистых чугунов на обрабатываемость резанием. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту: науковий журнал*. Дніпро: ДНУЗТ. 2016. № 1 (61). С. 122–130. **(НБД Index Copernicus)**

21. Нетребко В. В. Влияние Cr, Mn и Ni на образование карбидов в высокохромистых чугунах. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: науковий журнал*. Запоріжжя: ЗНТУ. 2016. № 2. С. 50–54. **(НБД Index Copernicus)**

22. Нетребко В. В. К вопросу образования карбидов Fe₃C и Fe₇C₃ в высокохромистых чугунах. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту: науковий журнал*. Дніпро: ДНУЗТ. 2016. № 3 (63). С. 138–147. **(НБД Index Copernicus)**

23. Нетребко В. В., Волчок І. П. Влияние химического состава чугуна на межфазное распределение Mn. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту: науковий журнал*. Дніпро: ДНУЗТ. 2016. № 6 (66). С. 115–123. **(НБД Index Copernicus)**

24. Нетребко В. В., Волчок І. П. Влияние химического состава чугуна на межфазное распределение Cr после отжига при 690 °С. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту: науковий журнал*. Дніпро: ДНУЗТ. 2017. № 4 (70). С. 60–70. **(НБД Index Copernicus)**

25. Нетребко В. В. Особенности гидроабразивного изнашивания высокохромистых чугунов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: науковий журнал*. Запоріжжя: ЗНТУ. 2017. № 2. С. 28–31. **(НБД Index Copernicus)**

26. Зносостійкий чавун з підвищеною оброблюваністю різанням лезвийним інструментом: пат. 113363 С2 Україна: МПК С22С 37/08 (2006.01) / В. В. Нетребко; заявник і патентовласник Запорізький нац. техн. ун-т.; заявл. 15.12.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. Зс.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. Нетребко В. В. Влияние марганца на процессы структурообразования износостойких комплексно-легированных чугунов. *Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювальні технології*: матеріали Міжнародна наук.-практ. конф. (м. Маріуполь, 06-08 червня 2012 р.). Маріуполь, 2012. С. 57-58.

28. Нетребко В. В. Влияние марганца на процессы карбидообразования и свойства высокохромистых белых чугунов. *Неметалеві вкrapлення і гази у ливарних сплавах*: матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Запоріжжя, 9-12 жовтня 2012 р.). Запоріжжя, 2012. С. 62-63.

29. Нетребко В. В. Влияние химического состава и структуры на обрабатываемость высокохромистых чугунов. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 73 Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 23-24 травня 2013 р.). Дніпро, 2013. С. 271-272.

30. Нетребко В. В., Беликов С. Б. Особенности легирования хромом и марганцем коррозионностойких чугунов. *Повышение надежности и долговечности оборудования нефтегазовой и химической промышленности*: матеріали Першої міжнар. наук.-практ. конф.-виставки (м. Бердянськ, 3-6 вересня 2013 р.). Бердянськ, 2013. С. 143-147.

31. Нетребко В. В. Особенности легирования белых коррозионностойких чугунов. *Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів*: матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Запоріжжя, 07-09 жовтня 2014 р.). Запоріжжя, 2014. С. 24-25.

32. Нетребко В. В. Влияние физических и тепловых процессов на структуру и свойства высокохромистого чугуна при обработке резанием. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 74 Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 15-16 травня 2014 р.). Дніпро, 2014. С. 417-419.

33. Нетребко В. В. Влияние углерода и хрома на обрабатываемость резанием износостойких чугунов. *Литейное производство и металлургия 2014. Беларусь*: матеріали 22 Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Мінськ, Республика Беларусь, 22-24 жовтня 2014 р.). *Литье и Металлургия*. 2014. № 3. С. 45-49.

34. Нетребко В. В. Влияние термической обработки на распределение хрома между структурными составляющими износостойких белых чугунов. *Today material engineering for realization of the «MMATENG» project objectives: conference abstracts International Scientific and Methodological Conference «University Science – 2015»*, (Mariupol, 19-20 may 2015. Mariupol). 2015. С. 35.

35. Нетребко В. В. Влияние химического состава износостойких белых чугунов на износ резца при обработке резанием. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 75 Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 14-15 май 2015 р.). Дніпро, 2015. С. 359-360.

36. Нетребко В. В. Трансформации карбидных фаз, образующихся в высокохромистых чугунах при термической обработке. *Today material engineering for realization of the «MMATENG» project objectives: conference abstracts International Scientific and Methodological Conference «University Science – 2016»*, (Mariupol, 19-20 may 2016). Mariupol, 2016. С. 105.

37. Нетребко В. В. К вопросу образования карбидов Fe_3C и Fe_7C_3 в высокохромистых чугунах. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 76 Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 19-20 трав. 2016 р.). Дніпро, 2016. С. 287-288.

38. Нетребко В. В. Влияние состава высокохромистого чугуна на распределение Mn. *Титан 2016: Виробництво та використання в авіабудуванні*: матеріали 4 Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запоріжжя, 03-04 листопада 2016 р.). Запоріжжя, С. 86-88.

39. Нетребко В. В., Чабак Ю. Г. Особенности распределения элементов при термообработке чугунов в системы Fe-C-Cr-Mn-Ni. *Університетська наука – 2017*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Маріуполь, 18-19 трав. 2017 р.). Маріуполь, 2017. С. 59.

40. Нетребко В. В. Влияние марганца и термообработки на распределение хрома в основе коррозионностойких чугунов. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 77 Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 11-12 травня 2017 р.). Дніпро, 2017. С. 287-288.

41. Нетребко В. В. Карбидоутворення у високохромистих чавунах додатково легованих марганцем та нікелем. *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: conference abstracts*, Radom, Republic of Poland, 27-28 December 2017. Radom. Izdevniecha «Baltija Publishing», 2017. P. 105-109.

АНОТАЦІЯ

Нетребко В.В. Наукові та технологічні основи підвищення механічних і службових властивостей високохромистих чавунів. – Кваліфікаційна наукова праця правах рукописи.

Дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01– Матеріалознавство. – Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню важливої міжгалузевої науково-технічної проблеми – оптимізації хімічного складу та режимів термічної обробки високохромистих чавунів для різних умов експлуатації. Проведена систематизація карбідних фаз та внесені доповнення у діаграму Fe-C-Cr. Досліджено процеси формування карбідної фази та металевої основи на всіх етапах технологічного процесу виготовлення деталей із зносостійких високохромистих комплекснолегованих чавунів. Отримані регресійні залежності розподілу елементів, механічних та службових властивостей

чавуну від вмісту С, Cr, Mn та Ni у стані литва та після різних видів термічної обробки дозволили розробити марки чавунів для різних умов експлуатації із урахуванням технологічних вимог. Встановлені механізми руйнування чавунів за виникнення ефекту Ребіндера та частинок пульпи. Економічна ефективність від впровадження результатів роботи становить понад 3,18 млн. гривень на рік.

Ключові слова: високохромистий чавун, структуроутворення, карбіди, зони збіднені хромом, оброблюваність, корозія, гідроабразивне зношування, ефект Ребіндера

АННОТАЦИЯ

Нетребко В.В. Научные и технологические основы повышения механических и служебных свойств высокохромистых чугунов. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Запорожский национальный технический университет, Запорожье, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной межотраслевой научно-технической проблемы – оптимизации химического состава и режимов термической обработки высокохромистых чугунов для различных условий эксплуатации с учетом технологических потребностей. Исследования процессов формирования карбидной фазы и металлической основы высокохромистых чугунов были проведены на всех этапах технологического процесса изготовления деталей, эксплуатируемых в условиях коррозионного и гидроабразивного изнашивания. Установлено, что во время кристаллизации высокохромистых чугунов возникает не только химическая но и структурная неоднородность карбидов. Замещение в карбидах атомов железа и марганца на атомы хрома при охлаждении отливки в форме или термической обработке приводит к образованию возле карбидов зон, обедненных хромом и обогащенных марганцем. Систематизация карбидных фаз позволила объяснить механизмы трансформации карбидов и образование в них зон аустенита при термической обработке (нормализации при 1050 °C), а также возникновение локального $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения железа в зонах возле карбидов в процессе изотермической выдержки ниже A_{c1} . Во время механической обработки резанием происходит значительная пластическая деформация поверхностных слоев, что вызывает дробление первичных карбидов и способствует появлению значительного количества структурных дефектов.

Механическая обработка резанием лезвийным инструментом рекомендована только для подготовки базовых поверхностей, без использования смазочно-охлаждающих жидкостей. Зоны, обедненные хромом, активизировали разрушение чугунов при коррозионном и гидроабразивном изнашивании. Разрушения при возникновении эффекта

Ребиндера усиливались наличием мелких частиц пульпы (до 0,5 мкм), которые двигались вдоль микродефектов, дендритов и карбидов, что вызывало образование трещин и способствовало отделению целых фрагментов поверхности. Полученные зависимости содержания концентрации хрома в около карбидных зонах, распределение элементов, механических, служебных и технологических свойств чугунов от содержания C, Cr, Mn и Ni в литом и термообработанном состоянии позволили разработать новые марки чугунов для различных условий эксплуатации с учетом технологических потребностей. Экономическая эффективность от внедрения новых составов чугунов и оптимизации режимов термической обработки составит более 3,18 млн. гривен.

Ключевые слова: высокохромистый чугун, структурообразование, карбиды, зоны обедненные хромом, обрабатываемость, коррозия, гидроабразивное изнашивание, эффект Ребиндера.

ABSTRACT

Netrebko V.V. Scientific and technological bases of increase of mechanical and service properties of high-chrome cast iron - Qualifying scientific work as the manuscript.

The dissertation for the Engineering Science Doctor degree according to the specialty 05.02.01 - Material Science. – Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhia, 2019.

The dissertation is devoted to solving the important scientific and technical problem - optimization of chemical composition and modes of heat treatment of wear-resistant high-chromium cast iron for various operating conditions. The systematization of carbide phases and the addition in the Fe-C-Cr diagram have been made. The processes of formation of a carbide phase and a metal bases at all stages of the technological process of manufacturing parts from wear-resistant high-chromium alloyed cast-iron are investigated. The regressive dependences of the distribution of the elements, mechanical and service properties of cast iron on the content of C, Cr, Mn and Ni in the casting state and after various types of heat treatment have allowed developing the grades of cast irons for different operating conditions. The mechanisms of the destruction of cast iron at the appearance of the Rebinder's effect and the pulp particles have been established. The efficiency by the introduction by new cast irons and optimization of thermal treatment is to more than UAH 3.18 million.

Keywords: high-chromium cast iron, formation of structure, carbides, zones depleted of chromium, machinability, corrosion, hydroabrasive wear, Rebinder effect.