

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

« ___ » _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство» _____

на тему: «Дослідження впливу процесу хромосиліціювання на підвищення стійкості та довговічності робочих коліс відцентрового компресора, що працює з агресивними газами»

Здобувача групи _____ МТ.м-21 _____ Дорошенка Олександра Миколайовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Олександр ДОРОШЕНКО

Керівник _____ доцент кафедри ПМ і ТКМ,
к.т. н., доц. Станіслав МАРЧЕНКО _____

Нормоконтроль _____ доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

« ___ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

_____ Дорошенко Олександр Миколайович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: «Дослідження впливу процесу хромосиліціювання на підвищення стійкості та довговічності робочих коліс відцентрового компресора, що працює з агресивними газами»

Затверджена наказом по університету від «11» грудня 2023 р. №1429-VI _____

1. Термін здачі студентом роботи 15.12.2023 р. _____
2. Вихідні дані проекту (роботи): аналіз літературних джерел.
3. Зміст розрахунково – пояснювальної записки: огляд літературних джерел; методика дослідження; проведення експериментальних досліджень; економічна частина; охорони праці; навколишнього середовища та техніка безпеки; висновки; список використаної літератури.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): креслення у роботі немає так, як робота дослідницького характеру.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів проекту, що стосуються їх:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Говорун Т.П.	10.11.2023 р.	
Економічна частина	Берладір Х.В.	16.11.2023 р.	

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямків дослідження	10.11.2023 р.	виконано
2	Розділ 2. Загальна методика та основні методи дослідження	20.11.2023 р.	виконано
3	Розділ 3. Експериментальні дослідження та загальні результати	10.12.2023 р.	виконано
4	Розділ 4. Економічна частина	15.12.2023 р.	виконано
5	Розділ 5. Охорона праці, довкілля та техніки безпеки	15.12.2023 р.	виконано

6. Дата видачі завдання 09.11.2023 р

Студент: _____ Дорошенко О. М.
(підпис)

Керівник: _____ Марченко С. В.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дорошенко Олександр Миколайович. Дослідження впливу процесу хромосиліціювання на підвищення стійкості та довговічності робочих коліс відцентрового компресора, що працює з агресивними газами – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 – Матеріалознавство. – Сумський державний університет, Суми, 2023.

Робота присвячена визначення оптимальної технології хіміко-термічної обробки сталі 20Х13Л з метою підвищення стійкості та довговічності робочих коліс відцентрового компресора, що працює з агресивними газами.

У роботі проаналізована можливість використання корозійностійкої сталі мартенситного структурного класу 20Х13Л. Вивчені основні питання з технологій підвищення жаростійкості матеріалів, зокрема сталі 20Х13Л. Досліджено вплив термічної та хіміко-термічної обробки корозійностійкої сталі на її структуру, мікротвердість, пористість і жаростійкість. Визначено раціональний, оптимальний та комплексний режим термічної обробки: температура 1000 °С, тривалість 6 годин. Для отримання високотвердого, жаростійкого поверхневого покриття в роботі запропоновано використання комплексної контактної дифузійної металізації в один технологічний етап насичення кремнієм і хромом. Хромосиліціювання проводиться на сучасному обладнанні в лабораторних умовах. Структура, яка формується на поверхні сталі 20Х13Л після дифузійного хромосиліціювання, дозволяє підвищити поверхневу твердість та жаростійкість, що призведе до підвищення стійкості і довговічності робочих коліс відцентрового компресора, які працюють з агресивними газами.

Ключові слова: ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ХРОМ, КРЕМНІЙ, ОКСИД, КАРБІД, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ЖАРОСТІЙКІСТЬ

ABSTRACT

Oleksandr Doroshenko. Study of the influence of the chromosilicization process on increasing the stability and durability of the impellers of a centrifugal compressor operating with aggressive gases – Manuscript.

Qualification work for master's qualification in specialty 132 - Materials science. – Sumy State University, Sumy, 2023.

The work is devoted to determining the optimal technology of chemical and thermal treatment of steel 20Cr13 in order to increase the stability and durability of the impellers of the centrifugal compressor working with aggressive gases.

The paper analyzes the possibility of using corrosion-resistant steel of martensitic structural class 20Cr13. The main issues of technologies for increasing the heat resistance of materials, in particular steel 20Cr13, were studied. The effect of thermal and chemical-thermal treatment of corrosion-resistant steel on its structure, microhardness, porosity, and heat resistance was studied. A rational, optimal and complex mode of heat treatment was determined: temperature 1000 °C, duration 6 hours. In order to obtain a highly hard, heat-resistant surface coating, the work proposes the use of complex contact diffusion metallization in one technological stage of saturation with silicon and chromium. Chromosilication is carried out on modern equipment in laboratory conditions. The structure formed on the surface of 20Cr13 steel after diffusion chromosilicization allows to increase the surface hardness and heat resistance, which will lead to an increase in the stability and durability of centrifugal compressor impellers that work with aggressive gases.

Keywords: CHEMICAL-THERMAL TREATMENT, CHROME, SILICON, OXIDE, CARBIDE, MICRO-HARDNESS, HEAT RESISTANCE

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему: «Дослідження впливу процесу хромосиліціювання на підвищення стійкості та довговічності робочих коліс відцентрового компресора, що працює з агресивними газами». Робота виконана на 66 сторінках друкованого тексту, містить 15 ілюстрації, 12 таблиць, 0 додатків.

Актуальність теми пов'язана з підвищенням твердості та жаростійкості матеріалу деталі «колесо робоче». Прогнозованим результатом від впровадження сучасної технології вважається підвищення експлуатаційних властивостей колеса робочого відцентрованого насоса, зокрема збільшення стійкості та довговічності готового виробу.

Мета роботи – підвищення властивостей і характеристик сталі 20X13Л за допомогою розробки сучасного методу хіміко-термічної обробки (ХТО).

Задачі досліджень: проаналізувати результати існуючих досліджень з питання хромосиліціювання; провести теоретичні розрахунки раціонального складу, температури та часу хромосиліціювання; провести практичний експеримент з хромосиліціювання сталі 20X13Л; дослідити структуру, визначити мікротвердість, товщину та мікропористість покриттів, провести випробування на стійкість до окислення за умов високих температур; зробити висновки і надати рекомендації.

Об'єкт дослідження – сталь 20X13Л після комплексної металізації хромом і кремнієм.

Предмет дослідження – склад, структура, характеристики дифузійних покриттів на основі кремнію та хрому і їх взаємозв'язок із мікротвердістю, мікропористістю та жаростійкістю сталі 20X13Л.

Методи досліджень – роботу проводили з використанням сучасного обладнання в лабораторних умовах. Контактне дифузійне хромосиліціювання сталі 20X13Л в контейнері, металографічний аналіз, дюрOMETричний, визначення товщини та пористості покриття, визначення жаростійкості.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше досліджено вплив параметрів процесу хромосиліціювання, зокрема температури та часу насичення, на твердість, товщину і мікропористість хромосиліційованих покриттів сталі 20Х13Л. Показано, що в результаті хромосиліціювання сталі 20Х13Л за режимом 1000 °С впродовж 6 годин відмічається збільшення жаростійкості в 1,8-2,5 разів.

Практичне значення отриманих результатів. Матеріали роботи можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці лекцій та лабораторних робіт з дисциплін «Технологія нанесення та властивості покриттів», «Металознавство та основи термічної обробки», «Леговані сталі і сплави».

Особистий внесок здобувача. Автору належить аналіз літературних даних, постановки завдання та визначення мети дослідження, виготовлення зразків, приготування карбюризатора, проведення досліджень та оформлення роботи.

Ключові слова: ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ХРОМ, КРЕМНІЙ, ОКСИД, КАРБІД, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ЖАРОСТІЙКІСТЬ

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	12
1.1 Основні відомості про деталь «колесо робоче».....	12
1.2 Основні методи підвищення мікротвердості та жаростійкості.....	14
Висновки	17
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	18
2.1.Матеріал дослідження	18
2.2 Методика нанесення захисного покриття	25
2.3 Металографічний аналіз.....	29
2.4 ДюрOMETричний аналіз.....	32
2.5 Визначення мікропористості	34
2.6 Визначення жаростійкості	34
Висновки	37
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	39
3.1 Результати металографічного та дюрOMETричного аналізів.....	39
3.2 Результати визначення мікропористості	46
3.3 Результати випробувань на жаростійкість	48
Висновки	50
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	51
4.1 Теоретична частина	51
4.2 Розрахункова частина.....	51
Висновки	55

	9
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	56
5.1. Загальна характеристика термічної ділянки	56
5.2 Аналіз потенційних небезпек на виробництві	57
5.3 Аналіз потенційних шкідливостей на виробництві.....	57
5.4 Заходи щодо забезпечення безпеки праці	58
5.5 Мікроклімат на проєктованій ділянці.....	59
5.6 Екологізація виробництва	60
Висновки	61
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65

ВСТУП

Актуальність теми пов'язана з підвищенням твердості та жаростійкості матеріалу деталі «колесо робоче». Прогнозованим результатом від впровадження сучасної технології вважається підвищення експлуатаційних властивостей колеса робочого відцентрованого насосу, зокрема збільшення строку експлуатації готового виробу.

Мета роботи – підвищення властивостей і характеристик сталі 20X13Л за допомогою розробки сучасного методу хіміко-термічної обробки (ХТО).

Задачі досліджень: проаналізувати результати існуючих досліджень з питання хромосиліціювання; провести теоретичні розрахунки раціонального складу, температури та часу хромосиліціювання; провести практичний експеримент з хромосиліціювання сталі 20X13Л; дослідити структуру, визначити мікротвердість, товщину та мікропористість покриттів, провести випробування на стійкість до окислення за умов високих температур; зробити висновки і надати рекомендації.

Об'єкт дослідження – сталь 20X13Л після комплексної металізації хромом і кремнієм.

Предмет дослідження – склад, структура, характеристики дифузійних покриттів на основі кремнію та хрому і їх взаємозв'язок із мікротвердістю, мікропористістю та жаростійкістю сталі 20X13Л.

Методи досліджень – роботу проводили з використанням сучасного обладнання в лабораторних умовах. Контактне дифузійне хромосиліціювання сталі 20X13Л в контейнері, металографічний аналіз, дюрOMETричний, визначення товщини та пористості покриття, визначення жаростійкості.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше досліджено вплив параметрів процесу хромосиліціювання, зокрема температури та часу насичення, на твердість, товщину і мікропористість хромосиліційованих покриттів сталі 20X13Л.

Показано, що в результаті хромосиліціювання сталі 20X13Л за режимом 1000 °С впродовж 6 годин відмічається збільшення жаростійкості в 1,8-2,5 разів.

Практичне значення отриманих результатів. Матеріали роботи можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці лекцій та лабораторних робіт з дисциплін «Технологія нанесення та властивості покриттів», «Металознавство та основи термічної обробки», «Леговані сталі і сплави».

Особистий внесок здобувача. Автору належить аналіз літературних даних, постановки завдання та визначення мети дослідження, виготовлення зразків, приготування карбюризатора, проведення досліджень та оформлення роботи.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Основні відомості про деталь «колесо робоче»

Розвиток провідних галузей народного господарства (хімії та нафтохімії, видобутку нафти і газу, металургії, трубопровідного транспорту та ін) призводить до постійного зростання потреби в відцентрових компресорах промислового призначення. Компресор призначається для переміщення газоподібного середовища з простору з низьким тиском в простір з підвищеним тиском. Широке застосування знайшли відцентрові компресори. Відцентрові компресори в порівнянні з іншими типами мають переваги: вони не мають елементів, що здійснюють зворотно-поступальний рух, тому вони не вимагають масивних фундаментів; рухомі поверхні цих компресорів стикаються з нерухомими через підшипники, отже, вони немає швидкозношувальних вузлів. Відцентрові компресори мають просту конструкцію, вони економічні в експлуатації. Відцентрові компресори застосовуються для стиснення чистого і запиленого повітря або газів, для дуття у вагранки, доменні, плавильні печі. Відцентрові компресори також з успіхом застосовуються в установках для пневматичного транспортування зерна, тирси, бавовни і т. д., а також для подачі пилоподібного палива.

Серцем кожного відцентрового компресора є робоче колесо. Число робочих коліс в одному корпусі в залежності від необхідного відношення тисків може бути різним: від одного до восьми. Деталь «колесо робоче» є головною деталлю відцентрового компресора, що перекачує агресивні середовища в газовому агрегатному стані і в ріддиному. Робоче колесо є тим елементом проточної частини, в якому відбувається перетворення механічної енергії приводу в енергію середовища, що перекачується. Це накладає особливі вимоги до досконалості проточної частини, точності виготовлення, якості поверхні.

Робоче колесо закритого типу складається з основного та покриваючого (переднього) дисків, між якими розташовуються профільовані лопасті, що утворюють кругову решітку. Робоче колесо піддається впливу динамічних, знакозмінних навантажень від тиску середовища на лопатки, через відцентрові сили і вібрації за наявності неврівноважених сил. Крім навантажень і фізичних впливів на деталь вирішальну роль впливу бере на себе середовище, яке і перекачує даний компресор. Агресивне середовище може викликати корозію, температура середовища впливає тривалість роботи деталі, втрата деталю свого службового призначення - її поверхневого шару, призводить до розвитку втомної тріщини, зносу і взагалі виходу установки з ладу. Робочі колеса з тріщинами будь-якого розташування, наскрізними раковинами, зі зношуванням внутрішніх поверхонь до подальшої експлуатації не допускаються. При неможливості усунення дефектів колеса підлягають заміні. За умовами експлуатації колесо робоче має бути надійним у роботі, т.к. його поломка призведе до аварії цілого агрегату компресора.

Також деталь «колесо робоче» схильна до різних видів локальних руйнувань – щілинна корозія, виразкова корозія та ін. металу. Корозійне розтріскування є характерним випадком, коли взаємодіє хімічна реакція та механічні сили, що призводить до структурного руйнування. Насамперед зношуються лопатки робочих коліс, щілинні ущільнення, посадкові поверхні під вал. Тріщини з'являються, як правило, на лопатках та дисках робочих коліс. Дефекти зовнішніх кромek дисків та лопаток колеса усувають проточуванням колеса за максимальним діаметром. Газова корозія є окремим випадком хімічної корозії. Зовнішнє середовище є газ, гаряче повітря або пар. Корозія цього виду вражає найрізноманітніші деталі машин і устаткування, що працює при підвищених температурах у контакті з агресивними газами. Найбільш поширеним випадком газової корозії є корозія, що виникла в результаті взаємодії кисню повітря з металом.

Хром, алюміній і кремній при взаємодії з киснем утворюють щільні та

міцні плівки оксидів, тому легування стали цими елементами призводить до істотного підвищення її корозійної стійкості при високих температурах. Так, наприклад, при вмісті 12% Cr сталь дуже стійка до окислення при температурі 800°C, а при вмісті 22% Cr - при температурі 900-1000°C.

Основними факторами, що впливають на інтенсивність руйнування від корозії, є склад сплаву, склад та температура газової атмосфери; наявність на поверхні захисних покриттів. Тому при неможливості зменшити агресивні властивості газового середовища слід застосовувати відповідні марки легованих сталей або захисні покриття.

Технічні вимоги до компресору повинні відповідати підвищенню надійності його роботи в процесі експлуатації.

Таблиця 1.1

Основні параметри центробіжного компресора

Робоче середовище	Природний газ
Кінцевий тиск, МПа	3,75
Відношення тисків	1,6
Потужність приводу, МВт	8
Частота обертів, обор/хв	8100
Температура середовища, що перекачується, °С, не більше	186

Виходячи з вище сказаного не тільки матеріал деталі повинен витримувати циклічні і динамічні навантаження, а й поверхня виявляти стійкість проти корозії, витримувати робочу температуру, при перекачуванні рідин бути стійкими проти кавітації і абразивного зносу.

1.2 Основні методи підвищення мікротвердості та жаростійкості

Суть процесів хіміко-термічної обробки (ХТО) (поверхнєве легування) полягає в насиченні поверхневих шарів деталей одним або декількома хімічними елементами (металами або неметалами) з метою отримання на поверхні

підвищених фізико-механічних властивостей і створення сприятливих умов для подальшої термічної обробки [1].

Процеси хіміко-термічної обробки реалізують шляхом занурення деталей в середовище, збагачене насичувальними елементами. За певної температури починаються процеси утворення високої концентрації вільних атомів (іонів) насичувального елемента на межі з поверхнею деталі. Після утворення хімічних зв'язків між атомами основного металу і насичувального елемента починається дифузійний процес проникнення елементарних частинок у глибинні шари основного металу. До хіміко-термічної обробки сталей відносять: цементацію, азотування, ціанування (нітроцементация), хромування, алітування, борування, силіцування та ін. Усі ці процеси характеризуються дифузійним насиченням поверхневих шарів сталевих деталей за високої температури з метою підвищення їх фізико-механічних властивостей, зносостійкості, жароміцності та ін [1].

Існують сучасні методи, які дозволяють підвищити властивості матеріалу основи. Наприклад [2], дифузійне хромосиліціювання дає змогу отримати на поверхні сталі 20 комплексні карбідні покриття на основі хрому, легованих кремнієм з товщиною 20 мкм. Загальна товщина дифузійного покриття складає 110 мкм. Мікротвердість покриття складає 19,5 ГПа на поверхні і поступово зменшується до 4,0 ГПа. Отримані покриття удосконаленим газовим методом мають високу жаростійкість та корозійну стійкість у різних промислово важливих водних розчинах. Проведені випробування на жаростійкість показали їх високу стійкість до температури 1000 °С. Встановлено, що нанесення хромосиліцидних покриттів на сталь 20 підвищує її корозійну стійкість у досліджених розчинах у 2,5 - 30 разів та підвищується в такому напрямі: 5-15 % H_2SO_4 → 10-15% HCl → 10-15% H_3PO_4 → 5-10 % CH_3COOH → технічна вода → 3% NaCl → 10-20 % HNO_3 . Встановлена можливість підвищення корозійної стійкості покриттів шляхом введення в агресивні розчини неорганічних окисників. Введення у 10% розчини фосфорної, хлоридної та сульфатної кислоти 3г/л молібдату натрію підвищує корозійну стійкість хромосиліцидних покриттів у 4, 6, 34 разів, відповідно та

забезпечує ступінь захисту від корозії на рівні 75,0-96,2 % [2].

Дослідження були продовжені на сталі 45 [3]. Газовим методом у спеціально розробленій установці, яка мала спеціальну реакційну камеру нової конструкції реалізовували процес хромосиліціювання впродовж 6 годин у замкнутому реакційному середовищі при тиску активної газової фази та температурі 1323 К. В якості вихідних реагентів для нанесення дифузійних покриттів використовували порошки феросиліцію, хрому, а також чотирихлористий вуглець. Встановлено, що комплексні покриття за участю хрому та кремнію, нанесені на поверхню сталі 45, згідно з даними мікроструктурного аналізу, складаються з зовнішнього шару до $20 \cdot 10^{-6}$ м, який містить карбіди хрому $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 та внутрішнього шару до $80 \cdot 10^{-6}$ м, який представляє собою твердий розчин кремнію та хрому у α -залізі [3].

В роботі [4] стверджується, що хромосиліціювання сталей підвищує їх зносостійкість, ерозійну і кавітаційну стійкість, опір газової та електрохімічної корозії. Хромосиліціювання проводять в порошкових сумішах в герметичних контейнерах, з паст з використанням захисної обмазки, а також в рідких карбюраторів електролізним і без електролізним способом насичення. Практична цінність роботи полягала в підвищенні жаростійкості трубок теплообмінника із сталі 12X18H10T методом хромосиліціювання.

Хотілось би зазначити, що процес комплексного насичення елементами проводять і на чавунах. Так в роботі [5] зазначається, що хромотитанування підвищує корозійну стійкість сталі 45 в 44 рази, хромосиліціювання - в 31, хромування - в 27, борування, титаноалітування, хромосиліціювання - в 5...8, хромотитаноалітування, хромоалітування, хромотитаносиліціювання і титаноалюмосиліціювання й алітування – в 1,3...1,5 рази. Силіціювання, хромоалітування і титаносиліціювання не захищають сірий чавун від корозії в агресивних середовищах. Хромосиліціювання сталей підвищує їх зносостійкість, ерозійну і кавітаційну стійкість, опір газовій і електрохімічній корозії. В результаті хромосиліціювання кавітаційна стійкість сірого чавуну підвищується в

4...6 разів [5]. За результатами проведених досліджень [6] встановлено, що властивості при експлуатації литих виробів із сірого чавуну (корозійна стійкість, жаростійкість, опір зносу), можуть бути суттєво підвищені (у 1,5–3 рази) за рахунок дифузійного насичення поверхневого шару одним або декількома елементами з групи: Cr, Ti, Cd, Al, Mn, Si.

При цьому зазначається [6], що при одночасному насиченні сталі хромом і кремнієм із ростом кількості кремнію в порошковій суміші при підвищеній тривалості процесу спостерігається збільшення товщини дифузійних поверхневих шарів, однак при цьому зовнішня зона поверхневого шару стає більш пористою. Хромовані поверхневі сплави утворюються в сумішах, що містять переважно хром. Поверхневі сплави, отримані послідовним способом насичення, завдяки більшій концентрації хрому та утворенню карбідів хрому характеризуються вищою твердістю [6].

Висновки

На основі критичного аналізу літературних джерел інформації встановлені основні умови роботи деталі «колесо робоче», сформульовані основні вимоги до матеріалу основи і поверхні даного виробу.

Проаналізовано існуючі варіанти підвищення експлуатаційної стійкості колеса робочого. Такі як: легування, термічна обробка та хіміко-термічна обробка. Зокрема запропонована перспективна технологія зміцнення поверхні колеса робочого- хромосиліціювання.

Проаналізовані основні аспекти процесу одночасного насичення сталі хромом і кремнієм. Доведено, що даний процес можна рекомендувати як такий, що підвищує твердість і жаростійкість готового виробу.

Встановлено, що результати насичення залежить від матеріалу основи, температури, часу насичення, технології і вмісту складових карбюризатора.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Матеріал дослідження

До матеріалів, що використовуються для виготовлення робочих коліс, що працюють з агресивними середовищами, пред'являються такі вимоги: високий опір зносу, абразивному, кавітаційному; достатня пластичність та в'язкість; досить висока жаростійкість, жароміцність і корозійна стійкість. Робоче колесо піддається впливу динамічних навантажень від тиску газу на лопатки, через відцентрові сили та вібрації за наявності неврівноважених сил. Крім того, воно піддається впливу кавітації та корозії.

Виходячи з умов експлуатації та вимог, що висуваються до матеріалів для виготовлення колеса робочого, пропонуємо розглянути корозійностійкі сталі, до яких відноситься велика група сплавів на основі заліза, що містять не менше 12% Cr, а також додатково леговані такими елементами, як Ni, Mn, Mo та ін. Залежно від хімічного складу і термічної обробки корозійностійкі сталі мають різну структуру та властивості [7].

Для виготовлення робочих коліс застосовують: хромонікелеві сталі, що мають в основному аустенітну структуру; хромисті сталі без нікелю, що мають мартенситну або мартенситно-феритну структуру.

Відповідно до наведених вимог, для виготовлення робочих коліс доцільно застосувати такі сталі як (таблиця 2.1).:

- 20X13Л,
- 12X18Н9ТЛ,
- 12X18Н12М3ТЛ

Хімічний склад сталей для виготовлення колеса робочого [8]

Марка сталі	C, %	Si, %	Mn,%	Ni,%	Cr,%	Ti,%	Cu,%	S,%	P,%	Mo, %
12X18H9ТЛ	0,12	0,2-1,0	0,2-1,0	8,0-11,0	17,0-20,0	≤0,6	≤0,3	≤0,03	≤0,035	-
12X18H12M3ТЛ	≤0,12	0,2-1,0	1,0-2,0	11,0-13,0	16,0-19,0	≤0,6	≤0,3	≤0,03	≤0,035	3,0-4,0
20X13Л	0,16-0,25	0,20-0,80	0,30-0,80	≤0,5	12,0-14,0	-	≤0,3	≤0,025	≤0,030	-

Сталь 12X18H9ТЛ застосовується для виготовлення різних деталей машинобудування, що працюють при температурі не вище 700 °С. Сталь аустенітного класу, корозійно-стійка, жаростійка до температури 750 °С, жароміцна до 600 °С. Сталь 12X18H12M3ТЛ також аустенітного класу. Застосовується для деталей, стійких при дії сірчистої киплячої, фосфорної, мурав'їної, оцтової та інших кислот, а також деталей, що тривалий час працюють під навантаженням при температурі до 800 °С. Нержавіючі сталі з 18% Cr і 8-12% Ni набули найбільшого поширення в машинобудуванні у виробках широкого вжитку, а також в архітектурі та скульптурі. Введення достатньої кількості нікелю в 18%-ву хромисту сталь переводить її в аустенітний стан у всьому діапазоні температур, що забезпечує кращі механічні властивості, меншу схильність до зростання зерна, а також робить сталь більш корозійностійкою і не холодноламкою [8].

У нержавіючих хромонікелевих сталях через наявність вуглецю можуть утворюватися спеціальні карбіди, переважно типу $Me_{23}C_6$. Кількість цих карбідів, природно, залежить від вмісту вуглецю. При кімнатній температурі і вище приблизно до 700 °С розчинність вуглецю (карбідів) всього лише 0,05%, але вище 800 °С розчинність різко збільшується і при температурі 1050 °С можна перевести в розчин 0,05 %, а при 1150 °С - всі карбіди, навіть якщо сталь містить 0,15% С (при вмісті 9% Ni; нікель зменшує розчинність вуглецю в аустеніті при високій температурі). Природно, що за такої різниці в розчинності карбідів в аустеніті

нагрівання до високої температури та швидке охолодження (гартування) дозволить отримувати пересичений твердий розчин, а повторне нагрівання (при 500-700 °С) призведе до виділення карбідів [9].

Виділення карбідів відбувається за межами зерен, що при певних умовах призводить і до окрихчення сталі, і до появи особливого виду корозійного руйнування по межах зерен - дуже небезпечного, що називається міжкристалітної (інтеркристалітної) корозією (МКК).

Явище інтеркристалітної корозії пов'язане зі зниженням корозійної стійкості кордонів зерен, внаслідок того що в формуванні карбідної фази ($Me_{23}C_6$) на межах зерен бере участь практично весь вуглець (встигає продифундувати сюди з глибини зерна), а хром, що входить до складу спеціального карбиду $Me_{23}C_6$, з'являється тільки з прикордонних шарів зерен, так як через малу швидкість дифузії він не встигає поступати з глибини зерен. В результаті цього вміст хрому в твердому розчині на межах зерен виявляється менше 12%, тобто нижче тієї межі, яка забезпечує корозійну стійкість. Саме тому корозійне руйнування поширюється вглиб тільки по межах зерен, збіднених хромом [9].

Металографічне дослідження показало, що міжкристалітна корозія настає тоді, коли карбіди, що виділилися по межах зерен, утворюють суцільну сітку. Карбіди, що виділилися, але не утворилися ще суцільної сітки або коагульовані великі карбіди по межах зерен не викликають міжкристалітної корозії [9].

Процес інтеркристалітної корозії виникає лише в результаті нагрівання загартованої аустенітної сталі у певній області температур (500-700 °С). Таке нагрівання викликає виділення карбідів за межами зерен.

Нагрівання до 500-700 °С викликає виділення карбідів лише у пересиченого аустеніту, тобто у загартованих аустенітних сталей (при вмісті в них вуглецю більше 0,005%). Схильність до інтеркристалітної корозії аустенітних нержавіючих сталей можна усунути не тільки зменшенням вмісту вуглецю, але і введенням так званих елементів-стабілізаторів: титану або ніобію, які є сильними

карбідоутворювачами. При введення в сталь титану або ніобію утворюються відповідно карбіди типу MeC . Ці карбіди (фази впровадження) мало розчинні в аустеніті [9].

Чисто аустенітні сталі схильні також ще до одного виду корозійного руйнування, до так званого корозійного розтріскування або до корозії під напругою [9]. Аустенітні нержавіючі сталі застосовують дуже широко не тільки через високі антикорозійні властивості, але і завдяки високим технологічним і механічним властивостям. Ці сталі добре піддаються прокатці в гарячому і холодному станах, в холодному стані витримують глибоку витяжку, допускають застосування електрозварювання, без окрихчення навколошовних зон. Термічна обробка неіржавіючих сталей аустенітного класу порівняно проста і полягає у гартуванні у воді з 1050-1100 °С. Нагрів до цих температур викликає розчинення карбідів хрому, а швидке охолодження фіксує стан пересиченого твердого розчину. Повільне охолодження неприпустимо, тому що при цьому можливе виділення карбідів, що призводить до погіршення пластичності та корозійної стійкості. В результаті гартування твердість цих сталей не підвищується, а знижується, тому для аустенітних неіржавіючих сталей гартування є пом'якшувальною термічною операцією. Механічні властивості аустенітних неіржавіючих сталей у загартованому стані характеризуються низьким значенням межі плинності, невисокою міцністю і дуже високою пластичністю.

Враховуючи розглянуті умови роботи колеса робочого і відповідно вимоги до матеріалу виробу, в роботі запропоновано використовувати сталь 20X13Л.

Неіржавіюча сталь 20X13Л відноситься до жаростійких сплавів багатоцільового призначення. Високі експлуатаційні якості металу дозволяють використовувати його в різних галузях промисловості - від нафтопереробки до верстатобудування. Широке застосування в різних сферах промисловості сплав отримав завдяки підвищеній жароміцності і стійкості до корозії. З металу виготовляють лопатки газотурбінних і парових установок, пічне обладнання, кріпильні елементи, трубопроводи та інші вироби, які будуть працювати в

високотемпературних (до +500 градусів) слабоагресивних середовищах. Матеріал стійкий до слабких розчинів органічних кислот і солей, але не призначений для тривалого перебування в морській воді [10].

При введенні в сталь 12-14% Cr її електрохімічний потенціал стає позитивним, і вона набуває стійкості проти корозії в атмосфері, морській (пресній) воді, ряді кислот, солей і лугів.

Сталі мають кращу стійкість проти корозії тільки за умови, що весь вміст хрому в сталі припадає на частку твердого розчину. В цьому випадку він утворює на поверхні щільну окисну захисну плівку типу Cr_2O_3 . Підвищення вмісту вуглецю, що призводить до утворення карбідів, створює двофазну структуру, зменшує кількість хрому в твердому розчині і тому знижує корозійну стійкість сталі і збільшує крихкість.

Корозійна стійкість сталі підвищується термічною обробкою: гартуванням та високим відпустком та створенням шліфованої та полірованої поверхні.

Основним елементами сталі 20Х13Л є залізо, вуглець і хром.

Вуглець в неіржавіючих сталях є небажаним, оскільки він збіднює розчин хромом, зв'язуючи його в карбіди, і сприяє отриманню двофазного стану. Чим нижчий вміст вуглецю, тим вища корозійна стійкість неіржавіючих сталей. У тих випадках, коли у сплавів немає великих структурних змін, вуглець надає порівняно невеликий вплив на характер окислення і величину зміни маси зразків. Так, вуглець майже не впливає на жаростійкість сталей з високим вмістом хрому, в той же час у сталей із середнім вмістом хрому при 0,9 % вуглецю виявляється мінімум втрат маси на окалину. Різниця у втратах маси в залежності від вмісту вуглецю збільшується при більш високих температурах. Стан поверхні майже не впливає на жаростійкість хромистих сталей і чавунів. Це ще раз підтверджує положення про те, що жаростійкість в основному визначається хімічним складом сплаву і захисними плівками оксидів, що утворюються на поверхні цього сплаву.

Залежно від робочої температури вуглець може перебувати у твердому

розчині (при температурах існування γ -твердих розчинів) або у вигляді карбідів (при помірних температурах). Виділення карбідів з твердого розчину при уповільненому охолодженні або при впливі температур, що лежать нижче за їх розчинність, іноді супроводжується місцевою зміною концентрації хрому в твердому розчині, особливо по межах зерен; це за певних умов призводить до підвищеного окислення і порівняно рідко спостерігається у хромистих сталей.

Хромисті неіржавіючі сталі є найдешевшими і тому найпоширенішими. Мінімальний вміст хрому у неіржавіючих сталях 12 %, і вже такий вміст хрому збільшує корозійну стійкість сталі, роблячи її неіржавіючою та кислотостійкою. Хром розчиняється в $Fe\alpha$ та $Fe\gamma$. Максимальна розчинність у $Fe\alpha=0,5$ % при 20 °С, $Fe\gamma=12,8$ % при 510 °С.

Корозійна стійкість може бути підвищена, якщо вміст вуглецю звести до мінімуму, якщо ввести легуючий елемент, що утворює із залізом тверді розчини в такій кількості, при якому стрибкоподібно підвищиться електродний потенціал сплаву. Хром також сприяє прояву пасивності сталі (стан досить високої корозійної стійкості, викликане гальмуванням анодного процесу електрохімічної корозії).

Хром є карбідоутворюючим елементом. Карбіди у свою чергу зменшують вміст хрому в твердому розчині, створюють двофазну структуру і знижують корозійну стійкість. У цьому випадку корозійну стійкість підвищують термічною обробкою, яка сприяє укрупненню частинок карбідів, так як більш дрібні карбідні частинки сприяють корозії.

Всі елементи, які розчиняються в залізі, впливають на температурний інтервал існування його алотропічних модифікацій, тобто зсувають критичні точки за температурною шкалою. Хром впливає на поліморфізм заліза, зменшуючи температурний інтервал між критичними точками A_3 та A_4 . Для сталі 20X13Л критичні точки мають такі температурні значення: $A_{c1} = 810$ °С; $A_{c3} = 900$ °С; $A_{r3} = 660$ °С; $A_{r1} = 710$ °С; $M_n = 320$ °С [8, 10].

Хром також підвищує стійкість аустеніту, зрушуючи С-подібні криві праворуч, тим самим збільшуючи прогартовуваність. Як говорилося вище, сталь 20Х13Л мартенситного класу. Для хромистих сталей мартенситного класу охолодження в будь-якому охолоджувачі дає мартенситну структуру. Тому застосування особливого охолоджуючих середовищ (вода, масло) не потрібне. Лише охолодження з піччю викликає формування феритно-карбідної структури.

Тривала витримка при температурі близько 600-650 °С викликає появу в сталях інтерметалідної фази. Утворення такої фази сильно окрихчує сталь, тому є небажаною. Повільне охолодження або тривала витримка при 500 °С викликає утворення впорядкованого твердого розчину, що також викликає окрихчення сталі. Збільшення температури вище 1000 °С викликає бурхливий ріст зерна і як наслідок зниження в'язкості, тобто. сталь теж стає крихкою. Тому при виборі термічної обробки для деталей з цих сталей треба уникати температурних інтервалів, при яких можливе охрупчування і втрата в'язкості.

Хром – основний елемент, що входить до складу жаростійких сталей та сплавів. Підвищення його вмісту в залізі зрушує початок інтенсивного окислення сталі у бік вищих температур. З цього випливає, що зі збільшенням вмісту хрому зменшується товщина плівки, що утворюється на полірованій поверхні сталі. З підвищенням вмісту хрому при всіх температурах кількість окалини, що утворюється, зменшується. Для кожної температури потрібен певний вміст хрому, що забезпечує жаростійкість, і подальше його збільшення в залізі недоцільно. Тому для різних робочих температур рекомендується застосовувати сталі з різним вмістом хрому. Висока жаростійкість хромовмісних сталей і сплавів обумовлена утворенням на їх поверхні дуже міцною тугоплавкою окису хрому Cr_2O_3 або оксидів шпинельного типу, і чим більше хрому, тим вище і жаростійкість.

Металевий хром при нагріванні окислюється з утворенням єдиного оксиду типу Cr_2O_3 . Цей оксид дуже стійкий у широкому інтервалі температур при різній товщині плівки і має хороші захисні властивості. Зазначається, що окисна плівка, що утворилася на поверхні металу при окисленні хрому, не змінює своїх

властивостей навіть при охолодженні в атмосфері водню.

У залізохромистих сплавах чистий окис хрому утворюється лише за дуже високих його вмістах, близько 30 % і від, а при менших вмістах хрому окалина має складний склад. При окисленні 13%-ної хромистої сталі перетворення шпинелі в $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ відбувається при 400-450 °С. Очевидно, температури перетворення $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ значно підвищуються.

Враховуючи, що $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та Cr_2O_3 мають близькі параметри решітки, а також ідентичність формули типу Me_2O_3 , припускають, що Fe_2O_3 та Cr_2O_3 утворюють твердий розчин.

Опір газової корозії сплавів заліза з хромом можна додатково підвищити шляхом присадки до них алюмінію, кремнію і нікелю. В нашому ж випадку ми пропонуємо підвищити жаростійкість сталі 20X13Л за рахунок нанесення захисного покриття.

В даній науковій роботі на практиці було реалізовано один із сучасних методів хіміко-термічної обробки (ХТО), а саме комплексне одночасне насичення двома хімічними елементами: хромом та кремнієм. Даний процес називається хромосиліціюванням.

2.2 Методика нанесення захисного покриття

Процес дифузійного контактного насичення поверхні сталі 20X13Л хромом і кремнієм проводили в порошкових сумішах в герметичних контейнерах (рис. 2.1).

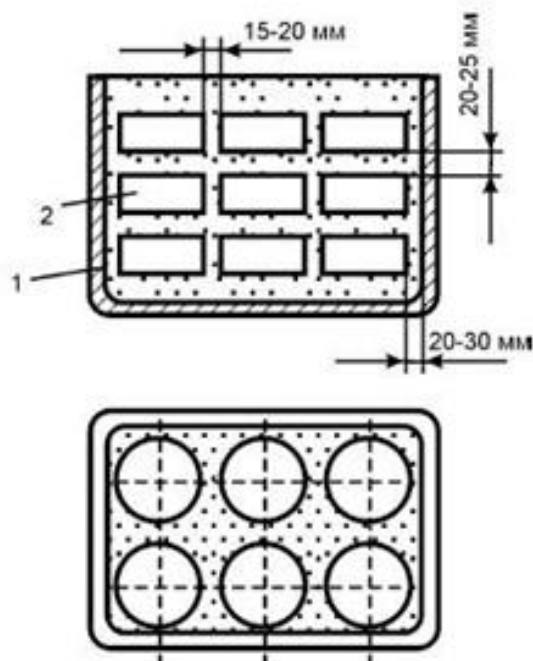


Рисунок 2.1 – Схема пакування зразків із сталі 20Х13Л в контейнер для хромосиліціювання

Зразки були знежирені за допомогою етилового спирту, завантажені в контейнері із жароміцної сталі, на дні якого заздалегідь було внесено карбюризатор у неповному обсязі. Потім зразки були засипані карбюризатором таким чином, щоб жоден із зразків не мав контакту між собою і стінками контейнера. Відстань між зразками і стінками контейнера має бути не менше 15-20 мм [11]. Після того, як карбюризатор повністю покрив зразки, контейнер було закрито металевою кришкою та загерметизовано. Зазори між кришкою і стінками контейнера закривали декількома послідовно нанесеними вручну вогнетривкою глиною [11]. Коли глина повністю висухла, контейнер був відправлений в піч. Нагрівання печі відбувалося із завантаженим контейнером.

Проаналізувавши довідникові дані було підібрано оптимальний склад шихти карбюризатора (таблиця 2.2)

Склад порошкової суміші для хромосиліціювання сталі 20Х13Л			
№ п/п	Складові карбюризатора	Хімічна формула	Відсотковий вміст компонента, %
1	Кремній кристалічний	Si	2-6
2	Хром порошковий	Cr	50-54
3	Оксид алюмінію	Al ₂ O ₃	42
4	Хлорид амонію	NH ₄ Cl	2

Дифузійне легування поверхні елементами забезпечується тим, що відбувається введення в шихту кристалічного кремнію і порошкоподібного хрому, розмір фракції порошку повинен знаходитися в межах 200...300 мікрометрів. Для запобігання спікання порошкової суміші в неї вводять оксид алюмінію. Як активатор процесу дифузії використовують хлорид амонію [11].

Процес комплексного насичення поверхні сталі хромом та кремнієм проводився за двома режимами (таблиця 2.2), які відрізнялись тривалістю і температурою. Даний експеримент надасть можливість рекомендувати оптимальний з точки зору мікротвердості та жаростійкості режим хромосиліціювання сталі 20Х13Л.

За першим режимом хромосиліціювання при температурі 900 °С тривалість ізотермічної витримки становить 4 години – мінімальна температура та мінімальний час витримки для процесу хромосиліціювання (таблиця 2.2, рис. 2.2). Другий режим хромосиліціювання був обраний стандартний, поширений і найчастіше застосовуваний при температурі 1000 °С і витримкою при цій температурі 6 годин (таблиця 2.3, рис. 2.3).

Таблиця 2.3

Вихідні компоненти і технологічні параметри хромосиліціювання сталі 20X13Л			
№ режиму ХТО	Склад насичуючої суміші	Час насичення, г	Температура, °С
1	1. Хром порошковий (50-54%) 2. Кремній кристалічний (2-5 %)	4	900
2	3. оксид алюмінію (42 %) 4. хлорид амонію (2 %)	6	1000

Для завершення процесів контейнери зі зразками охолоджували в печі, після чого контейнери відкривали, вилучені зразки промивали водою і очищалися від залишків карбюратора.

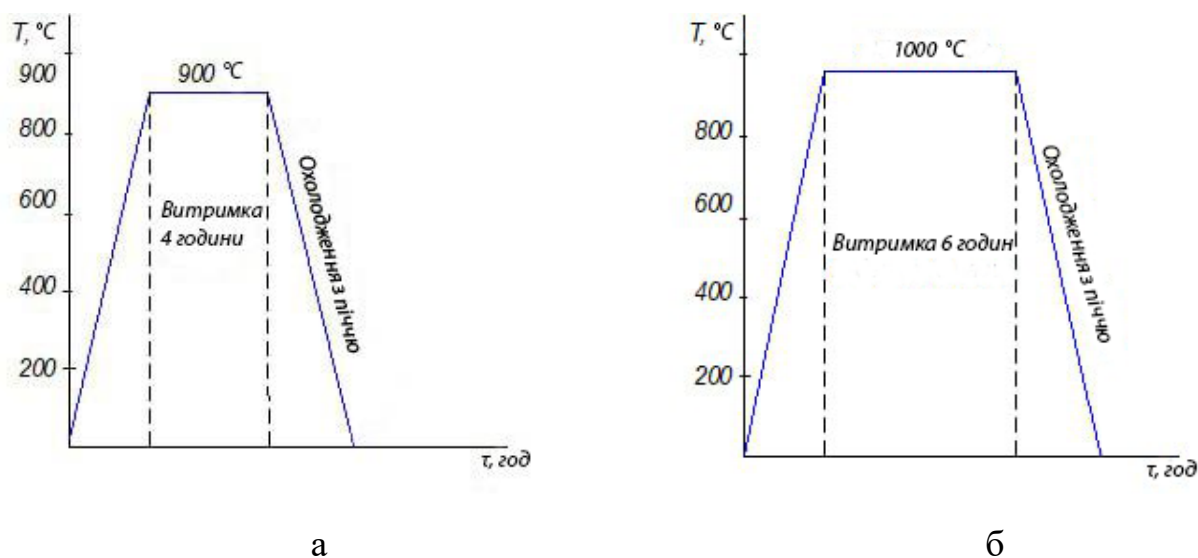


Рисунок 2.2 – Графік хромосиліціювання 20X13Л за двома режимами:
 $T = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4 \text{ г}$ (а), $T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 6 \text{ г}$ (б)

Після очищення починали виготовлення мікрошліфів – шліфування, полірування та травлення, для виявлення структури сталі після хромосиліціювання.

Особливо широке застосування цього методу пояснюється простотою обладнання, відсутністю необхідності створення спеціальних виробництв і ділянок. Всі складові були заздалегідь зважені, за допомогою вагів, прогартовані в герметично закритому контейнері при температурі 100-200 °С протягом 1-1,5 годин, суміш подрібнювалася і перемішувалася, після чого була готова до вживання.

2.3 Металографічний аналіз

Металографічний аналіз – це аналіз, який поділяють на макро- і мікроструктурний. В даній роботі в лабораторних умовах реалізовували мікроструктурний аналіз.

Металографічний аналіз дозволяє реалізувати як якісний так і кількісний аналіз структури матеріалу, що досліджується. Ми можемо дослідити мікроструктуру зразків, зорієнтуватись щодо хімічного та фазового складу, визначити лінійні розміри об'єктів (розмір зерен, неметалевих включень, карбідів, нітридів, карбонітридів, товщину захисного покриття і товщини шарів, з яких це покриття складається), проаналізувати гомогенність структури, співвідношення фаз в структурі і як результат – надати висновок-зв'язок між складом, умовами виробництва, термічної обробки з його мікроструктурою, а відповідно властивостями і характеристиками.

Основна мета мікроструктурного аналізу – це дослідження основних структурних складових за допомогою спеціального обладнання- мікроскопа. Даний аналіз можна провести тільки на спеціально підготовлених зразках, які називаються мікрошліфами.

Мікроструктуру зразків вивчають у відбитому світлі, відшліфована поверхня має відповідати багатьом вимогам [12]: мінімально деформуватись і розігріватись при підготовці до дослідження; бути плоскими, що надає можливість отримувати коректне, не викривлене, якісне зображення; має максимальну відбивну здатність і не має подряпин чи отворів; різні ділянки поверхні повинні

по-різному відбивати світло. Це дозволяє розрізняти елементи мікроструктури (це досягається за рахунок нерівномірного відображення світла (поляризованого або неполяризованого, монохроматичного або поліхроматичного) від площини) [12].

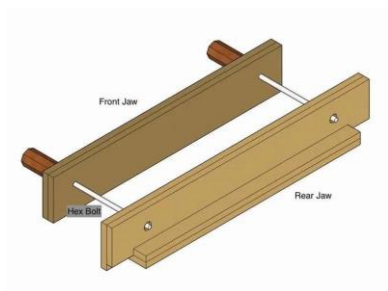
Технологія пробопідготовки зразків для металографічного аналізу складається з декількох послідовних операцій: вирізка зразка; підготовка поверхні; шліфування; полірування; травлення.

Вирізати, шліфувати і полірувати зразок слід так, щоб на його поверхні залишався мінімальний шар деформованого металу і не було подряпин, рисок, ямок і забруднень. У процесі приготування шліфа не повинні фарбуватися неметалеві включення, карбідні та інші фази. Крім того, поверхня шліфа повинна бути досить плоскою, щоб його можна було розглядати при великих збільшеннях [12].

Для вивчення мікроструктури зразка їх вирізають таким чином, щоб можна було визначити її структуру в поперечному перерізі і по висоті зразка. З м'яких матеріалів зразки вирізають пилкою, фрезою, різцем, тощо. Якщо ж твердість металу висока, то зразок вирізають карборундовими, алмазними або вулканітовими кругами [12].

Зведення до мінімуму деформації поверхні і нагрівання зразка на цій стадії підготовки досягається належним вибором інструменту і режиму обробки, а також інтенсивним охолодженням оброблюваної поверхні і інструменту [12].

Розміри зразка повинні дозволяти зручно і безпечно провести пробопідготовку, особливо якщо цей процес буде реалізований вручну, а не за допомогою спеціального обладнання. Зразки невеликих розмірів, «незручної», небезпечної для підготовки форми і конфігурації і особливо зразки після хіміко-термічної обробки напередодні підготовки мікрошліфа фіксують одним із двох способів: за допомогою струбцин або в епоксидних чи інших смолах (рис. 2.3).



а



б



в

Рисунок 2.3 – Фіксація зразків для проведення пробопідготовки для металографічного аналізу: а- струбцина, б- кільце металеве, в- зразок в епоксидній смолі

Після вирізання зразки піддають шліфуванню. Шліфування реалізують вручну або на верстаті з горизонтально розташованим обертальним колом, на якому закріплюють круг з шліфувальним папером (рис. 2.4) [12].



Рисунок 2.4 – Шліфувально-полірувальний верстат МР-2В [12]

Після послідовного багатоетапного шліфування проводять полірування. Цей етап також можна реалізовувати вручну за допомогою алмазних паст і аркушу ватману або на полірувальних станках. Як абразив використовують розчин дистильованої води та оксиду хрому. Зеленовата однорідна рідина, нанесення на фетр буди виступати в якості матеріалу для полірування. Наступним етапом є травлення в хімічноактивному середовищі-травнику «царська водка».

Дослідження мікроструктури проводили на металографічному мікроскопі МИМ-7 (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Металографічний мікроскоп МИМ-7 (фото)

Металографічний мікроскоп дозволяє спостерігати непрозорі об'єкти у відбитому світлі. У цьому вся основна відмінність від біологічної мікроскопії.

2.4 ДюрOMETричний аналіз

Вимір мікротвердості здійснювали від краю поверхні покриття до основи за ДСТУ ISO 6507-1:2007 [13]. При дослідженні мікротвердості матеріалу проникненням застосовували гирі вагою 50 і 100 г. При виборі навантаження виходили з прогнозованих розмірів ромба-відбитка. Визначення мікротвердості захисних покриттів здійснювали на приладі ПМТ-3 (рис.2.6) не менш, ніж в 10 - 15 полях зору. В якості індентора використовували алмазну чотирьох-гранну піраміду.



Рисунок 2.6 – Мікротвердомір ПМТ-3 (фото)

На основі отриманих даних визначали середнє значення мікротвердості (формула 2.1, 2.2, 2.3). Відповідно до роботи [14]:

$$H_{\mu}^i = \frac{1,854 \cdot P}{d^2} \text{ (кГс/мм}^2\text{)} \quad (2.1)$$

де P - навантаження в грамах;

d - діагональ відбитку в мікрометрах.

Тоді:

$$H_{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} H_{\mu}^i \text{ (кГс/мм}^2\text{)} \quad (2.2)$$

Середня похибка вимірювання мікротвердості знаходилась за формулою 2.3 [14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} H_{\mu}^{Cp} - H_{\mu}^i} \quad (2.3)$$

де n - кількість вимірювань;

H_{μ}^i - результати окремих вимірювань;

H_{μ}^{Cp} - середнє значення всіх вимірювань, яке визначалось за формулою 2.2.

За товщину хромосиліційованого покриття приймали товщину білого непротравлено шару. Товщину перехідної зони оцінювали як товщину зони, мікротвердість якої відрізняється від мікротвердості основної структури оброблювального сплаву.

2.5 Визначення мікропористості

Капілярну (наскрізну) мікропористість хромосиліційованого покриття визначали за методикою, яка полягає в наступному: знежирені в етиловому спирті зразки притискали до фільтровального паперу, попередньо змоченого в спеціальному реактиві. Під час експерименту використовували спеціально підготовлений реактив (табл. 2.4).

Зазначений вище реактив наливали на поверхню зразків і витримували впродовж 10 хвилин.

Таблиця 2.4

Вміст реактиву для випробування на капілярну пористість		
№ п/п	Компонентний склад реактиву	Вміст компоненту, мг/л
1	хлористий натрій	60
2	червона кров'яна сіль	10
3	хлористий літій	60
4	дистильована вода	1,0 л

Мікропористість оцінювали за кількістю відбитків пор на 1,0 см² поверхні покриттів. Макроаналіз поверхні зразків дозволяє визначити наявність капілярних пор і їх розташування на поверхні зразків сталі 20Х13Л після хромосиліціювання.

2.6 Визначення жаростійкості

В даній роботі випробування на жаростійкість проводились у відповідності до ГОСТ 6130 – 71 [15] ваговим методом по збільшенню маси зразків. Напередодні цього дослідження було проведено необхідну підготовку зразків сталі 20Х13Л без хіміко-термічної обробки і після хромосиліціювання. Зразки були ретельно знежирені та зважені аналітичних вагах Radwag ХА 220.4 У (рис.2.7) [16].

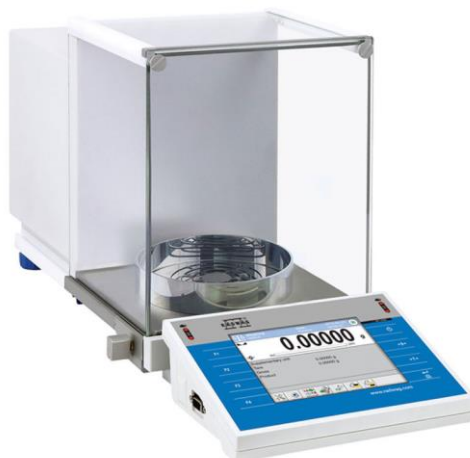


Рисунок 2.7 – Аналітичні ваги Radwag XA 220.4 Y [16]

Основною вимогою коректності проведення випробування є те, що середовище у печі для випробування за хімічним складом повинне відповідати (бути наближеним) до середовища, в якому буде працювати випробовуваний матеріал. При визначенні жаростійкості ваговим методом по збільшенню маси зразка слід застосовувати спеціальні керамічні тиглі, що будуть завантажені до печі і не перешкоджають проникненню газового середовища і забезпечують збереження обсіпання окислів [15]. Перед випробуванням тиглі повинні бути прогартовані до постійної маси. Після зважування зразків можна бачити різницю по збільшенню маси зразків без обробки і зразків після проведення хромосиліціювання.

Всі зразки 20X13Л були піддані попередній підготовці. Для визначення жаростійкості ваговим методом був проведений підрахунок поверхні зразків за сумарною площею, вимір зразка при визначенні площі поверхні вироблено з точністю $\pm 0,1$ мм.

Визначення площі поверхні, яка окислюється реалізуємо за формулою 2.4.

$$S_{\text{заг}} = 2S_{\text{основи}} + S_{\text{бічна поверхня}} = 2\pi R^2 + 2\pi RH$$

де:

$S_{\text{заг}}$ – загальна площа циліндричного зразка

$S_{\text{осн}}$ – площа основи зразка, круг

$S_{\text{бічна поверхні}}$ – площа бічної поверхні циліндричного зразка

Таким чином загальна площа зразка без обробки становить:

$$S_{\text{осн}} = 226,08 + 753,6 = 979,68 \text{ мм}^2 = 0,00097968 \text{ м}^2$$

Загальна площа зразка після хромосиліціювання становить:

$$S_{\text{осн}} = 189,97 + 621,72 = 811,69 \text{ мм}^2 = 0,00081169 \text{ м}^2$$

Перед випробуванням зразки були знежирені етиловим спиртом і просушені, після чого було проведено їх зважування з точністю понад $\pm 0,1$ мг. Результати зважування зразків відображені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Протокол зважування зразків до випробування на жаростійкість

Протокол зважування зразків					
Номер зразка	Температура випробувань, °С	Вага зразка без обробки/після ХТО, г	Розміри зразка		
			Діаметр D, мм	Діаметр D, мм	Загальна площа поверхні зразка, м ²
1*	800	19,56455	12,0	20,0	0,00097968
1		20,06040	11,0	18,0	0,00081169
2*	900	19,56455	12,0	20,0	0,00097968
2		20,06040	11,0	18,0	0,00081169
3*	1000	19,56455	12,0	20,0	0,00097968
3		20,06040	11,0	18,0	0,00081169

* зразки сталі 20Х13Л після хромосиліціювання за режимом №2

Шість зразків, три із яких піддавали ХТО, після попередньої підготовки завантажують в піч. Допускається завантаження зразків в холодну піч. Початком випробування вважають момент досягнення в робочій зоні печі заданої температури (таблиця 2.3). Кінцем випробування вважають момент вимкнення печі або вивантаження зразків після закінчення часу випробування. При

випробуваннях тривалістю не більше 100 год. зразки завантажують в піч, що має задану температуру. Кінцем випробування вважається момент вивантаження зразків з гарячої печі [15].

Випробування на жаростійкість проводяться з періодичним охолодженням зразків разом з піччю або на спокійному повітрі. Цикли охолодження вибираються в залежності від призначення досліджуваного металу.

Температуру випробувань встановлюють залежно від умов експлуатації досліджуваного матеріалу. Аналіз літературних джерел дає інформацію про те, що саме хромосиліціювання дозволяє підвищувати стійкість до окислення за високих температур. В нашому випадку ми застосовуємо три різні температури: 800, 900, 1000 °С. Час випробування приймаємо 100 годин.

Визначення збільшення маси зразка визначають за різницею результатів зважування зразків у тиглях до випробування і після охолодження. Для визначення коефіцієнта С випробовують не менше трьох зразків. При цьому в процесі випробування фіксують збільшення маси зразка, а зменшення його маси визначають відповідно до вимог [15].

Висновки

Проаналізовані основні переваги і недоліки сталей 20Х13Л, 12Х18Н9ТЛ, 12Х18Н12М3ТЛ, як матеріалів для виготовлення робочих коліс. Було рекомендовано використання корозійностійкої сталі 20Х13Л.

Запропонована сучасний метод підвищення поверхневої твердості та жаростійкості сталі 20Х13Л – хромосиліціювання. На основі літературного аналізу визначено оптимальний склад карбюризатора для реалізації технології хіміко-термічної обробки сталі 20Х13Л хромосиліціювання: кремній кристалічний 2-5%, хром порошок 50-54 %, оксид алюмінію 42 %, хлористий амоній 2 %.

Проаналізовані два режими одночасного насичення хромом і кремнієм: режим 1 - температура 900 °С, час ізотермічної витримки 4 годин; режим 2 - температура 1000 °С, час ізотермічної витримки 6 годин.

На першому етапі проведено металографічний аналіз структури сталі 20Х13Л після хромосиліціювання. При цьому буде використаний мікроскоп МИМ-7. На другому етапі планується визначити показники мікротвердості та товщини захисного покриття після хіміко-термічної обробки на мікротвердомірі ПМТ-3. На третьому етапі проводимо аналіз пористості отриманого покриття.

Заключним етапом даної роботи буде визначення жаростійкості сталі 20Х13Л після хромосиліціювання при температурах 800, 900, 1000 °С ваговим методом по збільшенню маси зразків на аналітичних вагах Radwag ХА 220.4 У.

Комплексний аналіз властивостей і характеристик сталі 20Х13Л після хромосиліціювання дозволить рекомендувати даний тип хіміко-термічної обробки для певних умов використання.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Результати металографічного та дюрOMETричного аналізів

Реалізація експерименту (хіміко-темічна обробка, хромосиліціювання, одночасне дифузійне твердофазне насичення хромом і кремнієм) проводилась на спеціально вирізаних і підготовлених зразках сталі 20X13Л. Поверхня зразків повинна бути ретельно очищена від бруду, іржі на заточному верстаті і відшліфовані на шліфувальному, промита проточною водою і знежирена розчинником, для видалення жирової плівки. Забрудненість зразків різноманітних домішками не дозволяє отримати рівномірно розподілене покриття. Наявність на поверхні виробів корозійних піттингів, окалини, жирових плям викликає утворення покриття різної товщини крім того може призвести до зменшення адгезії з основою. Формування покриття однакової товщини залежить в основному від ступеня рівномірності доступу насичуючого середовища до поверхні, що в свою чергу залежить від методу насичення.

Після проведення процесу хромосиліціювання за двома режимами (нагрів, ізотермічна витримка, охолодження з піччю) зразки сталі 20X13Л вилучають із контейнерів, промивають водою та очищення від карбюратора.

Під час первинного зовнішнього огляду зразків після ХТО встановлено, що поверхня має сріблястий колір без видимих дефектів. Наступний аналіз підготовлених мікрошліфів дозволить більш ретельно вивчити дифузійні покриття на зразках, а саме визначити мікротвердість і товщину останніх.

При дослідженні мікрошліфа отриманого за першим режимом ($T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4\text{ г}$) проаналізувавши фотографію мікроструктури (рис. 3.1) і мікротвердість покриття (таблиця 3.1) сталі 20X13Л після хромосиліціювання, можна зробити висновок про неповноту проходження дифузійних процесів насичення, про що свідчить нерівномірне і дуже тонке покриття, величина якого коливається 25-40

мкм, так і мікротвердість по глибині відносно низька і знаходиться в межах 0,7-10,2 ГПа, такий шар не зможе довго захищати поверхню деталі від агресивних середовищ, а отже може привести до руйнування.

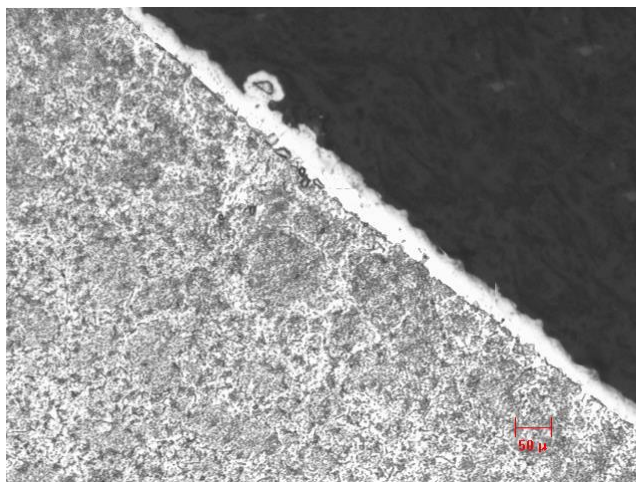


Рисунок 3.1 – Мікроструктура сталі 20X13Л після хромосиліціювання за режимом №1 ($T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=4\text{ г}$)

Таблиця 3.1

Результати вимірювання мікротвердості дифузійного покриття на сталі 20X13Л після хромосиліціювання за режимом №1 ($T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=4\text{ г}$)

№ відбитка	Відстань від поверхні, мкм	Мікротвердість, ГПа
1	20	10,18
2	25	9,32
3	35	7,34
4	40	3,66
5	45	4,88
6	50	1,83
7	55	3,39
8	65	2,72
9	75	2,43

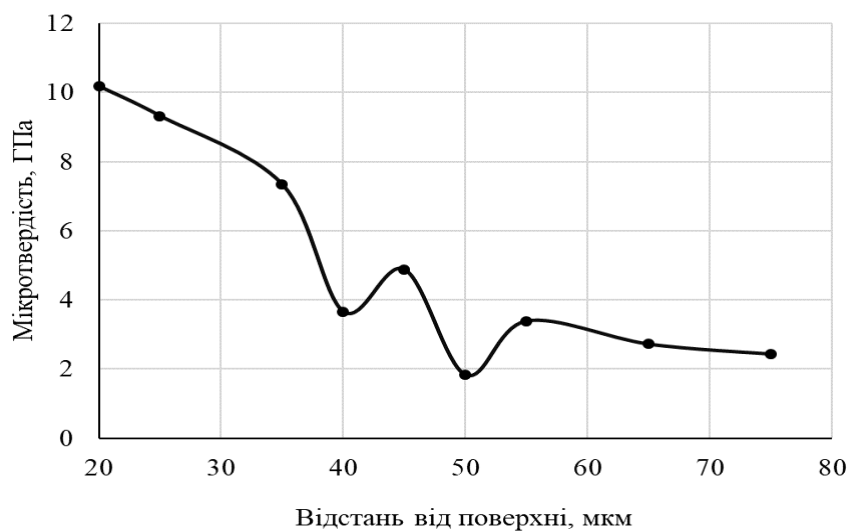


Рисунок 3.2 – Розподіл мікротвердості сталі 20Х13Л після хромосиліціювання, режим №1 ($T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=4\text{ г}$)

Мікроструктурний аналіз зразків сталі 20Х13Л після хромосиліціювання за режимом №2 ($T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=6\text{ г}$) дає можливість зробити висновок про отримання більш рівномірного, суцільного за структурою покриття товщиною 60-110 мкм (рис. 2.6), твердість даного покриття знаходиться в межах 15,9-10,64 ГПа (таблиця 2.2).

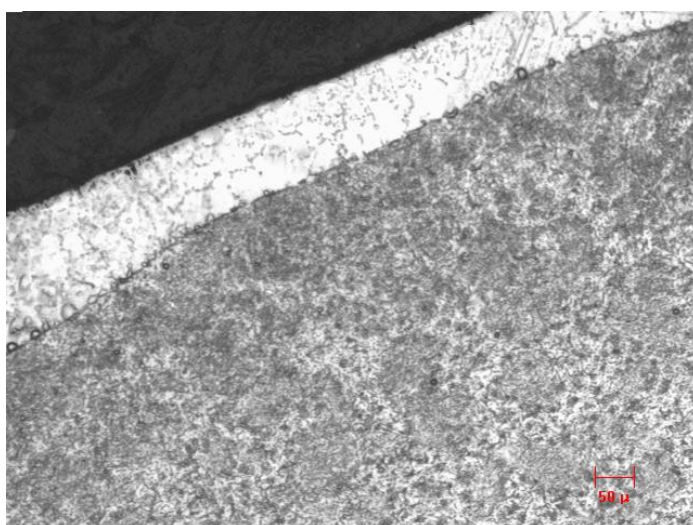


Рисунок 3.3 – Мікроструктура сталі 20Х13Л після хромосиліціювання, режим №2 ($T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=6\text{ г}$)

Результати вимірювання мікротвердості дифузійного покриття на сталі 20Х13Л після хромосиліціювання, режим №2 ($T= 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau= 6\text{ г}$)

№ відбитка	Відстань від поверхні, мкм	Мікротвердість, ГПа
1	20	15,90
2	30	12,26
3	40	9,74
4	50	10,64
5	70	7,62
6	75	9,32
7	80	8,84
8	90	6,57
9	100	7,07
10	120	3,48
11	140	2,24
12	160	2,15
13	180	2,60
14	200	2,49

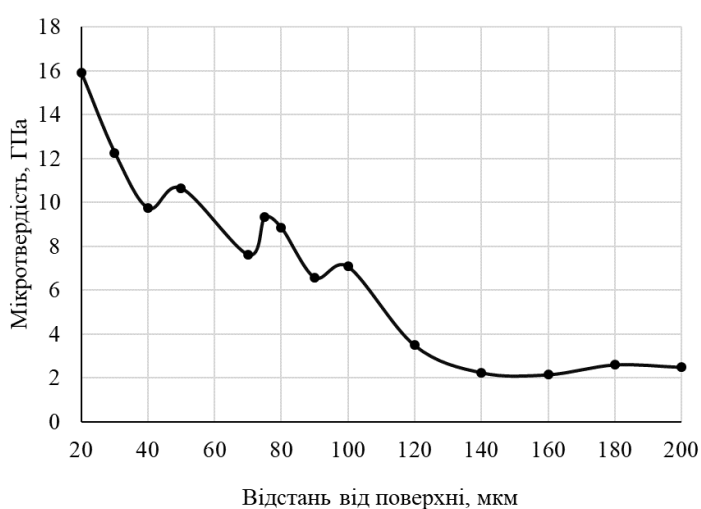


Рисунок 3.4 – Розподіл мікротвердості сталі 20Х13Л після хромосиліціювання, режим 2 ($T= 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau= 6\text{ г}$)

Як видно з отриманих даних температура та час ізотермічної витримки впливають на товщину дифузійного покриття. В той же час можна стверджувати, що ці показники впливають і на твердість покриття. Враховуючи, що захисне покриття представляє собою упорядкований твердий розчин $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{Si}$. Підвищення температури насичення на $100\text{ }^\circ\text{C}$ та збільшення тривалості ізотермічної витримки на 2 години призводить до збільшення розчинності хрому і кремнію в залізі, що в свою чергу призводить до підвищення мікротвердості і товщини покриття.

Вибір оптимального для даного випадку захисного покриття і його товщини можливо зробити лише з урахуванням всіх взаємопов'язаних обставин. При цьому відправними даними завжди є природа та спосіб формування матеріалу, а також особливості експлуатаційного середовища [17].

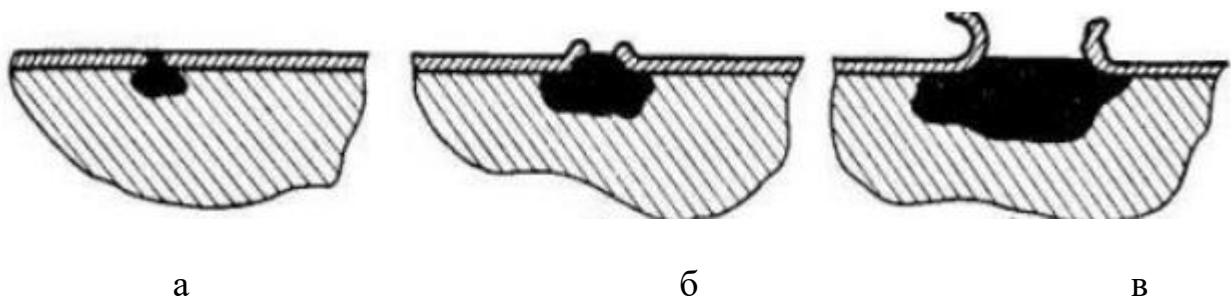


Рисунок 3.5 – Залежність захисних властивостей покриттів від ступеню його зчеплення з основою [17]

Неодмінною умовою для будь-якого обраного варіанту є надійне зчеплення покриття з основою та відсутність наскрізних пор в покриття. Корозійний процес, що зародився на ділянці наскрізної пори або подряпини, при ідеальному зчепленні міг би мати локальне значення (рис. 3.5, а). У випадку послабленого зчеплення продукти окислення сприяють відриву покривної плівки по периметру корозійного осередку, безперервно розширюючи фронт контакту основного металу з корозійною середою (рис. 3.5, в). Силу зчеплення, або адгезійний зв'язок покриття з поверхнею матеріалу, характеризують дві складові – специфічна і механічна. Перша є визначальною і залежить від сукупності фізико-хімічних властивостей основи і покриття. Інша складова менш ефективна і

проявляється при нанесенні покриттів на сильно розігріту (шерехату) поверхню. Недостатнє зчеплення покриття з основою при наявності в ньому сітки наскрізних пор створює умови для інтенсивного протікання процесу електрохімічної корозії, особливо в тих випадках, коли основний метал більше активний, ніж покриття. Зі зростанням товщини покриття кількість пор, що дістають до основного металу, зменшується, і при певній товщині покривні плівки стають практично безпористими. Існує думка [17], що для більшості покриттів збільшення товщини пов'язано із виникненням в них внутрішніх напруг, що негативно впливає на міцність зчеплення. Така залежність стає особливо відчутна в тих випадках, коли деталі під час зборки або експлуатації відчувають механічні та теплові навантаження. Тому товщина покриття не завжди може бути критерієм їх експлуатаційної надійності. В ряді випадків виникає необхідність використання двох та трьохшарових комбінованих покриттів [17].

Формування покриття починається з твердого розчину. Зі збільшенням часу витримки в дифузійному шарі з'являються включення надлишкової фази, які надалі можуть утворювати суцільний шар. Формування надлишкової фази полегшується зі збільшенням часу насичення [17].

На поверхні хромосиліцьованого покриття формується упорядкований твердий розчин Fe_3Si , легований хромом, з мікротвердості 7,1-8,5 ГПа, спостерігаються виділення фази Cr_3Si , що утворюються в процесі повільного охолодження температури процесу. За цим шаром розташовується зона твердого розчину хрому і кремнію в α -залізі з мікротвердістю 2,7-3,5 ГПа.

Також на поверхні формується твердий розчин хрому і кремнію в α -залізі з виділеннями в середній частині шару карбідів Cr_3C_2 , $(Cr, Fe)_{23}(C, Si)_6$ і $(Cr, Fe)_7C_3$ (з мікротвердістю 13,0-14,4, 16,50 і 12,25 ГПа відповідно). Концентрація хрому на поверхні досягає 62,4 %, а кремнію - 4,0 %. Основу становить перлітна структура твердістю 1,9-2,9 ГПа. За перлітною зоною знаходиться щевуглецьована зона, що примикає безпосередньо до серцевини.

Отримані сполуки в шарі дуже складні і важкі в отриманні згідно з

діаграмами стану (рис. 3.6, рис. 3.7, рис. 3.8), це в свою чергу свідчить про дуже складні хімічні процеси, що проходять при хромосиліціюванні.

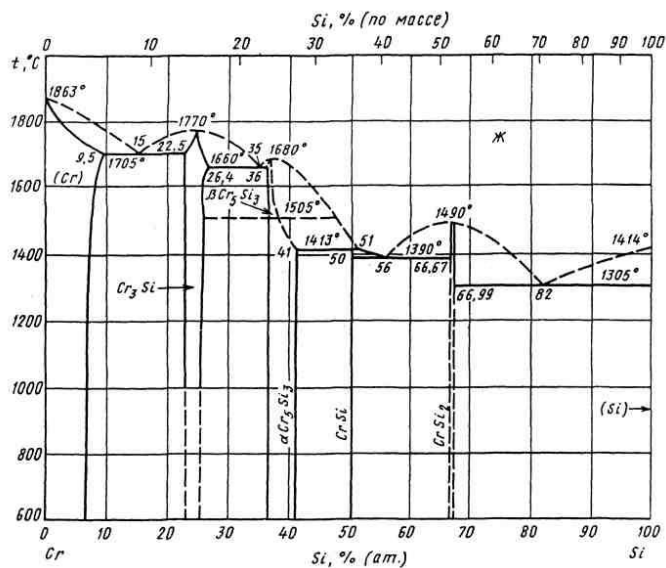


Рисунок 3.6 – Діаграма стану хром-кремній [18]

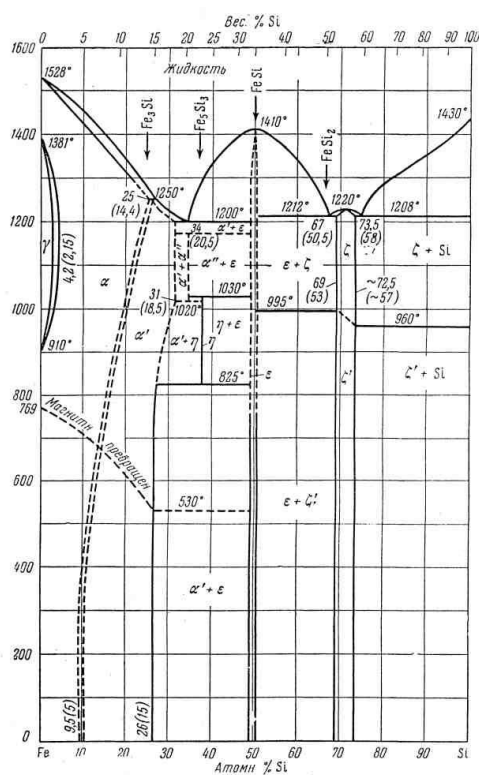


Рисунок 3.7– Діаграма стану залізо-кремній [18]

Відомо, що літературні відомості про пористість покриттів на основі карбідоутворюючих елементів вельми нечисленні [19]. Відзначено, що в порядку зменшення пористості карбідні покриття нанесені на поверхню вуглецевих сталей, можна розташувати в ряд: NbC→VC→TiC→ZrC→Cr₇C₃ [20].

Враховуючи аналіз проведених розрахунків [21] який показав, що, чим більше зміцнене покриття і вище його схильність до крихкого руйнування, тим більше небезпечним для нього стають утворені пори. Автори роботи [21] зазначають, що пори мають дифузійне походження. При протіканні дифузійних процесів в поверхневій зоні оброблюваного матеріалу формуються дефекти кристалічної решітки, до числа яких слід віднести вакансії. Перерозподіл концентрації надлишкових вакансій і їх стік в певних точках поверхні, що насичується, зумовлює появу мікропор [21].

Покриття, яке ми отримали на сталі 20X13Л після хромосиліціювання, характеризується високою щільністю та мікротвердістю. Хром основи сталі 20X13Л частково розчиняється в покритті. Існують дослідження, які стверджують, що чим вища ступінь легування основи, тим помітніше виявляється схильність до зниження мікропористості [19].

Встановлено, що більшою мікропористістю характеризуються покриття після хромосиліціювання за режимом №1 (табл. 3.4). За ним в ряді по зменшенню пористості можна розташувати покриття за режимом №2.

Таблиця 3.4

Мікропористість покриттів на сталі 20X13Л після хромосиліціювання

№ режиму хромосиліціювання	Параметри хромосиліціювання	Пористість, см ⁻²
1	Температура 900 °С Час ізотермічної витримки 4 г	0,008
2	Температура 1000 °С Час ізотермічної витримки 6 г	0,003

Пористість сталі 20Х13Л після комплексного насичення значно менша ніж після однокомпонентного насичення [22], що можна пояснити меншою розчинністю заліза та інших компонентів основи в покритті. Порівняння значень пористості сталі 20Х13Л після різних режимів хромосиліціювання говорить про те, що в результаті насичення за режимом №2 ми отримуємо покриття, яке в 2,5-2,7 разів щільніше ніж за режимом №1. Тобто підвищення температури насичення і збільшення тривалості процесу призводить до утворення більш суцільного, безпористого покриття та до зменшення пористості захисного покриття в 2,5-2,7 рази.

Причиною зниження мікропористості покриттів з підвищенням температури і часу ізотермічної витримки за різних режимах хромосиліціювання можна пояснити прискоренням дифузійних процесів, що в свою чергу призводить до заліковування дефектів, легуванням покриттів хромом.

Хотілось би зазначити позитивний внесок від відсутності пор в захисному покритті, що в значній мірі буде визначати їх експлуатаційні властивості.

3.3 Результати випробувань на жаростійкість

Наступним етапом комплексного аналізу властивостей і характеристик сталі 20Х13Л після хромосиліціювання є визначення жаростійкості.

Вивчення впливу легуючих елементів на опір газової корозії дозволило встановити, що жаростійкість сталей можна підвищити легуванням їх хромом, алюмінієм і кремнієм. При цьому встановлено, що чим більший вміст цих елементів у сталі, тим вищий їх опір окисленню. Вплив цих хімічних елементів на жаростійкість сталі 20Х13Л визначено в даній роботі під час експерименту. Хром і кремній виступають в якості основних хімічних елементів захисного покриття, нанесеного на дану сталь під час хромосиліціювання.

По закінченні випробувань на стійкість до високотемпературного окислення тиглі зі зразками сталі 20Х13Л (рис.3.6) вилучають із печі, зважують на аналітичних вагах. Зважування треба проводити таким чином, щоб зберегти

продукти окислення, що утворилася під час випробування і зберігаються поруч із зразками в тиглях. Результати експерименту зазначені в таблиці 3.9 і рисунку 3.9.

Результати випробувань наведені в таблиці 3.10

Таблиця 3.10

Результати випробувань

Температура випробувань, °С	Номер зразка	Вага до проведення випробувань, г	Вага після проведення випробувань, г	Збільшення маси зразка, г	Розміри зразка		Загальна площа поверхні зразка, м ²	Збільшення маси зразка, г/м ²	Збільшення стійкості в раз
					Діаметр D, мм	Висота H, мм			
800	1*	20,06040	20,08500	0,02460	12,0	20,0	0,00097968	25,11	1,6
	1	19,56455	19,59770	0,03315	11,0	18,0	0,00081169		
900	2*	20,06040	20,07555	0,01515	12,0	20,0	0,00097968	15,46	2,9
	2	19,56455	19,60090	0,03635	11,0	18,0	0,00081169		
1000	3*	20,06040	20,11370	0,05330	12,0	20,0	0,00097968	54,40	2,5
	3	19,56455	19,67700	0,11245	11,0	18,0	0,00081169		

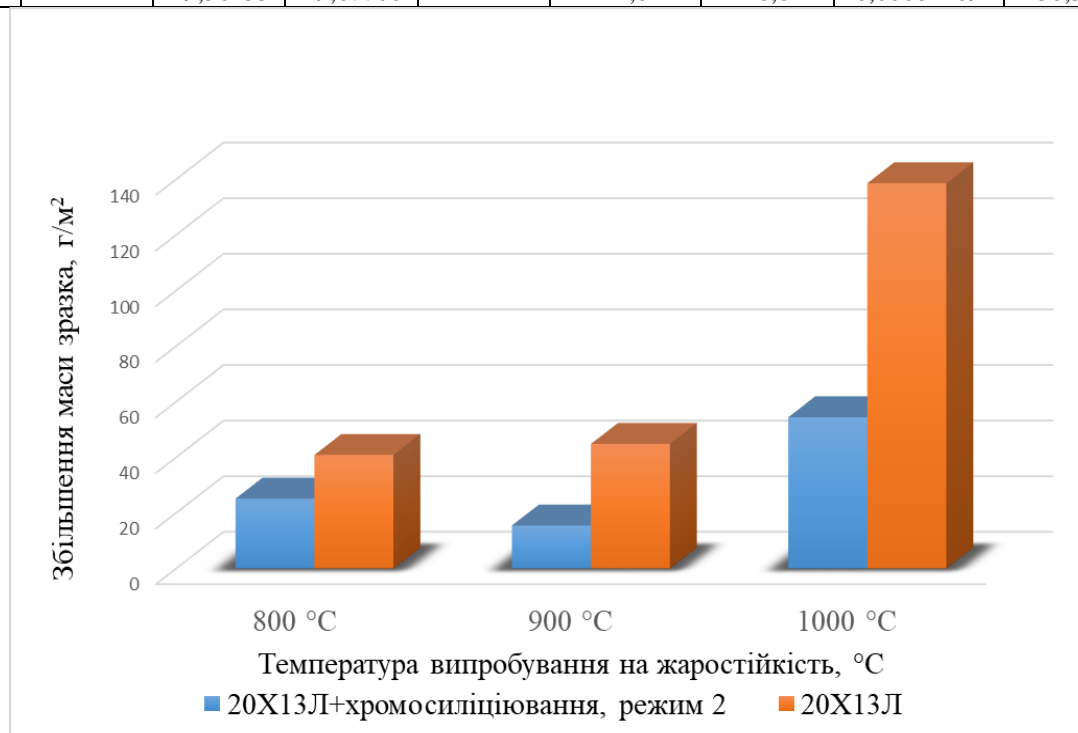


Рисунок 3.9 – Графік зміни маси зразків сталі 20X13Л без обробки і з захисним покриттям після випробування на жаростійкість

Хромосиліціювання сталі 20X13Л за режимом №2 (температура 1000 °С, час 6 годин) підвищує жаростійкість матеріала основи в 1,6-2,9 разів.

Максимальна жаростійкість сталі 20Х13Л після ХТО характерна для температури 900 °С. Підвищення температури випробувань до 1000 °С призводить до відносного зменшення стійкості проти окислення.

Висока жаростійкість сталі 20Х13Л після хромосиліціювання обумовлена формуванням на поверхні щільної плівки оксидів: $(Cr, Fe)_2O_3$ або $FeO \cdot Cr_2O_3$ і SiO_2 , що мають особливо високі захисні властивості.

Висновки

В результаті комплексного дослідження сталі 20Х13Л після дифузійного контактного порошкового хромосиліціювання можна зробити наступні висновки:

Одночасне насичення сталі 20Х13Л хромом і кремнієм призводить до формування одношарового захисного покриття, що складається із карбідів $(Cr, Fe)_{23}C_6$ і $(Cr, Fe)_7C_3$ легованих кремнієм. Захисне покриття щільно примикає до основи, сталі 20Х13Л.

Максимальне за товщиною захисне покриття сформувалось за режимом №2 і становить 60-110 мкм, мікротвердістю 15,9 ГПа. В результаті хромосиліціювання за режимом №1 товщина захисного покриття значно менше і дорівнює 25-40 мкм. Відмічається відносно низька поверхнева твердість даного покриття, яка становить 10,2 ГПа.

В результаті хромосиліціювання утворюється майже безпористе суцільне захисне покриття. Максимальна мікропористість становить 0,008 см² і характерна для сталі 20Х13Л після хромосиліціювання за режимом №1. Хіміко-термічна обробка сталі 20Х13Л за режимом №2 призводить до формування безпористого покриття, пористість становить 0,003 см².

Хромосиліціювання сталі 20Х13Л за режимом №2 (температура 1000 °С, час 6 годин) підвищує жаростійкість матеріала основи в 1,6-2,9 разів.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Теоретична частина

Економічність процесів термічної обробки в даний час приділяється велика увага. Однак у центрі уваги є проблема стійкості деталей в експлуатації; тому в ряді випадків допустиме збільшення вартості термічної обробки, якщо це забезпечує надійність і довговічність роботи деталей. Економічна ефективність процесів хіміко-термічної обробки залежить від собівартості застосовуваного палива, від собівартості компонентів порошкової суміші.

З метою визначення економічної ефективності застосування процесу хромосиліціювання в таблиці 4.1 дано склад і вартість порошкової суміші.

Таблиця 4.1

Вартість карбюризаторів, що використовуються

Процес	Склад карбюризатора, %				Вартість 100 кг./ грн.
	Cr	Si	Al ₂ O ₃	NH ₄ Cl	
Хромосиліціювання	50-54	2-5	40	2	2060

4.2 Розрахункова частина

Вихідні дані розрахунку наступні: деталь – робоче колесо відцентрового компресора. Розміри Ø616×120мм. Річний обсяг випуску – 5000 штук.

У першому випадку колесо було виготовлене із високолегованої аустенітної сталі 12X18H9ТЛ. Для деталі проводилася стандартна термічна обробка: гартування і подальший відпуск. У другому випадку сталь 12X18H9ТЛ замінена менш дорогим матеріалом – сталлю 20X13Л. Для робочого колеса

проводиться зміцнююча термічна обробка – хромосиліціювання. Термін служби виробів після хромосиліціювання у порівнянні з виробами, які не піддавалися цьому виду хіміко-термічної обробки, збільшується в 4-5 разів.

Розрахунок ведеться для печі СШЗ-10.15/12, потужність якої печі 156 кВт. Коефіцієнт використання потужності печі приймаємо 0,6. Вартість 1кВт-година 5 грн.

Тара для хіміко-термічної обробки виготовлена із жаростійкої сталі 15Х25Т, вартість якої 150 грн/кг. У контейнер одночасно завантажують 4 деталі. Розмір контейнера $\varnothing 730 \times 1250$ мм. Товщина стін 10-15мм. Маса 150 кг.

У таблиці 4.2 наведено розрахунки собівартості процесу хіміко-термічної обробки – хромосиліціювання

Таблиця 4.2

Розрахунок собівартості процесу хромосиліціювання сталі 20Х13Л

1.Вартість контейнера для порошкової суміші Вартість: $150 \cdot 150 = 22\ 500$ грн.
2. Вартість електроенергії Витрати електроенергії для прогартовування порошковою суміші при тривалості процесу 4 години складає $156 \cdot 4 \cdot 0,6 = 374,4$ кВт/год. Вартість $374,4 \cdot 5 = 1\ 872$ грн. Витрати електроенергії для хромосиліціювання при тривалості процесу 10 годин складає $156 \cdot 10 \cdot 0,6 = 936$ кВт/час. Вартість $936 \cdot 5 = 4680$ грн. Загальна вартість електроенергії: $1\ 872 + 4680 = 6\ 552$ грн.
3.Заробітна плата Один робочий 4-го разряда обслуговує дві печі. Тарифная ставка одного часа рабочего 30 грн. Прогартовування суміші: $30 \cdot 4 / 2 = 60$ грн. Хромосиліціювання: $30 \cdot 10 / 2 = 150$ грн. Заробітна плата: $60 + 150 = 210$ грн.
4.Вартість карбюризатора

Необхідна кількість суміші для хромосиліціювання 4 деталей – 940 кг Загальна вартість карбюратора: $943 \cdot 20,60 = 19\,425,8$ грн.
Сумарна вартість процесу хромосиліціювання: $22\,500 + 6\,552 + 210 + 19\,425,8 = 48\,687,8$ грн.

Для визначення повного економічного ефекту від застосування хромосиліціювання необхідно порівняти вартість обробки деталей із застосуванням даного процесу і без нього, при цьому обов'язково врахувати економічний ефект від збільшення терміну служби деталей внаслідок підвищення експлуатаційних властивостей.

$$E = E_1 + E_2, \quad (4.1)$$

де, E – повний економічний ефект, грн.;

E_1 -економічний ефект без урахування терміну служби деталей, грн.;

E_2 – економічний ефект від збільшення обліку терміну служби деталей, грн.

У таблиці 4.3 наведено вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 4.3

№ п/п	Показник	Позначення	Одиниці виміру	Базовий варіант	Новий варіант
1	Річна собівартість виготовлення продукції	C	млн.грн.	24	46,75
2	Термін служби робочого колеса	T	рік	0,45	2,03
3	Вартість обладнання, що застосовується	K	грн	880 000	1 380 000
4	Нормативний коефіцієнт	E_n	-	0,2	0,2

Визначення економічного ефекту (без урахування терміну служби деталей) провадиться за формулою

$$E_1 = (C_1 + E_n \cdot K_1) - (C_2 + E_n \cdot K_2), \quad (4.2)$$

де, C_1 - собівартість виготовлення річної продукції за основними елементами, що змінюються до проведення заходів, грн.;

C_2 – також після проведення заходів, грн. ;

K_1 -вартість обладнання, що застосовується до проведення заходів, грн. ;

K_2 - те саме після проведення заходів, грн. ; E_n - нормативний коефіцієнт економічної ефективності (для машинобудування $E_n = 0,2$).

$$E_1 = (24000000 + 0,2 \cdot 880000) - (46750000 + 0,2 \cdot 1380000) = -22850000 \text{грн.}$$

Розрахунок економічного ефекту від збільшення терміну служби деталей проводиться за формулою:

$$E_2 = C_2 - C_K, \quad (4.3)$$

де C_2 - заводська собівартість річного випуску продукції після впровадження нової технології;

C_K - скоригована собівартість обробки річного випуску

$$C_K = \frac{C_2 - T_{СК}}{T_{НК}}, \quad (4.4)$$

де, $T_{СК}$ - термін служби продукції колишньої якості, рік;

$T_{НК}$ - термін служби продукції підвищеної якості

$$E_2 = C_2 - \frac{C_2 - T_{СК}}{T_{НК}}, \quad (4.5)$$

$$E_2 = 46750000 - \frac{46750000 - 0,45}{2,03} = 23720443 \text{грн.}$$

Таким чином, у відповідності до формулу (4.1), повний економічний ефект

від застосування процесу хромосиліціювання складе:

$$E = -22850000 + 23720443 = 870\,443 \text{ грн}$$

Висновки

Вважається, що будь-який технологічний процес повинен бути економічно вигідним. Історія знає випадки, коли сучасна технологія в початковий період часу була економічно невигідною. З часом це питання вирішується вдосконаленням даного процесу. Тому наукова робота не завжди буде економічно обґрунтованою.

В даній роботі проведені розрахунки економічних витрат на впровадження нової технології обробки деталі «колесо робоче».

Економічна ефективність запропонованого методу хіміко-термічної обробки включає декілька етапів: розрахунок витрат на впровадження хромосиліціювання і порівняння різниці витрат між запропонованим і існуючим методами обробки деталі «колесо робоче». При цьому враховувалися всі види витрат, які існують при реалізації технології.

Економічний ефект від впровадження технології хромосиліціювання деталі «колесо робоче» із сталі 20Х13Л становить 870 443 грн.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1. Загальна характеристика термічної дільниці

У термічних цехах (відділеннях, дільницях) виробничі процеси характеризуються тепловим випромінюванням, пило- та газовиділенням, шумом, вібрацією.

Тепловиділення відбуваються при роботі печей та інших нагрівальних агрегатів. Виділення тепла в атмосферу цеху відбувається при конвекції та променевипусканні (радіації). Від нагрітих стінок і склепіння, а також від деталей, що мають температуру нижче 600 °С, тепло поширюється конвекцією. Через відкриті завантажувально-розвантажувальні вікна нагрітих печей, від деталей, вивантажених з печей з температурою понад 700 °С, тепло поширюється в цех променевипусканням. Відповідно до [23] інтенсивність опромінення на робочих місцях не має перевищувати 0,35 кДж/м²с. Нагрівання атмосфери цеху променевипусканням може також відбуватися внаслідок несправності печей, через щілини, а також при різних порушеннях правил експлуатації обладнання. Нагрів атмосфери цеху внаслідок передачі тепла від стін печі конвекцією повністю усунути неможливо, але його необхідно звести до необхідного мінімуму.

Запилення атмосфери цеху частинками твердих матеріалів, присутніх в атмосфері у вигляді аерозолів, відбувається різними шляхами: внесенням частинок пилу разом з повітрям, що надходить в цех завдяки аерації, застосуванням в цеху сипких і легко подрібнюються матеріалів, як наприклад вогнетривки, теплоізоляційні матеріали. Забруднення на поверхні деталей, що надходять в цех на обробку, застосуванням різноманітних технологічних матеріалів, таких як карбюризатор, солі, пісок.

Газовиділення в атмосферу термічного цеху можуть викликатися вибиванням продуктів горіння палива через відкриті вікна, щілини і нещільності

печі, витіканням газів з печей із захисною атмосферою, випаровуванням масла і виділенням продуктів його згоряння з гартівних масляних баків, виділенням газів, що утворюються при згорянні різних забруднень, що неминуче є на поверхні виробів, що нагріваються, наприклад при відпуску.

У термічних цехах робота різних установок супроводжується появою шуму, вібрацій. У виробничих умовах шуми сприймаються людським вухом через повітряне середовище у вигляді звуків різної сили і тону (висоти).

5.2 Аналіз потенційних небезпек на виробництві

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори класифікуються відповідно до НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів [24].

До небезпечних належать фактори, які призводять до травми або раптового різкого погіршення здоров'я працюючого. Серед них є незахищені рухливі елементи виробничого обладнання; заготовки, готові вироби чи деталі, що пересуваються; транспортні засоби, що рухаються; підвищена температура поверхонь обладнання та матеріалів; небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, замикання якої може статися через тіло людини; пожежно- та вибухонебезпечність; гострі кромки, задирки та шорсткість на поверхні заготовок, інструментів та обладнання.

5.3 Аналіз потенційних шкідливостей на виробництві

Шкідливі виробничі чинники призводять до захворювання чи зниження працездатності працюючого. Серед них: підвищена температура повітря робочої зони, підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони, підвищені або знижені вологість та рухливість повітря, шуму або вібрації на робочому місці, недостатня освітленість робочого місця; хімічні фактори загальнотоксичного, дратівливого, канцерогенного впливу на організм робітника; фізичні та нервово-психологічні навантаження.

5.4 Заходи щодо забезпечення безпеки праці

Для захисту працівників від променевої енергії біля джерел теплового випромінювання повинні бути передбачені спеціальні пристрої та пристосування згідно з [25].

Для захисту працівників від шуму на устаткуванні повинна застосовуватися звукоізоляція елементів і вузлів за допомогою шумоізолюючих пристроїв (тулупів, екранів та ін.).

При використанні у роботі горючих, вибухонебезпечних та шкідливих речовин необхідно дотримуватися вимог [26], ГОСТ 12.1.010-76 «Система стандартів безпеки праці. Вибухобезпека. Загальні вимоги» (далі – ГОСТ 12.1.010-76).

Деталі, які підлягають термічній та хіміко-термічній обробці та оброблені, а також речовини та матеріали, що застосовуються в цих процесах, повинні зберігатися у відведених для них складських приміщеннях або на спеціальних майданчиках цеху відповідно до правил пожежної безпеки.

При експлуатації електropечей, ванн та електроустановок застосовують блокування безпеки, тобто пристрої, що не допускають небезпечних помилок у роботі (відкриття заслінок печей, вхід за огорожу, що закриває струмопровідні частини під напругою, і т.д.).

Одним із засобів попередження від випадкових дотиків до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, є плакати та написи.

При роботі з маслом особливо при підвищених температурах можливі спалахи і загоряння масла від внесення в гартівний бак великих мас нагрітих до високої температури виробів. При інтенсивному кипінні масло виплескується на підлогу і вогнище полум'я може поширитися на значну відстань. З метою обережності рекомендується не перегрівати загартоване масло до температури спалаху. У разі загоряння припинити гартування і накрити масляний бак щільною кришкою, що не пропускає повітря. Масляні гартівні ванни повинні бути

обладнані засобами пожежогасіння і спеціальними спускними кранами для відведення води, що потрапила в них, а також і аварійним пристроєм зливу масел. Максимальна температура нагрівання масла при гартуванні має перевищувати 80-85 °С.

Відповідно до СНиП 2.01.02-85 Протипожежні норми (І-1-91) вибухо- та пожежонебезпечні ділянки повинні відокремлюватися від інших ділянок стінами з матеріалів, що мають межу вогнестійкості не менше 0,75 години [26].

У вибухо- та пожежонебезпечних приміщеннях не слід застосовувати асфальтові підлоги, настили з гуми або лінолеуму.

Контроль пожежної безпеки необхідно здійснювати відповідно до ГОСТ 12.1.004-91 Пожежна безпека. Загальні вимоги.

5.5 Мікроклімат на проєктованій ділянці

Поряд з температурою всередині цеху і безпосередньо на робочих місцях на самопочуття і працездатність працюючих великий вплив надають вологість і швидкість руху повітря під дією природної та штучної вентиляції. Для новопроектованих промислових підприємств Санітарними нормами (СН 245-71) передбачені оптимальні та допустимі норми температури, вологості та швидкості руху повітря для виробничих приміщень з різним надлишком явного тепла, наведені рекомендовані швидкості руху повітря при повітряному душуванні робочої зони залежно від категорії роботи, інтенсивності теплового опромінення та температури повітря [24].

Системи опалення, вентиляції та кондиціонування під час проведення основних та ремонтно-допоміжних робіт повинні забезпечувати оптимальні або допустимі мікрокліматичні умови в робочій зоні відповідно до вимог Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень, затверджених постановою головного державного санітарного лікаря, а також зниження вмісту в повітрі шкідливих речовин до значень, що не перевищують гранично допустимої концентрації.

Природне та штучне освітлення у приміщеннях термічних цехів має відповідати вимогам ДБН В.2.5–28:2006 Інженерне обладнання будинків та споруд. Природне та штучне висвітлення, затвердженим наказом Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 15.05.2006 N 168 (далі - ДБН В.2.5-28-2006).

У термічних цехах для робочого освітлення, як правило, використовується система загального освітлення. Комбіноване освітлення потрібно лише на робочих місцях, де для якісного та безпечного виконання виробничих операцій необхідне додаткове освітлення [25].

Для освітлення робочих приміщень слід використовувати світильники з лампами люмінесцентними, а також з газорозрядними лампами інших типів. Лампи розжарювання можуть застосовуватися для освітлення проходів, місцевого освітлення робочих місць, а також для аварійного або евакуаційного освітлення.

Температура поверхонь обладнання та огорожувальних пристроїв не повинна перевищувати температуру, зазначену у технічному паспорті, СП 1042–73 та ДСТУ EN 563–2001.

Температура зовнішніх поверхонь органів управління, виконаних з металу, повинна відповідати вимогам ГОСТ 12.2.007.9-93 та ДСТУ EN 563-2001.

Механізми управління та обслуговування печей повинні розміщуватися в теплоізольованих кабінах з утворенням оптимальних умов мікроклімату (ДСН 3.3.6.042-99), обладнаних прозорими теплоізолюючими екранами (ДСН 3.3.1.038-99).

5.6 Екологізація виробництва

В термічних цехах виробничі процеси супроводжуються виділенням великої кількості теплоти, пилу, парів та газів та забрудненням стічних вод, зазначені виділення з точки зору охорони навколишнього середовища неприпустимі [27].

Стічні води забруднюються маслами, солями, лугами, миючими розчинами тощо. Виробничі та господарсько-побутові стокові води підлягають обов'язковому знешкодженню перед скиданням до централізованої або місцевої каналізації [27].

Не допускається поєднання різних потоків стічних вод, під час змішування яких можуть утворюватися і виділятися вибухонебезпечні гази або випадати в осад тверді речовини.

Велика кількість енергії розсіюється в навколишнє середовище від нагрівальних печей і заготовок, що охолоджуються. Нагрівання атмосфери цеху внаслідок передачі тепла від стінок печі конвекцією повністю усунути неможливо, але його необхідно звести до необхідного мінімуму. Втрати тепла через стіни та склепіння печі можна істотно знизити, застосовуючи теплоізоляційний матеріал [27].

Для зменшення та повної ліквідації забруднення повітряного басейну та стічних вод слід передбачати: заміну сухих способів очищення мокрими; заміну твердого та рідкого палива для печей газовим або електричним; застосування пальників, що забезпечують повне спалювання окису вуглецю; автоматичну сигналізацію про хід операцій, пов'язаних з можливістю виділення шкідливостей; герметизацію обладнання та апаратури; повне уловлювання та утилізацію шкідливостей (парів олії солей, лугів, частинок пилу і т. д.); очисні споруди з нейтралізації та повного очищення стічних вод [27].

Висновки

В ході виконання роботи були запропоновані правила поведінки та техніка безпеки для робітників які працюють в термічних цехах.

Розглянуті основні методи теплопередачі під час термічної обробки. Зазначені граничні температурні умови праці людини. Проаналізовані основні

шляхи забруднення атмосфери робочого місця терміста. Враховані шум і вібрація, як побічні негативні наслідки від використання термічної обробки.

Розглянуті основні засади реалізації безпечної праці в термічних цехах, в тому числі і при хіміко-термічній обробці.

Запропоновані основні заходи, щодо організації безпечних умов праці, такі як: шумоізоляційні, блокувальні пристрої, засобами пожежогасіння, відокремлення небезпечних ділянок стінами таке інше.

Створення штучного та природнього мікроклімату для людини, яка реалізує технологію термічної обробки.

Екологізація процесу і результатів технології термічної обробки полягає в запобіганні або мінімізуванні забруднення навколишнього середовища.

ВИСНОВКИ

В даній науковій роботі вирішене питання, щодо підвищення стійкості та довговічності робочих коліс відцентрового компресора, що працює з агресивними газами.

Критичний аналіз існуючих методів підвищення жаростійкості сталей дозволяє зробити висновок про перспективність дифузійного хромосиліціювання. Встановлено, що багатокомпонентне насичення має переваги в порівнянні з однокомпонентними.

Запропонований в даній роботі метод одноетапного насичення хромом і кремнієм реалізовували контактним способом в порошковій суміші складу: 2-5 % кремній кристалічний, 50-54 % хром порошковий, 4 % хлористий амоній, 20 % оксид алюмінію.

Визначення оптимального режиму хромосиліціювання (температура, час насичення) проводили порівнянням результатів властивостей і характеристик сталі 20X13Л після ХТО за двома режимами. Режим №1 проводили при температурі 900 °С, час ізотермічної витримки складав 4 години, режим №2 реалізовували при температурі 1000 °С впродовж 6 годин.

Одночасне насичення сталі 20X13Л хромом і кремнієм призводить до формування захисного одношарового покриття, що складається із карбідів $(Cr,Fe)_{23}C_6$ і $(Cr,Fe)_7C_3$, легованих кремнієм, яке примикає безпосередньо до основи.

Комплексним аналізом властивостей і характеристик сталі 20X13Л після хромосиліціювання встановлено, що захисне покриття, яке сформувалось за режимом №2 в 2,4- 2,75 разів більше ніж товщина покриття за режимом №1. Максимальна мікротвердість характерна для поверхні сталі 20X13Л після хромосиліціювання за режимом №2 і знаходиться в межах 15,9-10,64 ГПа.

В результаті хромосиліціювання утворюється майже безпористе суцільне

захисне покриття. Підвищення температури насичення і часу ізотермічної витримки призводить до зменшення пористості захисного покриття в 2,5 – 2,7 разів.

Хромосиліціювання сталі 20X13Л за режимом №2 (температура 1000 °С, час 6 годин) підвищує жаростійкість матеріала основи в 1,6-2,9 разів.

Розраховано економічну ефективність наукового дослідження. Встановлено, що загальна вартість витрат науково-дослідної роботи становить 13963,37 грн. (тринадцять тисяч дев'ятьсот шістьдесят три гривні тридцять сім копійок).

Передбачені заходи що до захисту працюючих від можливої дії небезпечних і шкідливих виробничих факторів, тому в розділі з охорони праці встановлені вимоги до виконання технологічних процесів, засобів захисту, матеріалів, технологічних приміщень та екології для попередження нещасних випадків та аварій.

Твердофазне контактне порошкове хромосиліціювання сталі 20X13Л при температурі 1000 °С і ізотермічної витримки 6 годин можна рекомендувати як перспективну технологію хіміко-термічної обробки, яка призводить до підвищення стійкості та довговічності робочих коліс відцентрового компресора, що працює з агресивними газами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів (модуль 1): методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / уклад.: В.О. Шаленко, А.А. Маслюк. – Київ: КНУБА, 2023. – 72 с.
2. Structure and Protective Properties of Complex Chromosilicide Diffusion Coatings on Steel 20 / I. Pohrebova et al. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2023. Vol. 15, no. 5. P. 05031–1–05031–5. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(5\).05031](https://doi.org/10.21272/jnep.15(5).05031) (date of access: 10.12.2023).
3. Погребова І. С., Янцевич К. В. Корозійна стійкість хромосиліцидних покриттів на сталі 45 у різних агресивних середовищах. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 2(85). С. 71–75. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.9> (дата звернення: 11.12.2023).
4. Сучасні технології розробки та отримання перспективних матеріалів і формоутворення виробів машинобудівної галузі [Текст]: звіт про НДР (остаточний) / кер. К. О. Дядюра. — Суми : СумДУ, 2019. — 76 с.
5. Іщук, Вадим Олегович. "Підвищення ефективності робочих органів плуга загального призначення."
6. Кондрашова, Світлана Георгіївна, and Светлана Георгиевна Кондрашова. Удосконалення процесів формування поверхневого корозійностійкого шару литих виробів. MS thesis. Національний університет «Запорізька політехніка», 2021.
7. Руденко Л. Ф. Леговані сталі та сплави: навч. посіб. / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 171 с.
8. Марочник стали и сплавов. URL: <http://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата звернення: 04.12.2023).

9. Гольдштейн, М.И. Специальные стали: 2-е изд. / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачёв, Ю.Г. Векслер. – М.: МИСиС, 1999. – 408 с.
10. westa.kiev.ua. URL: <http://surl.li/ohwgl> (date of access: 05.12.2023).
11. Пат. 145913 У Україна, МПК (2021.01) С23С 12/00. Спосіб дифузійного хромосиліціювання сталі 12Х18Н10Т / Н.А. Харченко, Л.Ф. Руденко, А.І. Дегула та ін. (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. - № u202005330; заявл. 17.08.2020; опубл. 06.01.2021, бюл. № 1.
12. Холявко В. В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів [текст]: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 156 с.
13. ДСТУ ISO 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT). Поправка № 1
14. Методичні вказівки щодо виконання лабораторної роботи з теми "Визначення твердості матеріалів" із дисципліни "Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів" [Електронний ресурс] : для студ. спец. 132 "Матеріалознавство" усіх форм навчання / А. І. Дегула, Т. П. Говорун, Н. А. Харченко. — Суми : СумДУ, 2022. — 23 с.
15. ГОСТ 6130-71 Металлы. Методы определения жаростойкости. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1990. – 12 с.
16. Аналітичні веси Radwag ХА 220.4 Y: продаж, ціна в компанії ukrvesi.com.ua. Компанія Ukrvesi - Ваги електронні з доставкою по Україні. URL: <https://ukrvesi.com.ua/ua/p470003039-analiticheskie-vesy-radwag.html> (дата звернення: 26.12.2023).
17. Науменко О.Г. Конспект лекцій з дисципліни «Покриття та їх властивості» для бакалаврів спеціальності 132 Матеріалознавство, Дніпро, НТУ «ДП», 2020. - 61 с.

18. Осинцев О. Діаграми стану подвійних і потрійних систем. Фазові рівноваги в сплавах. М : Машиностроение, 2014. 352 с.
19. Диффузионные карбидные покрытия / [Лоскутов В. Ф., Хижняк В. Г., Куницкий Ю. А., Киндрачук М. В.]. – Киев : Техника, 1991. – 168 с.
20. Лоскутов В. Ф., Бобіна М. М., Лоскутова Т. В. Мікропористість ніобійхромового карбідного покриття //PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE. – 2004. – Т. 5. – №. 1. – С. 201-203
21. Бондарук А. А. Мікропористість карбідних покриттів на основі TiC і VC / А. А. Бондарук, О. Т. Сердітов // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні». - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. - Режим доступу до ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/imm2019/paper/view/17530>
22. Pavlenko, I.; Zajac, J.; Kharchenko, N.; Duplák, J.; Ivanov, V.; Kostyk, K. Estimation of ear Resistance for Multilayer Coatings Obtained by Nitrogenchroming. Metals 2021, 11, 1153. <https://doi.org/10.3390/met11081153>
23. ОСТ 23.4.239-84 Система стандартів безпеки праці. Термічна обробка. Вимоги безпеки (НПАОП 28.51-7.23-84, НАОП 1.4.40-2.23-84) чинний від 01.01.1986. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 1986. 18 с.
24. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів (32418). ДНАОП - Нормативно-правовая библиотека инструкции документы. URL: https://dnaop.com/html/32418/doc-НПАОП_28.5-1.02-07 (дата звернення: 11.12.2023).
25. ДСП 3.3.1.038-99 Підприємства чорної металургії. Державні санітарні правила чинний від 01.12.1999. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 1999.
26. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення чинний від 2020–01–01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 84 с.

27. Екологізація виробництва та зелені технології: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. всіх спеціальностей всіх освітніх програм / Н. С. Ремез, А.О. Дичко, Т. В. Гребенюк, В. О. Броницький (1 файл: 6,13 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 209 с.