

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний, інженерно – фізичний факультет
(повне найменування інституту, факультету)

Фізичне матеріалознавство
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

Магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження можливостей удосконалення технологій цементації
низьколегованих конструкційних сталей

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи ІФ-212м

Спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

РЕПЕТУН А.В

(прізвище та ініціали)

Керівник ВІНІЧЕНКО В.С. к.т.н., доц.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Фізико-технічний, інженерно-фізичний факультет
Кафедра Фізичного матеріалознавства

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« _____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)
РЕПЕТУН Андрій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження можливостей удосконалення технологій цементації низьколегованих конструкційних сталей

керівник проєкту (роботи) ВІНІЧЕНКО Валерій Степанович доцент каф.ФМ, к.т.н
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «__» _____ року №__

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) технологія газової цементації, хімічний склад сплавів, зразки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Літературний огляд; 2. Матеріали та методика досліджень. 3. Експериментальна частина 4. Економічна частина 5. Охорона праці в та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація _____ :

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	<u>ВІНІЧЕНКО В.С.</u>		
2	<u>ВІНІЧЕНКО В.С.</u>		
3	<u>ВІНІЧЕНКО В.С.</u>		
4	КРУГЛІКОВА В.В		
5	НЕСТЕРОВ О.В		
НК	ФАСОЛЬ Є.О		

7. Дата видачі завдання « 10 » жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд		
2	Матеріали та методика досліджень		
3	Експериментальна частина		
4	Економічна частина		
5	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях		

Студент(ка) _____ РЕПЕТУН Андрій
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ ВІНІЧЕНКО Валерій
 (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 78 с., 15 рис., 10 табл.,
21 джерело

ЦЕМЕНТАЦІЯ, НИЗЬКОЛЕГОВАНІ КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ,
ДИФУЗІ, КАРБЮРИЗАТОР, НАВУГЛЕЦЮВАННЯ, ЗМІЦНЕНИЙ ШАР,
МІКРОТВЕРДІСТЬ, ВУГЛЕЦЬ, ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР, КАТАЛІЗАТОР

Об'єкт дослідження – існуючі технології цементації низьколегованих
конструкційних сталей.

Мета роботи: дослідити можливості підвищення ефективності процесу
цементації обробки низьколегованих конструкційних сталей.

Розглянуті сучасні технології цементації низьколегованих
конструкційних сталей. Наведені їх переваги та недоліки в реаліях сучасного
технічного оснащення. Досліджено вплив параметрів технологічного процесу
газової цементації на якість отриманих виробів. Встановлено залежності та
отримано рівняння впливу часу цементації на глибину зміцненого шару, які
можна застосовувати для оптимізації існуючих технологій. Розраховано
економічну доцільність проведення оптимізації технологічного процесу.
Розглянуті питання охорони праці.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Літературний огляд	8
1.1 Основні принципи цементації та їх значення для низьколегованих сталей	8
1.2 Механізм утворення і будова цементованого шару	9
1.3 Загальна характеристика низьколегованих конструкційних сталей	11
1.4 Існуючі технології цементації та їх застосування	12
1.4.1 Цементация твердим карбюризатором	13
1.4.2 Газова цементация	15
1.4.3 Рідинна цементация	17
1.5 Проблеми та обмеження існуючих методів цементації	18
1.5.1. Недостатня глибина цементації.....	18
1.5.2. Нерівномірність структури поверхневого шару	19
1.5.3. Обмеження за формою і розмірами деталей	20
1.6 Дослідження та розробки в галузі вдосконалення технології цементації	20
1.7 Обрані напрямки дослідження.....	24
2 Матеріали та методика досліджень	26
2.1 Хімічний склад та виготовлення зразків	26
2.2 Мікроскопічні дослідження	26
2.3 Дослідження мікротвердості.....	27
2.4 Електронно-спектральне дослідження.....	28
2.5 Використання методу скінченних різниць	29
3 Експериментальна частина.....	31
3.1 Застосування методу скінченних різниць для теоретичного визначення концентрації вуглецю на поверхні цементованого матеріалу.....	31
3.2 Хіміко-термічна обробка досліджуваних зразків зі сталі 15Х	36

3.3 Аналіз результатів розрахунків і отриманих практичних результатів..	38
4 Економічна частина	47
4.1 Тенденції розвитку світового ринку технологій.....	47
4.2 Техніко-економічні розрахунки.....	50
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	61
5.1 Аналіз потенційних небезпек.....	61
5.2 Заходи по забезпеченню загальної безпеки.....	62
5.3 Заходи із забезпечення виробничої санітарії і гігієни праці	66
5.4 Заходи щодо забезпечення безпеки у випадку надзвичайних ситуацій	68
5.4.1 Заходи щодо забезпечення пожежної безпеки.....	68
5.4.1 Забезпечення безпеки в разі виникнення надзвичайних ситуацій..	71
Висновки	73
Перелік посилань.....	75
Додаток.....	78

ВСТУП

Сучасне виробництво передбачають широке використання низьколегованих конструкційних сталей у різних галузях. Ці матеріали мають високу міцність, стійкість до корозії та широкий спектр застосування. Однак, для максимізації їхнього потенціалу потрібне ефективне вдосконалення технологій обробки, включно з процесами цементації.

Цементация є ключовим етапом обробки сталей, спрямованим на поліпшення їхніх механічних і експлуатаційних властивостей. У зв'язку з постійним розвитком технологій і висуванням нових вимог до матеріалів, актуальність дослідження можливостей удосконалення технології цементації низьколегованих сталей залишається високою.

З урахуванням викладеного вище мета даної дипломної роботи полягає в проведенні комплексного аналізу та дослідження можливостей поліпшення технології цементації низьколегованих конструкційних сталей з метою підвищення їх функціональних характеристик.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Основні принципи цементації та їх значення для низьколегованих сталей

Цементация, або науглецювання – це технологія хіміко-термічної обробки, що полягає у дифузійному насиченню поверхні шару сталі вуглецем при нагріві у відповідному середовищі – карбюризаторі.

Основні принципи цементації закладені в процесі термохімічного впливу на поверхню сталі, спрямованого на поліпшення її механічних властивостей. Цей процес передбачає введення вуглецю в поверхневі шари сталі, що призводить до утворення карбідних фаз і поліпшення твердості, міцності та зносостійкості матеріалу[1].

Важливим аспектом є контрольована дифузія вуглецю в поверхневі шари сталі, що дає змогу досягти збільшення твердості на поверхні обробленого виробу. Стосовно низьколегованих сталей, цей процес відіграє ключову роль у формуванні кінцевих властивостей, що впливає на характеристики міцності та стійкість поверхні до різних видів впливу, що можуть зазнавати вироби.

Важливо відзначити, що ефективність цементації безпосередньо залежить від температурного режиму, часу проведення і концентрації вуглецю. Отже, оптимізація цих параметрів має фундаментальне значення для досягнення оптимальних результатів цементаційного процесу.

Додатково, різні методи цементації, такі як газова, рідинна чи цементация твердим карбюризатором, надають можливість обрати оптимальні параметри для отримання необхідних властивостей. Цей вибір ґрунтується не тільки на механічних властивостях кінцевого продукту, а й на економічній ефективності та технологічності.

У підсумку, основні принципи цементації низьколегованих сталей мають суттєве значення для розроблення та вдосконалення технологій,

спрямованих на підвищення експлуатаційної ефективності та якості кінцевих виробів.

1.2 Механізм утворення і будова цементованого шару

Дифузія вуглецю в сталь можлива тільки в тому разі, якщо вуглець знаходиться в атомарному стані, одержуваному, наприклад, дисоціацією газів, що містять вуглець (CO , CH_4 та ін.). Атомарний вуглець адсорбується поверхнею сталі і дифундує в глиб металу.

При температурі цементації (вище точки $A_{с3}$) дифузійний шар складається тільки з аустеніту, а після повільного охолодження - з продуктів його розпаду - фериту і цементиту. При цьому концентрація вуглецю не досягає межі насичення за цієї температури.

Цементований шар має змінну концентрацію вуглецю за товщиною, яка зменшується від поверхні до серцевини деталі (рис. 1.1). У зв'язку з цим після повільного охолодження в структурі цементованого шару можна розрізнити (від поверхні до серцевини) три зони (рис. 1.1): заевтектоїдну, що складається з перліту і вторинного цементиту (1), який утворює сітку за колишнім зерном аустеніту; евтектоїдну (2), що складається тільки з пластинчастого перліту, і доевтектоїдну зону (3), що складається з перліту і фериту. Кількість фериту в цій зоні безперервно зростає по мірі наближення до серцевини.

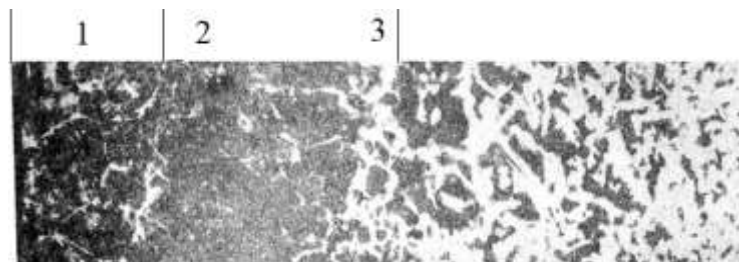


Рисунок 1.1 — Мікроструктура цементованого шару після повільного охолодження (x200)

За ефективну товщину цементованого шару часто приймають суму заевтектоїдної і половини перехідної (доевтектоїдної) зон (до вмісту 0,45 % C), що відповідає 50 HRC (рис. 1.2). Для багатьох виробів ефективна товщина шару приймається після загартування на HV500 або HV700 для відповідальних деталей.

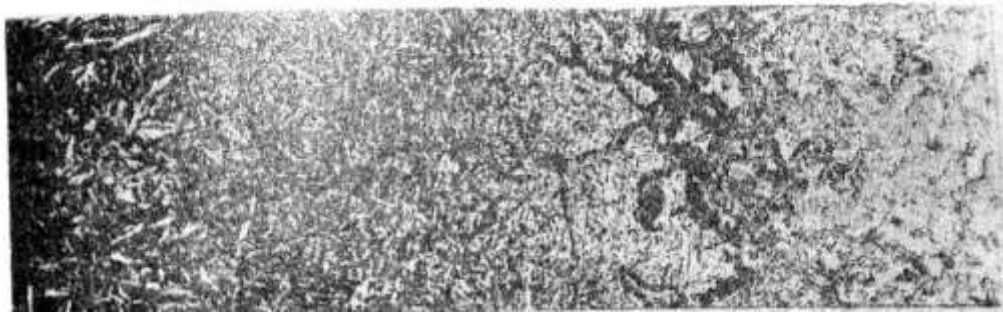


Рисунок 1.2 — Мікроструктура цементованого шару після гартування (x200)

Ефективна товщина цементованого шару для деталей, що виготовляються на сталі з вмістом $< 0,17\%$ C, становить 15 % найменшої товщини або діаметра перерізу, що цементується. За вмісту в сталі 0,17 % C товщину шару зменшують до 5-9 %, а для деталей, які працюють на зношення і не зазнають великих питомих навантажень, - до 3-4 % від найменшої товщини або діаметра перетину, що цементується.

Концентрація вуглецю в поверхневому шарі повинна становити 0,8 – 1,0 %. Для отримання високої контактної втоми вміст вуглецю може бути підвищений до 1,1 – 1,2 %. Більш висока концентрація вуглецю спричиняє погіршення механічних властивостей цементуємого виробу.

У разі цементації сталей, легованих карбідоутворювальними елементами, за температури дифузії можливе утворення двофазного шару з аустеніту і карбідів глобулярної форми. На товщину шару легувальні елементи в тій кількості, в якій вони присутні в цементованих сталях, практично не впливають.

1.3 Загальна характеристика низьколегованих конструкційних сталей

Вибір марки сталі для цементації залежить від умов роботи виробів. Від цементованих виробів потрібні найрізноманітніші властивості: зносостійкість, втомна міцність, хороші антикорозійні властивості, теплостійкість. Вироби з цементованих сталей повинні поєднувати високу зносостійкість поверхневого шару з високою пластичністю серцевини. Таке поєднання властивостей зумовлене необхідністю мати високий опір ударним навантаженням, яким часто піддаються цементовані вироби.

У багатьох випадках під час виготовлення дуже точних деталей після цементації і загартування окремі місця їх піддаються механічній обробці (різанням, протягуванню тощо). У цих випадках твердість серцевини після загартування обмежується не вище HRC 39, тому вміст вуглецю в сталі допускається не більше 0,16%.

Для більшості деталей машин широко застосовують якісні конструкційні низьколеговані сталі, такі як тип 15 та 15X. Їх піддають гартуванню з наступним високотемпературним відпуском (термічне поліпшення), що забезпечує ефективний баланс між легкістю оброблення та високими механічними характеристиками. Після термообробки структура цих матеріалів визначається сорбітовим відпуском, який характеризується високою в'язкістю та підвищеною твердістю порівняно зі сталями звичайної якості [2].

Для високонавантажених та відповідальних деталей, при обмеженнях на їхню вагу, застосовують леговані сталі, такі як 40XH, 40XH2MA, 30XGT, 30XGSA та інші. Зазвичай ці сталі піддають термopolіпшенню. Легувальні елементи в цих сталях зміцнюють твердий розчин, підвищуючи механічні характеристики матеріалу. Структура після термopolіпшення включає легований сорбіт відпуску.

Деякі деталі вимагають високої зносостійкості поверхневого шару, тому

їх виготовляють із цементованих сталей, таких як 12ХН3А, 18ХГТ або сталей для азотування, наприклад, 38ХМЮА (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Механічні властивості сталей, що піддають ХТО [3]

Марка сталі	Твердість НВ, не менше	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{-1} , МПа
15Х	197	650	400	300
12ХН3А	260	950	700	420
18ХГТ	330	1150	950	520
38ХМЮА	300	1030	880	610
40ХН2МА	306	1080	880	519

Низький вміст вуглецю у сталях для цементації обумовлений потребою зберегти необхідну міцність та в'язкість серцевини виробу після термічної обробки при невисокій твердості. Процес дифузійного насичення поверхні вуглецем збільшує його вміст у поверхневому шарі до 0,8...1,1%. Таким чином, поверхня виробу у відпаленому стані відноситься до заевтектоїдного структурного класу. Гартування та низькотемпературний відпуск забезпечують у поверхневому шарі структуру пересиченого твердого розчину мартенситу, що має твердість 59...64 HRC, а також аустеніту залишкового та карбідів. Мікроструктура серцевини складатиметься з маловуглецевого мартенситу, твердість якого буде становити 32,0...43,5 HRC, а в'язкість та міцність порівняно з поверхневим шаром буде вищою.

1.4 Існуючі технології цементації та їх застосування

Як вже згадувалося вище на сьогодні існує кілька основних методів цементації, таких як газова цементація, рідка цементація та цементація

твердим карбюризатором. Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки, і їх застосування залежить від конкретних вимог до матеріалу та умов виробництва.

1.4.1 Цементация твердим карбюризатором

Цементация твердим карбюризатором. У цьому процесі насичувальним середовищем є деревне вугілля (дубове або березове) у зернах поперечником 3,5-10 мм. Для активації деревного вугілля до нього додають різні добавки вуглекислих солей. Замість деревного вугілля іноді використовують торф'яний кокс. Обраний склад карбюризатора повинен мати здатність до виділення активного вуглецю з необхідною швидкістю за обраної температури цементации та збереженням активності при багаторазовому застосуванні. Карбюризатор у процесі цементации повинен давати мінімальну усадку і не викликати дефектів (роз'їдання) на поверхні від домішок. Крім деревного вугілля і вуглекислих солей, до карбюризатора входять інші складові: кокс для зменшення усадки, патока для гарного зв'язування вуглекислих солей з деревним вугіллям. Складовими карбюризаторів є волога (до 6%) і сірка (в мінімальній кількості, оскільки роз'їдає поверхні деталей і сприяє проникненню вуглецю через обміднений шар). Вплив складу карбюризатора на глибину цементации за різного вмісту вуглецю в шарі показано на рис. 1.3.

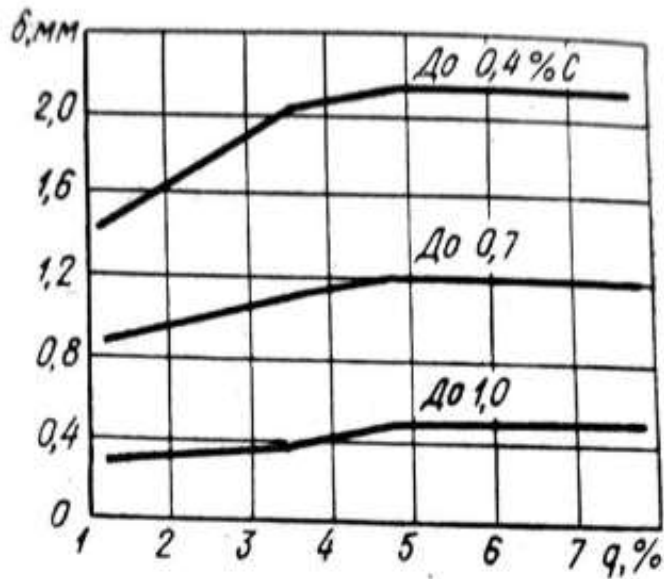
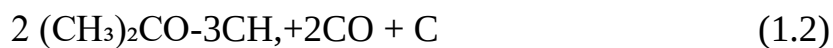


Рисунок 1.3 – Графіки залежності глибини цементації від вмісту q вуглекислих солей.

Наведені дані справедливі для малолегованих сталей. Під час цементації сталей, легованих вольфрамом (молібденом), хромом, марганцем, ширина зон і концентрація вуглецю значно більші, ніж під час цементації вуглецевої сталі. Для сталей, легованих карбідоутворювальними елементами, слід застосовувати карбюризатори з меншою кількістю активних домішок. При температурі $980-1010^{\circ}\text{C}$ цементацію треба проводити в менш активних карбюризаторах, ніж при температурі $930-950^{\circ}\text{C}$. Таким чином, склад застосовуваного карбюризатора вибирають з урахуванням складу застосовуваної сталі, температури і тривалості цементації. Це забезпечує найвигіднішу концентрацію вуглецю і структуру цементованого шару.

Існують карбюризатори, в яких в якості активатора вводять ацетат натрію CH_3COONa або ацетат барію $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$. Ацетат барію під час нагрівання розкладається з утворенням вуглекислого барію та ацетону, який, у свою чергу, розкладається на атомарний вуглець, метан і окис вуглецю:





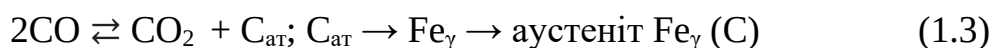
Цементация в такому карбюризаторі прискорюється внаслідок появи в газовій фазі великої кількості метану (10- 12%). Для прискорення цементації в твердому карбюризаторі застосовують цементацію з нагріванням струмами високої частоти (СВЧ). Унаслідок малої тривалості нагрівання значного зростання зерна при цьому не відбувається

1.4.2 Газова цементация

Процес газової цементації здійснюють нагріванням виробу в середовищі газів, що містять вуглець. Газова цементация має низку переваг порівняно з цементацією в твердому карбюризаторі, тому її широко застосовують на підприємствах, що виготовляють деталі масовими партіями.

У випадку газової цементації можна отримати задану концентрацію вуглецю в шарі; скорочується тривалість процесу, оскільки відпадає необхідність прогрівання малотеплопровідних карбюризаторів; забезпечується можливість повної механізації й автоматизації процесів і значною мірою спрощується подальша термічна обробка деталей, оскільки загартування можна проводити безпосередньо в цементаційній печі.

Найякісніший цементований шар виходить у разі невикористання як карбюризатора природного газу, що складається майже повністю з метану (CH_4) і пропанбутанових сумішей, підданих спеціальній обробці, а також рідких вуглеводнів. Основною реакцією, що забезпечує науглецювання при газовій цементації, є:



При високому вмісті в атмосфері метану можливі реакції:



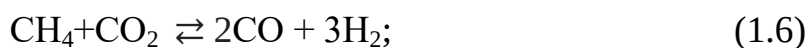
Процес протікає при температурі 910-930° С 6 – 12 год (товщина отриманого шару складає 1000 – 1700 мкм).

У серійному виробництві газову цементацію зазвичай проводять у шахтних печах. Необхідна для газової цементації атмосфера створюється під час подавання в камеру печі рідин, багатих на вуглець (гас, синтин, спирти тощо). Вуглеводневі сполуки при високій температурі розкладаються з утворенням цементувального газу.

У великосерійному і масовому виробництвах газову цементацію проводять у безмуфельних печах безперервної дії. У цих установках весь цикл хіміко-термічної обробки (цементация, загартування і низький відпуск) повністю механізований і автоматизований. У печах безперервної дії для цементації застосовують ендотермічну атмосферу, в яку додають природний газ, об. %: 95-97 ендогазу (20% CO, 40% H₂ і 40% Ni) і 3 – 5 природного газу.

Основна перевага ендотермічної атмосфери - можливість автоматичного регулювання вуглецевого потенціалу, під яким розуміють її здатність до науглецювання, що забезпечує певну концентрацію вуглецю на поверхні цементованого шару. Вуглецевий потенціал ендотермічної атмосфери встановлюють за точкою роси, вмістом у ній CO₂ або O₂.

За невеликого вмісту в ендотермічній атмосфері (до 5 об. %) CH₄ не бере участі безпосередньо в процесі насичення поверхні деталі вуглецем, а збільшує вміст в атмосфері CO:





Для скорочення тривалості процесу в промисловості широко використовують газову цементацію, за якої вуглецевий потенціал атмосфери спочатку підтримують високим, що забезпечує отримання в поверхневому шарі деталі 1,2-1,3% С (активний період), а потім його знижують до 0,8% (дифузійний період).

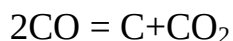
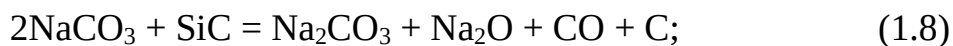
Під час використання цього методу цементації слід мати на увазі, що зниження вмісту вуглецю в шарі з 1,2-1,3 до 0,8% відбувається тільки за рахунок вуглецю, розчиненого в аустеніті. Зниження в аустеніті концентрації вуглецю і легуючих елементів (унаслідок утворення карбідів) призводить до зменшення загартовуваності та прогартуваності цементованого шару і, як наслідок, до погіршення механічних властивостей виробу, що обробляється. У процесі газової цементації в ендотермічній атмосфері в сталь може дифундувати кисень. Це призводить до окислення, наприклад, Cr, Mn, Si та інших елементів поверх поверхневого шару сталі, що мають більшу хімічну спорідненість з киснем, в порівнянні з залізом. Окислення легуючих елементів ("внутрішнє окислення") знижує стійкість аустеніту, і під час подальшого загартовування в цементованому шарі утворюються троститна сітка й оксиди, що знижує його твердість і межу витривалості сталі.

Швидкість газової цементації за температури 930-950° С становить 0,12-0,15 мм/год при товщині шару до 1500-1700 мкм.

1.4.3 Рідинна цементація

Рідинна цементація являє собою метод, заснований на використанні рідких вуглецевмісних середовищ для насичення поверхні сталі вуглецем. Зазвичай виконується в соляній ванні: 75-85% Na₂CO₃, 10-15% NaCl і 8-10%

SiC (карборунд). У ванні відбуваються наступні реакції:



Цементацію проводять за температури 880-900° С протягом 30 хв. При цьому утворюється шар глибиною 0,15 – 0,20 мм. Недоліком такої цементації є отримання нерівномірного шару і безперервне виділення тинної піни, що забруднює робоче місце.

Є спроби цементації з нагріванням в електроліті (метод І.З. Ясногородського). До складу електроліту вводять речовини, що дисоціюють із виділенням вуглецю (80% ацетону і 20% води тощо).

1.5 Проблеми та обмеження існуючих методів цементації

Нині наявні методи цементації низьколегованих конструкційних сталей не позбавлені проблем і обмежень, які впливають на ефективність процесу і якість одержаних виробів. Нижче розглянуті основні проблеми які виникають в процесі цементації.

1.5.1. Недостатня глибина цементації

Однією з ключових проблем, з якою стикаються під час використання

існуючих методів цементації, є обмеження глибини проникнення вуглецю в матеріал. Це обмеження впливає на максимальну товщину цементованого шару і, як наслідок, на його експлуатаційні властивості.

Причинами недостатньої глибини цементації можуть бути недостатньо високі температурні режими, які використовуються для обробки низьколегованих сталей через ризик порушення цілісності заготовок. Крім того, обмежений час цементації, іноді викликаний необхідністю запобігання термічним деформаціям, також може призвести до недостатньої глибини проникнення.

Як наслідок недостатня глибина цементації може призвести до незадовільної поверхневої твердості цементованого шару. Крім того, обмежена глибина цементації знижує зносостійкість поверхневого шару, що зменшує його довговічність та ефективність в умовах експлуатації.

1.5.2. Нерівномірність структури поверхневого шару

Іншим недоліком стала проблема, пов'язана з нерівномірністю структури поверхневого шару. Даний ефект виникає через неоднорідність температурних режимів, відмінностей у концентрації цементувальних реагентів та інших чинників, що тягне за собою зміни в механічних властивостях цементованого шару.

Процеси цементації, де температурні градієнти відіграють суттєву роль, можуть призводити до різності у структурі матеріалу, особливо при використанні підвищених температур. Нерівномірність концентрації реагентів на поверхні матеріалу може викликати неоднорідне проникнення і, як наслідок, створення неоднорідності у структурі зміцненого шару.

Як наслідок виникнення нерівномірної структури поверхневого шару отримання різних механічних властивостей у різних ділянках шару, зниження

стійкості до впливу зовнішніх чинників, таких як удари, вібрації та зношування. Також важливим є те, що нерівномірна структура може обмежувати функціональність цементованого шару, особливо при експлуатації в умовах при яких необхідна висока однорідність механічних властивостей по всій поверхні виробів.

1.5.3. Обмеження за формою і розмірами деталей

Наступний негативний аспект, який потребує уваги під час розгляду поточних методів цементації низьколегованих конструкційних сталей, є обмеження за формою і розмірами деталей які можуть оброблятися. Деякі наявні технології цементації можуть чинити обмежений вплив на деталі з певними геометричними параметрами.

Так, через неоднорідний розподіл носія вуглецю, під час обробки деталей складної форми, або великих розмірів, може виникнути проблема нерівномірного розподілу цементувальної речовини, що знижує якість і ефективність процесу.

Для деяких деталей складної форм і чи за великих розмірів складно підтримувати оптимальні умови цементації, такі як температурні режими або рівномірність концентрації реагентів. Як наслідок виникає явище нерівномірного цементування, що веде до неоднорідності структури поверхневого шару.

1.6 Дослідження та розробки в галузі вдосконалення технології цементації

Дослідження та розробки в галузі вдосконалення технології цементації спрямовані на пошук нових методів, матеріалів і параметрів процесу, щоб покращити його якість та ефективність. Основні напрямки досліджень включають в себе:

1. Розробка нових карбюризуючих матеріалів: даний напрям є важливим напрямком вдосконалення технології цементації металів. Карбюризуючі матеріали використовуються для постачання вуглецю на поверхню металу під час цементації, щоб покращити його механічні властивості. Дослідження в цьому напрямку спрямовані на розробку матеріалів, які можуть ефективно і однорідно постачати вуглець та забезпечувати високу якість обробки.

Деякі аспекти розробки нових карбюризуючих матеріалів включають:

1.1. Хімічний склад: Дослідження фундаментальних властивостей матеріалів, які містять вуглець, таких як карбіди та інші сполуки, щоб визначити їхні хімічні та фізичні властивості, які можуть впливати на процес цементації.

1.2. Теплові властивості: Вивчення теплових характеристик карбюризуючих матеріалів, таких як температурний розклад, сприяє визначенню оптимальних умов обробки та ефективності постачання вуглецю.

1.3. Морфологія та структура: Аналіз морфології та структури матеріалів для визначення їхнього впливу на адгезію та розподіл вуглецю на поверхні металу.

1.4. Вплив на властивості металу: Вивчення впливу карбюризуючих матеріалів на механічні та термічні властивості металу, такі як твердість, міцність, зносостійкість та інші.

1.5. Економічна ефективність: Розгляд ефективності використання нових матеріалів з точки зору вартості виробництва та зниження витрат.

1.6. Екологічні аспекти: Урахування екологічних показників нових карбюризуючих матеріалів, зокрема їхнього впливу на навколишнє середовище.

Результати таких досліджень допомагають створювати матеріали, які

можуть бути більш ефективними у процесі цементації, забезпечуючи однорідне та глибоке проникнення вуглецю в метал та покращення його властивостей. Такий підхід є ключовим у вдосконаленні технології цементації для різних галузей промисловості.

2. Вивчення нових технік розподілу вуглецю – дослідження яке спрямоване на розробку методів, що забезпечать рівномірне та ефективне постачання вуглецю на поверхню металу. Це є важливим аспектом для досягнення якісної цементації з мінімальними витратами матеріалів та енергії. Далі наведені основні напрямки за якими ведуться дослідження:

2.1. Методи нанесення карбюризуючого матеріалу:

Плавлення: вивчення можливостей нанесення карбюризуючого матеріалу шляхом плавлення або розплавлення на поверхні металу, що дозволяє отримати однорідний шар вуглецю.

Поверхневі покриття: розробка технік, які дозволяють створювати тонкі покриття карбюризуючих матеріалів, забезпечуючи високу адгезію та рівномірний розподіл.

2.2. Використання адгезивів та проміжних шарів:

Адгезиви: дослідження можливостей використання адгезивів або спеціальних проміжних шарів, які допомагають утримувати карбюризуючий матеріал на поверхні металу та забезпечують його рівномірний розподіл.

Проміжні шари: вивчення властивостей та технік нанесення проміжних шарів, які можуть підвищити адгезію та сприяти розподілу вуглецю.

2.3. Техніки механічного впровадження:

Глибоке тиснення: розробка методів глибокого тиснення, які можуть впроваджувати карбюризуючі матеріали в поверхню металу на значну глибину.

Ударне впливи: вивчення впливу ударних технік, які можуть сприяти проникненню вуглецю в структуру металу.

Всі ці техніки спрямовані на створення методів, які забезпечать ефективний та рівномірний розподіл вуглецю на поверхні металу, що призведе

до покращення механічних властивостей та якості обробки в результаті цементації.

3. Автоматизація та інновації в виробництві цементації металів включають в себе впровадження сучасних технологій та систем, спрямованих на підвищення ефективності, точності та безпеки процесу. Деякі ключові аспекти цієї області включають:

3.1. Автоматизовані системи дозування та постачання матеріалів:

Використання автоматизованих систем для точного дозування карбюризуючих матеріалів та інших реагентів, що забезпечує консистентність у процесі цементації.

3.2. Розумна система контролю та моніторингу:

Впровадження систем моніторингу параметрів процесу, таких як температура, час, тиск тощо, для автоматичного контролю та підтримки оптимальних умов.

Використання сучасних технологій для отримання даних та віддаленого контролю в реальному часі.

3.3. Роботизовані системи обробки та розподілу матеріалів:

Впровадження роботизованих систем для автоматичного розподілу карбюризуючих матеріалів на поверхню металу, що підвищує швидкість та точність процесу.

Використання роботів та автоматичних маніпуляторів для оптимізації обробки великих чи складних деталей.

3.4. Системи штучного інтелекту (ШІ):

Використання алгоритмів машинного навчання для аналізу даних та прогнозування оптимальних умов цементації.

Розвиток систем ШІ для автоматичного виявлення та корекції можливих аномалій у процесі цементації.

3.5. Використання автоматизованих технологій нагріву, а саме застосування сучасних систем нагріву, таких як індукційне нагрівання, яке забезпечує ефективність та точність нагріву, зменшуючи споживання енергії

та час цементациі.

Застосування інноваційних систем автоматизації для виконання процесу цементациі можуть допомогти підвищити продуктивність, покращити якість та знизити витрати у виробництві.

4. Оптимізація технологічних параметрів у контексті цементациі металів включає в себе налаштування різних факторів процесу для досягнення оптимальних результатів щодо механічних властивостей, глибини цементациі та інших параметрів. Основні параметри які можуть бути оптимізовані:

4.1. Температура - вивчення впливу різних температур на процес цементациі для визначення тих, які забезпечать оптимальну твердість та глибину цементациі;

4.2. Час витримки - визначення впливу тривалості витримки на глибину і якість науглецьованого шару;

4.3. Концентрація карбюризуючого агента - дослідження впливу різних концентрацій карбюризатора на ефективність цементациі.

4.4. Моделювання та експерименти - використання чисельного моделювання та експериментів для встановлення оптимальних параметрів процесу цементациі.

1.7 Обрані напрямки дослідження

Найбільш розповсюдженою, на даний час, технологією цементациі низьколегованих конструкційних сталей являється процес з використанням газового носія вуглецю (газова цементация). Дана технологія є зручною для використання при виробництві великих партій продукції, крім того використання газового карбюризатора дозволяє виконувати насичення поверхні виробів складної геометричної форми без застосування додаткових технологічних операцій. Завдяки великій ступені однорідності газу дозволяє

проводити науглецювання поверхні виробу однорідним шаром. Додаючи до цього найпростішу можливість автоматизації процесу цементації у порівнянні з іншими існуючими технологіями, отримуємо один з най ефективніших методів підвищення зносостійкості для конструкційних матеріалів.

Незважаючи на всі переваги даний метод має свої недоліки. Основним з яких є обмежена глибина проникнення вуглецю. Як відомо під час газового насичення поверхні виробу вуглецем, швидкість дифузії зменшується пропорційно з глибиною науглецюваного шару. І при необхідності утворення достатньо товстого шару може витратитися непомірна кількість часу.

Зважаючи на вище сказане найпростішим і найдешевшим шляхом удосконалення технології цементації для низьколегованих конструкційних сталей є оптимізація технологічних параметрів.

Проведення оптимізації технологічного процесу є ключовою для досягнення бажаних результатів, а саме підвищення якості отримуваних виробів і зниження витрат на їх виробництво.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Хімічний склад та виготовлення зразків

В роботі проводилося дослідження впливу параметрів газової цементації на властивості та глибину науглецьованого шару на прикладі низьколегованої конструкційної сталі 15Х ДСТУ 4543 – 71. Хімічний склад сталі (масова частка елементів, %): С – 0,12...0,18; Si – 0,17...0,37; Mn – 0,4...0,7; Ni $\geq$ 0,3; S $\geq$ 0,035; P $\geq$ 0,035; Cr – 0,7...1,0; Cu $\geq$ 0,3; основа Fe.

Для досліджень виготовляли зразки у вигляді пластин розмірами що складали: ширина 20 мм і довжина 50 мм, товщина 2 мм. Такі зразки були виготовлені із поковок після нормалізації.

На зразках проводили цементацію в промисловій електричній шахтній муфельній печі СШЦМ 6.12, яка була оснащена системою виміру та регулювання вуглецевого потенціалу робочої зони.

Насичувальним середовищем були продукти піролізу пропанобутанової суміші, що подавалися через каталізатор безпосередньо в муфель печі. Вуглецевий потенціал пічного середовища контролювали цирконієвим кисневим зондом [4], регулювали його, вводячи додаткове повітря в газоповітряну суміш, яку подають у піч.

2.2 Мікроскопічні дослідження

Металографічні дослідження були проведені з використанням оптичного мікроскопа KERN OKO-1. Визначення хімічного складу поверхні дифузійних шарів, що утворилися на зразках, здійснювався за допомогою характеристичного рентгенівського випромінювання атомів, для цього використовувався енерго-дисперсійний рентгенівський спектрометр від фірми

ThermoNoran. Мікроструктури були зафіксовані у цифровому форматі за допомогою фотокамери AxioCam MRc5.

Для аналізу мікроструктури та вимірювання товщини отриманих дифузійних шарів було використано металографічний мікроскоп. Зразки були залиті акриловою смолою (DuracrylPlus) і потім піддавалися шліфуванню за допомогою шліфувального паперу зі зменшенням розміру зерна. Полірування шліфованих поверхонь проводилося з використанням алмазної пасті. Готові шліфи піддавались хімічному травленню у трипроцентному розчині HNO_3 у $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

2.3 Дослідження мікротвердості

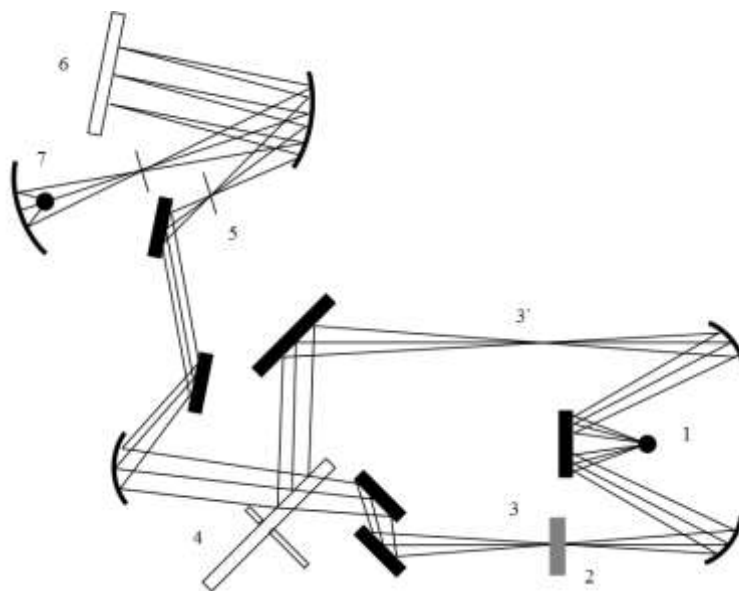
Мікротвердість досліджувалася за допомогою приладу ПМТ-3 відповідно до ДСТУ 9450-76. Для цього застосовували індентор – алмазну чотиригранну піраміду з кутом α між протилежними гранями при вершині $136^\circ \pm 20'$. Для виготовлення зразків, які використовувались для вимірювань мікротвердості, виготовляли мікрошліфи з використанням технологій шліфування та полірування. При цьому необхідно було слідкувати за тим, щоб уникнути можливої зміни твердості поверхні внаслідок нагрівання або наклепу під час механічної обробки. Поверхня зразків була полірована згідно з ДСТУ 2789-73 (Ra мкм).

Під час вимірювання мікротвердості використовувалася навантаження 0,196 Н, яке утримувалося на поверхні не менше 3 секунд. Визначення місця вимірювання мікротвердості та вимірювання розмірів відбитків здійснювались за допомогою мікроскопа. Залежно від навантаження визначали мікротвердість за відповідними таблицями, які наведені в ДСТУ 9450-76 для різних навантажень та інденторів.

2.4 Електронно-спектральне дослідження

Електронно-спектральне дослідження — це метод аналізу, який використовується для вивчення взаємодії матеріалів з електромагнітним випромінюванням в області від ультрафіолетового до інфрачервоного випромінювання. Цей метод дозволяє отримати інформацію про структуру та властивості матеріалів на основі їхніх електронних переходів або коливань молекул.

В роботі використовувалося дослідження хімічного складу поверхні обробленого матеріалу з застосуванням інфрачервоного спектру. Інфрачервона спектроскопія (ІЧ-спектроскопія) — це метод аналізу, який використовується для вивчення молекулярних коливань в речовинах. Вона дозволяє аналізувати хімічні склад та функціональні групи в молекулах на основі їхніх унікальних інфрачервоних (ІЧ) спектрів. [5]



1 — джерело, 2 — зразок, 3 — промінь, що проходить через зразок, 3' — промінь порівняння, 4 — дзеркало зі секторами, 5 — щілини, 6 — ґратка, 7 — детектор

Рисунок 2.1 - Оптична схема ІЧ спектрометра

Дослідження проводилось з метою визначення хімічного складу поверхні зразків. Використовували ІЧ-спектрометр «Nicolet IN10» фірми «Thermo Scientific». Загальна схема роботи ІЧ спектрометра наведена на рис. 2.1.

Реєстрація спектрів здійснювалась на приставці порушеного повного внутрішнього відбиття з роздільною здатністю - 4 см^{-1} та кількістю сканувань - 16.

2.5 Використання методу скінченних різниць

Метод скінченних різниць - це числовий метод, який використовується для розв'язання диференціальних та інтегральних рівнянь в галузі математики та фізики. Основна ідея методу полягає в апроксимації похідних та інтегралів рівнянь за допомогою різницевих відношень на скінченних відстанях [6].

При використанні методу скінченних різниць можна виділити наступні етапи:

- розбиття області – фізична область, в якій проводиться дослідження, розбивається на сітку або мережу вузлів;
- апроксимація похідних – заміна похідних за допомогою відношень різниць. Це може бути центральна, пряма чи зворотна різниця залежно від конкретної задачі;
- побудова різницевих рівнянь – заміна диференціальних рівнянь відношеннями різниць на вузлах сітки. Це дає систему лінійних або нелінійних алгебраїчних рівнянь;
- розв'язання системи рівнянь – застосування числових методів для розв'язання отриманої системи алгебраїчних рівнянь. Для цього можуть бути використані ітераційні методи, методи простої ітерації, методи Гаусса і т. д.;
- перевірка точності та стійкості – аналіз точності та стійкості методу забезпечує коректність та надійність отриманих результатів.

МКР застосовується в різних галузях, таких як теплопередача, механіка твердого тіла, електродинаміка, гідродинаміка, фінансова математика та інші, де розв'язок диференціальних рівнянь часто потрібно отримувати чисельно.

3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛНА ЧАСТИНА

Найчастіше цементацію виконують у газовому середовищі (наприклад, в ендогазі) [7]. Основними характеристиками газового середовища під час цементації, які визначають швидкість процесу насичення і параметри дифузійного шару (товщина шару, вміст у ньому вуглецю, твердість після загартування та ін.), є вуглецевий потенціал C_p , температура t і час τ . Авторами [8] поряд з технологією керованої рідинної цементації був розроблений і впроваджений новий спосіб насичення сталі вуглецем - каталітична газова цементація.

У даному випадку процес вуглецювання сталі значно прискорюється порівняно з традиційною газовою цементацією завдяки утворенню активних іонів вуглецю під час проходження газоподібного карбюризатора через спеціально розроблений каталізатор, як який використовують сполуки нікелю, кобальту або РЗМ. Активні іони вуглецю адсорбуються поверхнею деталі швидше, тим самим істотно скорочуючи тривалість початкової стадії цементації і підвищуючи якість поверхневого шару. Ще одна особливість каталітичної газової цементації - відсутність ендогенератора для приготування газового середовища. Карбюризатор - суміш природного газу і повітря в підвідному трубопроводі подають безпосередньо в піч через твердий каталізатор.

Унаслідок цього використання традиційних розрахункових і емпіричних методів [9-11] при визначенні температурно-часових параметрів каталітичної газової цементації часто призводить до значних відхилень параметрів дифузійного шару від заданих значень. Мета цієї роботи - дослідження каталітичної газової цементації та розробка математичної моделі, що дає змогу визначати необхідні технологічні параметри насичення для формування дифузійного шару із заданими властивостями (товщина, вміст вуглецю).

3.1 Застосування методу скінченних різниць для теоретичного

визначення концентрації вуглецю на поверхні цементованого матеріалу

Як відомо [12], твердість мартенситу визначається вмістом вуглецю в сталі (рис. 3.1). Виходячи з цього, на підставі результатів вимірювання твердості визначили профілі концентрації вуглецю за перерізом пластин, які надалі використовували під час верифікації параметрів розрахункової моделі каталітичної газової цементації.

Процес насичення пластини вуглецем під час цементації було описано диференціальним рівнянням дифузії в одновимірній постановці:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (3.1)$$

де: C - концентрація вуглецю, мас. %;

τ - час, с;

x - відстань від насичуваної поверхні, м;

D - коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті, $\text{м}^2/\text{с}$.

Рівняння (3.1) розв'язали методом скінченних різниць. В одновимірній постановці задачі вважають, що дифузія атомів вуглецю вглиб металу відбувається тільки в одному напрямку - перпендикулярно до насичуваної поверхні пластини. У цьому разі для побудови моделі необхідно розбити пластину за товщиною на низку лінійних елементів величиною Δx , починаючи від поверхні. На рис. 3.2 наведено розрахункову схему методу скінченних різниць.

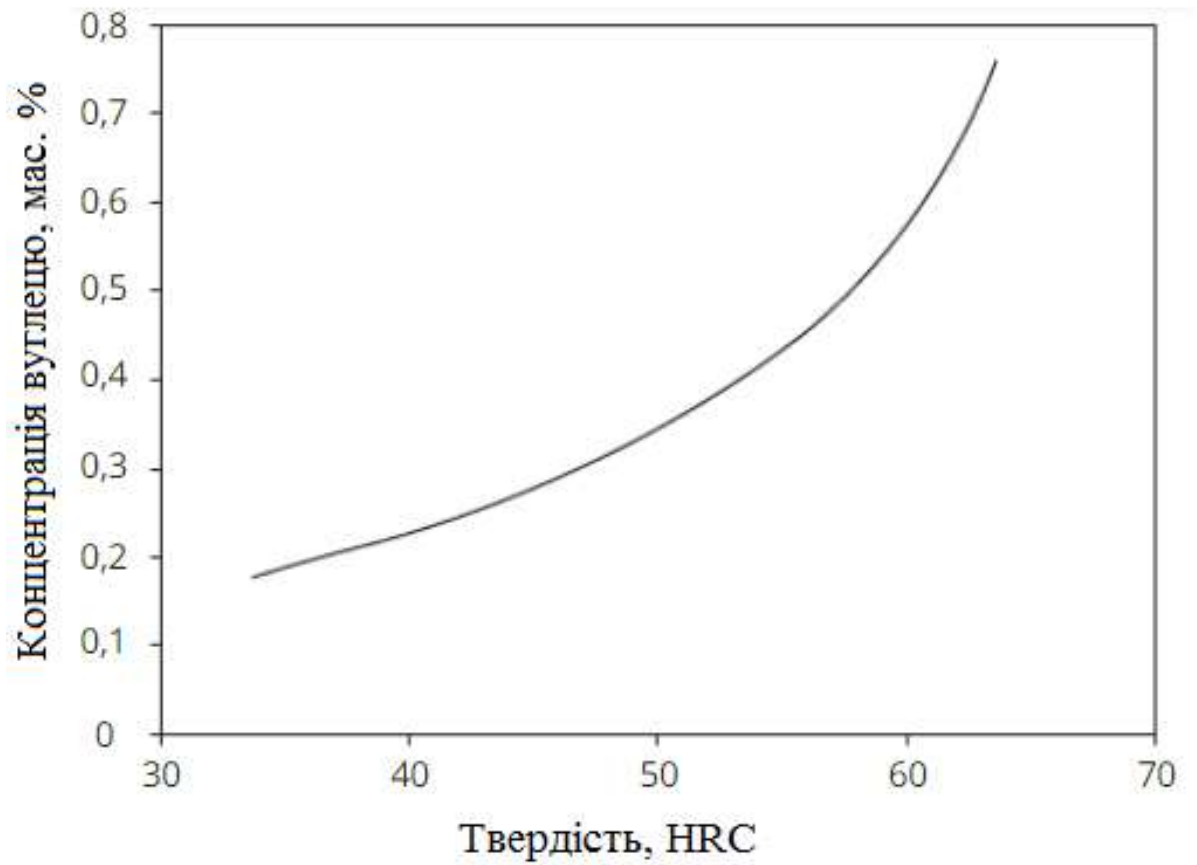


Рисунок 3.1 – Залежність концентрації вуглецю в сталі від твердості мартенситу.

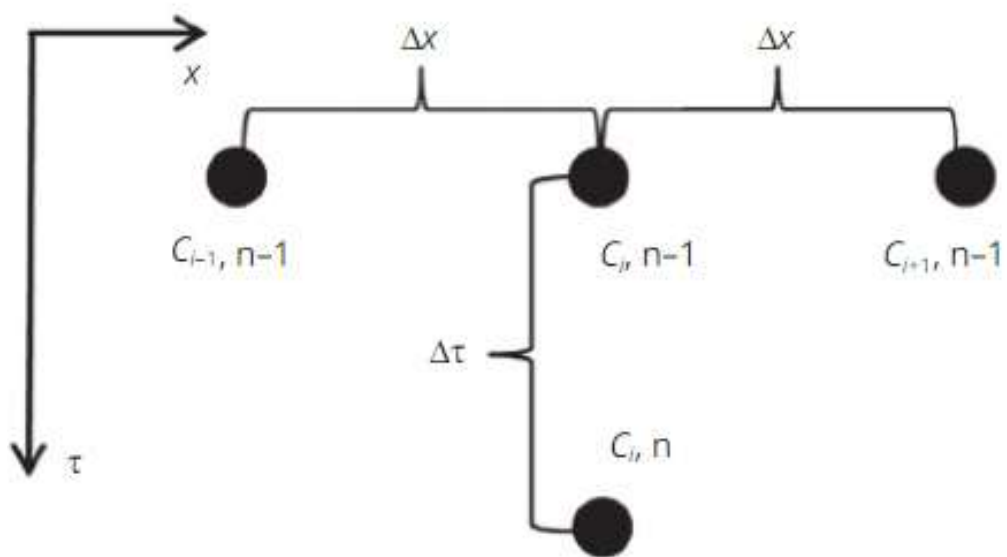


Рисунок 3.2 - Розрахункова схема для чисельного розв'язання диференціального рівняння дифузії методом скінченних різниць

З розрахункової схеми виходить:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} \approx \frac{\Delta C}{\Delta \tau} = \frac{C_{i,n} - C_{i,n-1}}{\Delta \tau}, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta(\Delta C)}{\Delta x^2} = \frac{(C_{i-1,n-1} - C_{i,n-1}) - (C_{i,n-1} - C_{i+1,n-1})}{\Delta x^2}, \quad (3.3)$$

Після підстановки рівнянь 3.2 і 3.3 в 3.1, отримуємо вираз який визначає концентрацію вуглецю:

$$C_{i,n} = \frac{D\Delta\tau}{\Delta x^2} (C_{i-1,n-1} - 2C_{i,n-1} + C_{i+1,n-1}) + C_{i,n-1}, \quad (3.4)$$

Збіжність чисельного розв'язання диференціального рівняння дифузії досягається за умови [13]:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta x^2}{2D}, \quad (3.5)$$

Таким чином, формулу 3.4 можна перетворити на:

$$C_{i,n} = \frac{C_{i-1,n-1} - C_{i,n-1}}{2}, \quad (3.6)$$

В більшості випадків для вирішення диференційного рівняння дифузії виникає необхідність задавати граничні умови третього роду:

$$D \frac{\partial C}{\partial x} = \beta(\varphi - C_0) \quad (3.6)$$

де β – коефіцієнт масо переносу вуглецю з атмосфери на поверхню

виробу, м/с;

φ – вуглецевий потенціал пічної атмосфери, мас. %;

C_0 – концентрація вуглецю на поверхні виробу, мас. %;

При заміні похідної $\partial C / \partial x$ на відношення скінченних різниць $(C_0 - C_1) / \Delta x$ (де C_1 – концентрація вуглецю в першому розрахунковому шарі Δx), отримали наступний вираз, який визначає концентрацію вуглецю на поверхні виробу:

$$C_0 = \frac{C_1 D + \beta \varphi \Delta x}{D + \beta \Delta x}, \quad (3.8)$$

Таким чином, використовуючи рівняння 3.5, 3.6 і 3.8 до двох протилежних насичуваних поверхонь пластини, можна побудувати математичну модель дифузійного насичення сталі вуглецем під час цементації.

Вихідні дані для розрахунків: температура процесу T , К; вуглецевий потенціал насичувальної атмосфери φ , мас. %; коефіцієнт масопереносу вуглецю з атмосфери на поверхню деталі β , м/с; концентрація вуглецю в аустеніті до початку насичення C_γ , %. Розрахунок проводили у такій послідовності:

1. Визначали коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті за заданої температури насичення, T , К, за рівнянням, аналогічним рівнянню Арреніуса:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (3.9)$$

де $Q = 132000$ Дж/моль – енергія активації дифузії вуглецю в аустеніті [Steel and its Heat Treatment : a Handbook / ed. by T. Holm, P. Olsson, E. Troell. — Sweden : Swerewa IVF, 2012. — 832 p.];

$R = 8,31$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала;

$D_0 = 0,11 \cdot 10^{-4}$ м²/с [4]

2. За формулою 3.5 визначали крок часу $\Delta\tau$, с.

3. В початковий момент $\tau = 0$ вважали, що у всіх шарах виробу, що розглядаються – від шару 1 до шару j – концентрацію вуглецю в аустеніті дорівнює C_j .

4. За формулою 3.7 визначали концентрацію вуглецю на поверхні зразку C_0 в початковий момент часу. Коефіцієнт масо переносу вуглецю β під час дослідження приймали таким, що дорівнює 1 м/с, оскільки, як показали результати спектрального аналізу, при тривалості цементації, що розглядалася (1 год і більше), концентрація вуглецю на поверхні зразка не змінювалась і складала 0,69...0,70 мас. %, що відповідає заданому вуглецевому потенціалу середовища печі.

5. За формулою 3.6 визначали концентрацію вуглецю в усіх розрахункових шарах виробу в кожен наступний момент часу.

Як результат було визначено розрахункові концентрації вуглецю в зразках, що формуються під час цементації при різній тривалості процесу.

3.2 Хіміко-термічна обробка досліджуваних зразків зі сталі 15X

Хіміко-термічна обробка (ХТО) - специфічний метод термічної обробки матеріалів, який включає в себе використання хімічних реакцій для досягнення певних характеристик чи властивостей матеріалів при високих температурах. Цементация являється одним з видів ХТО, яка при виготовленні готової продукції зазвичай включає в себе наступні технологічні операції: цементация – гартування – відпуск.

Кожна з цих операцій покликана поліпшити структуру чи властивості матеріалу виробу:

- цементация, як вже описувалося раніше, необхідна для насичення поверхневих шарів вуглецем і як наслідок підвищення твердості та

зносостійкості;

- гартування, необхідно для фіксації концентрації вуглецю у зміцненому шарі та утворенню пересиченого твердого розчину;

- відпуск – проводиться для зняття внутрішніх напруг.

Для дослідження зразків необхідно провести якісну хіміко-термічну обробку. Так як досліджувалося тільки вплив тривалості цементації на глибину зміцнювального шару і не було необхідності встановлення механічних властивостей (окрім мікро-твердості) було вирішено не проводити відпуск для експериментальних зразків за для скорочення часу витраченого на їх виготовлення.

Таким чином, було обрано термічну обробку для кожного зразка, яка наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Термічна обробка експериментальних зразків

Операція термічної обробки	Температура	Час витримки, хв				
		Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3	Зразок №4	Зразок №5
Цементація	910 °C	60	180	240	300	360
Гартування	790 °C, охолодження у воді	1	1	1	1	1

Час витримки при цементації для кожного зразка обирався згідно умов проведення дослідів. Час витримки при гартування був обраний за відомими даними [14].

Таким чином графік термічної обробки зразків 1...6 мав вигляд який зображено на рис. 3.3.

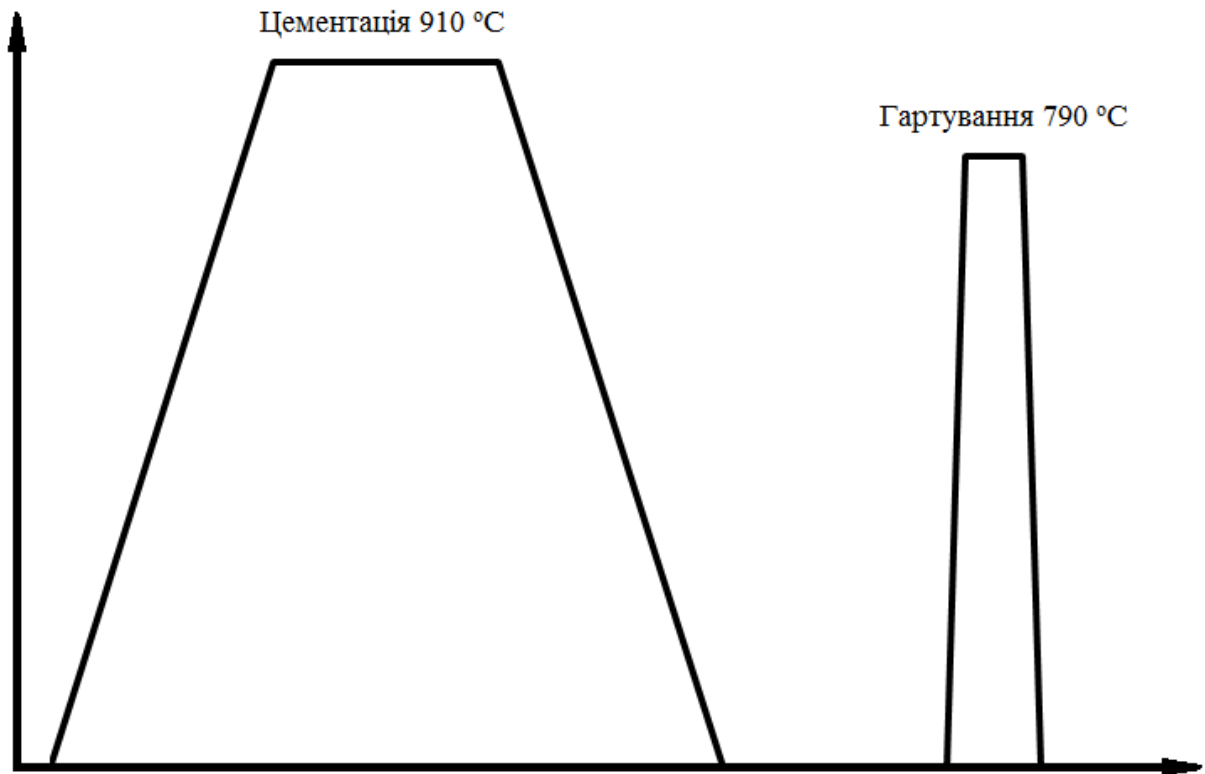
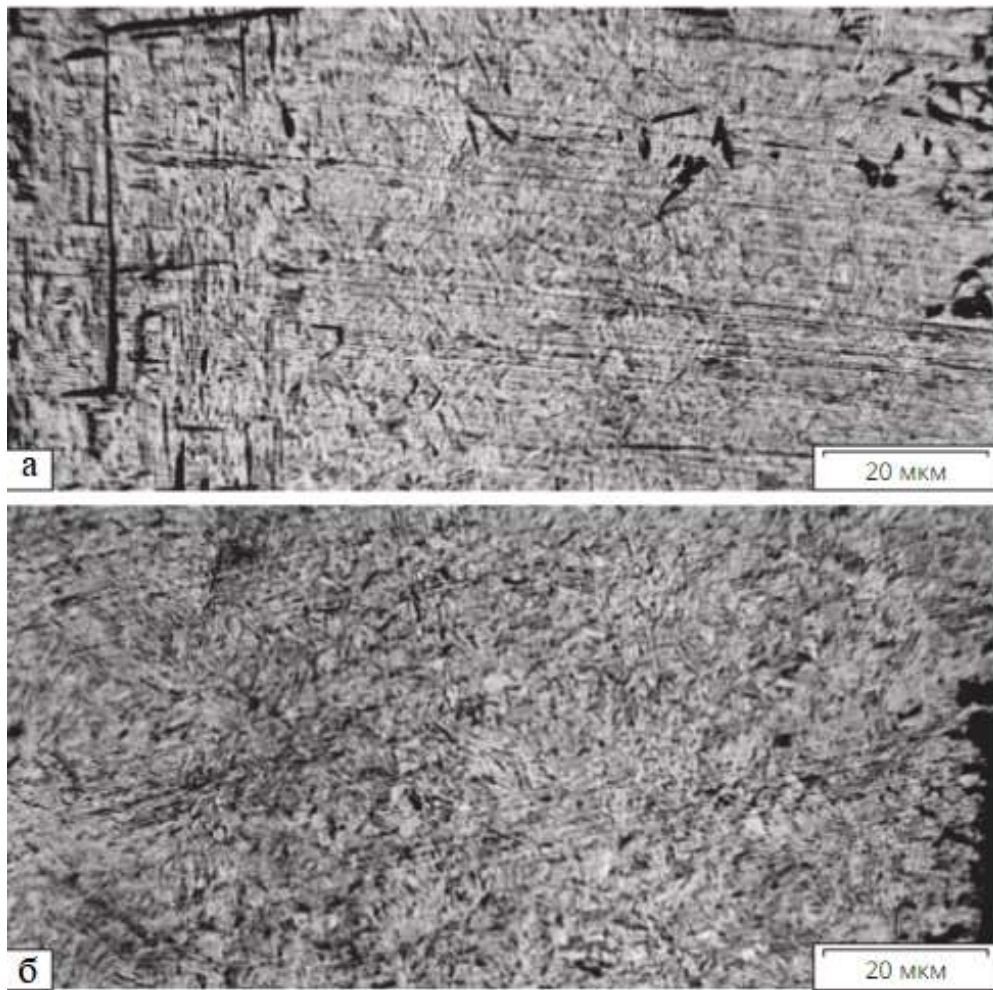


Рисунок 3.3 – Графік термічної обробки зразків 1...5.

3.3 Аналіз результатів розрахунків і отриманих практичних результатів

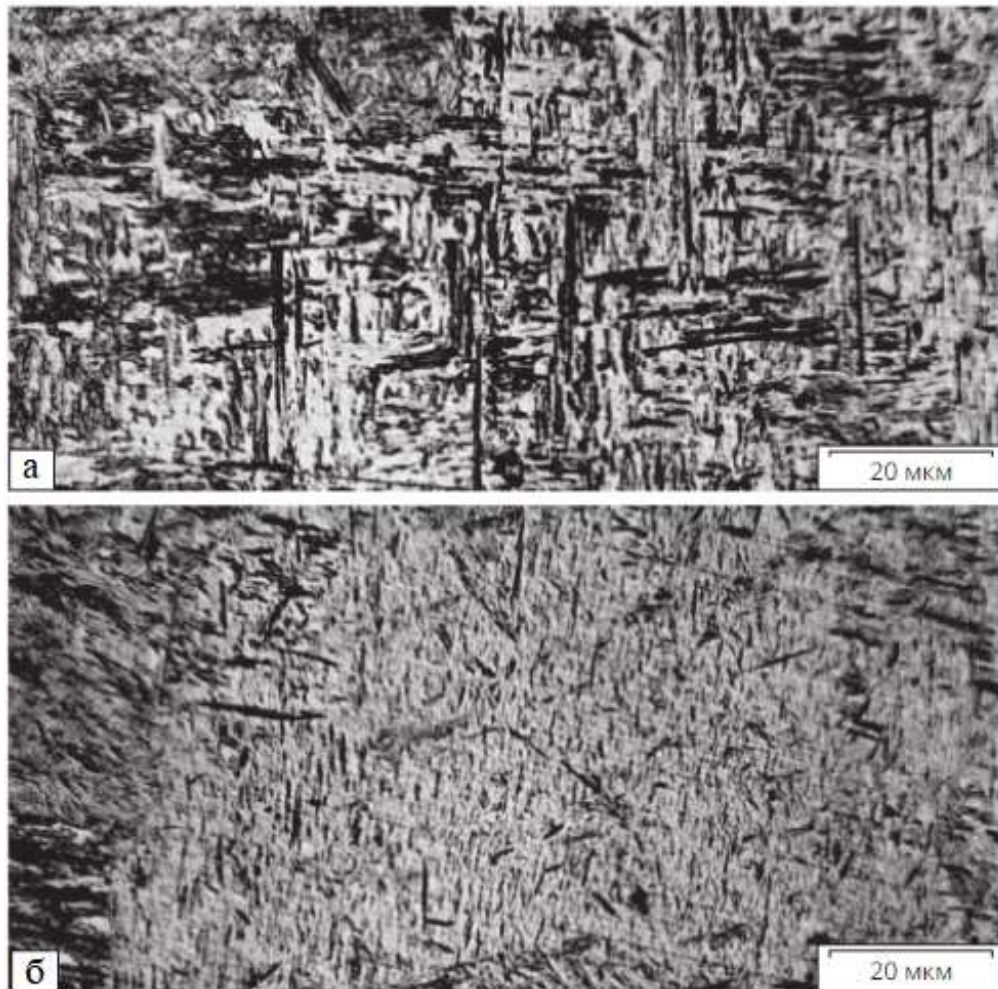
У результаті цементації та подальшого загартування у воді в досліджуваних пла-стинах сталі Ст3 сформувалася переважно мартенситна мікроструктура за незначного вмісту бейніту. На рис. 3.3 показано зміну мікроструктури поверхні та на рис. 3.4. серцевини сталі при збільшенні тривалості витримки при цементації від 1 до 6 год. Як видно, мікроструктура поверхневого шару практично не змінюється і являє собою дрібногочастий мартенсит (рис. 3.3, а, б).



а – цементация впродовж 1 години; б – цементация впродовж 6 годин.

Рисунок 3.3 – Мікроструктура поверхні зразків зі сталі 15Х після цементації та гартування у воді

Мікроструктура серцевини зазнає змін, пов'язаних із тим, що після 1-годинної цементації концентрація вуглецю в серцевині пластини практично не змінюється, і під час загартування формується низьковуглецевий мартенсит (рис. 3.4, а). Насичення ж вуглецем за 6 год призводить до підвищення концентрації вуглецю в серцевині пластини внаслідок дифузії і, як наслідок, до зміни морфології мартенситу (рис. 3.4, а, б).



а – цементация впродовж 1 години; б – цементация впродовж 6 годин.

Рисунок 3.4 – Мікроструктура серцевини зразків зі сталі 15Х після цементації та гартування у воді.

Експериментальні розподіли твердості за перерізом пластин після цементації та загартування наведено на рис. 3.5. Як видно, твердість поблизу поверхні не змінюється зі збільшенням тривалості витримки під час цементації і становить HRC 62 - 63. Це узгоджується з результатами спектрального аналізу поверхні пластин, які показали, що протягом 1 год витримки концентрація вуглецю на поверхні досягає рівноважного значення, що відповідає вуглецевому потенціалу пічного середовища 0,70 мас. %. Твердість серцевини зі збільшенням тривалості цементації від 1 до 6 год підвищується від HRC 43-44 до HRC 53-54.

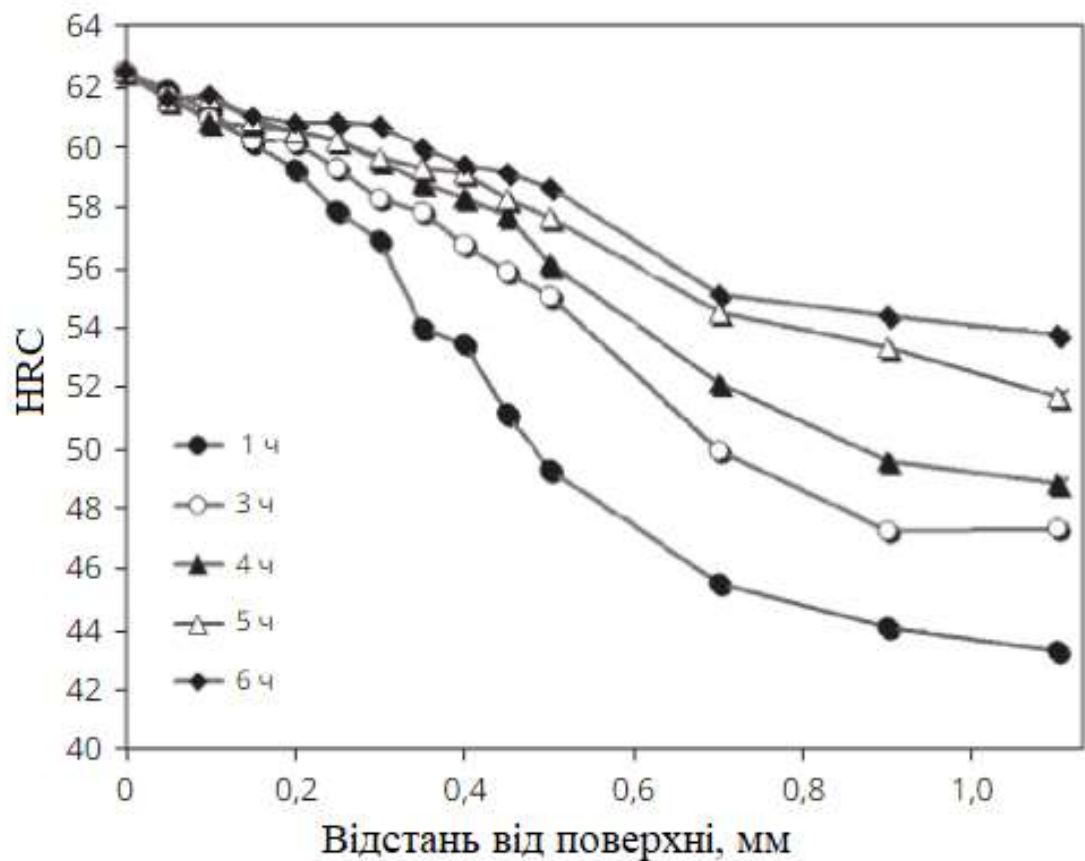


Рисунок 3.5 – Експериментальний розподіл твердості за перерізом зразків зі сталі 15X після цементації та гартування

Встановлено, що ефективна товщина дифузійного шару, відповідна відстані від поверхні пластини до точки з твердістю HRC 50 [4], збільшується від 0,5 мм за 1 год цементації до 0,9 мм за 4 год цементації. Таким чином, максимальна швидкість насичення (0,5 мм/год) спостерігається на самому початку цементації (на першій годині витримки), коли лімітуючим є перенесення атомів вуглецю з атмосфери на поверхню сталі [1, 4]. Зазвичай за стандартної газової цементації швидкість насичення становить $\sim 0,1$ мм/год [1, 12]. П'ятикратне збільшення швидкості на початку цементації, ймовірно, є особливістю каталітичного процесу, за якого підвищується активність атомів вуглецю в пічному середовищі. Подальше зменшення швидкості насичення (до 0,15-0,20 мм/год) - наслідок лімітуючого впливу дифузії на процес проникнення атомів вуглецю всередину пластини та зменшення градієнта

концентрації вуглецю в пластині.

Для визначення концентрації вуглецю за перерізом пластин після цементації (рис. 3.6) використовували результати вимірювання твердості мартенситу (див. рис. 3.5) і залежність твердості мартенситу від вмісту в ньому вуглецю (див. рис. 3.1). Отримані дані використовували для верифікації моделі дифузійного насичення сталі вуглецем, описаної вище.

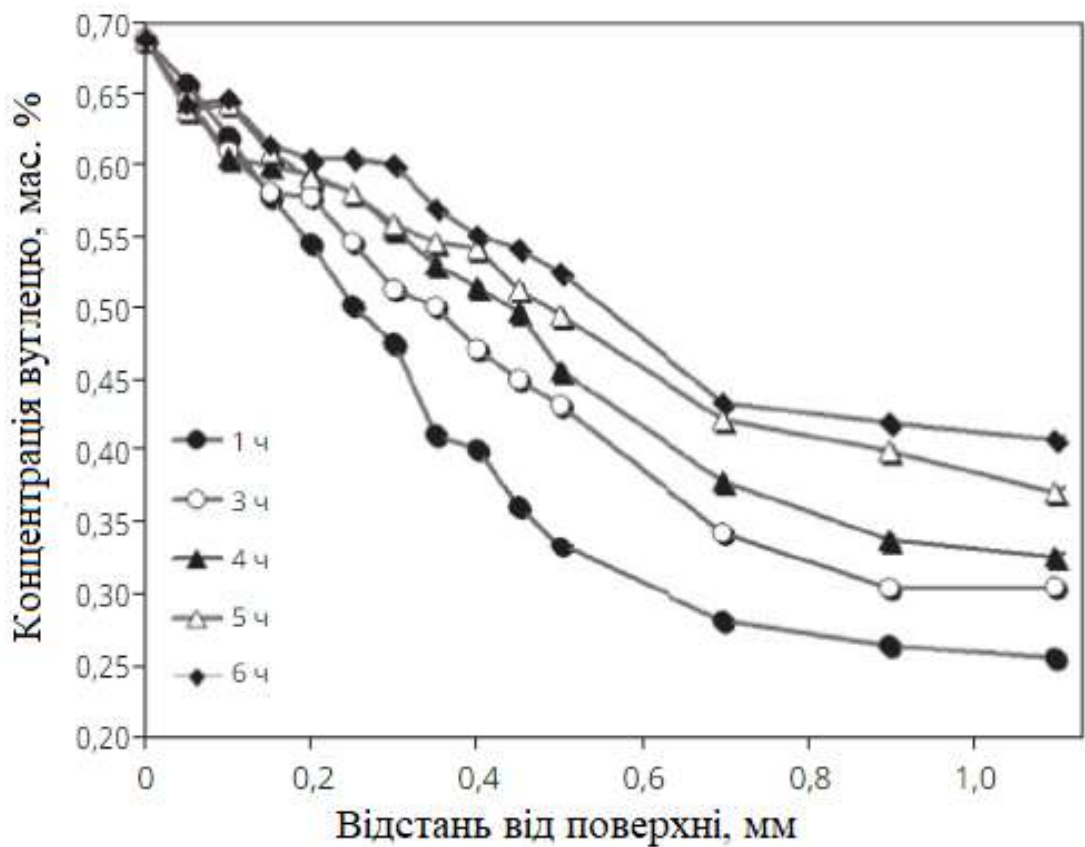


Рисунок 3.6 – Концентрації вуглецю за перерізом зразків зі сталі 15Х після цементації (розрахункові).

Як перше наближення прийняли припущення про постійний коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті, значення якого, визначене за рівнянням (3.9), становило $2,1 \cdot 10^{-11}$ м/с для температури цементації 930 ± 5 °С. При цьому задовільний збіг результатів розрахунку з експериментальними даними отримали тільки для 1-годинної цементації (рис. 3.7). В інших випадках (за 3 – 6-год цементації) в результаті чисельного моделювання отримали істотно

завищені значення концентрації вуглецю. Відхилення, які спостерігалися, найімовірніше, викликані тим, що в процесі цементації змінюється коефіцієнт дифузії вуглецю внаслідок зміни хімічного складу сталі та інших термодинамічних характеристик.

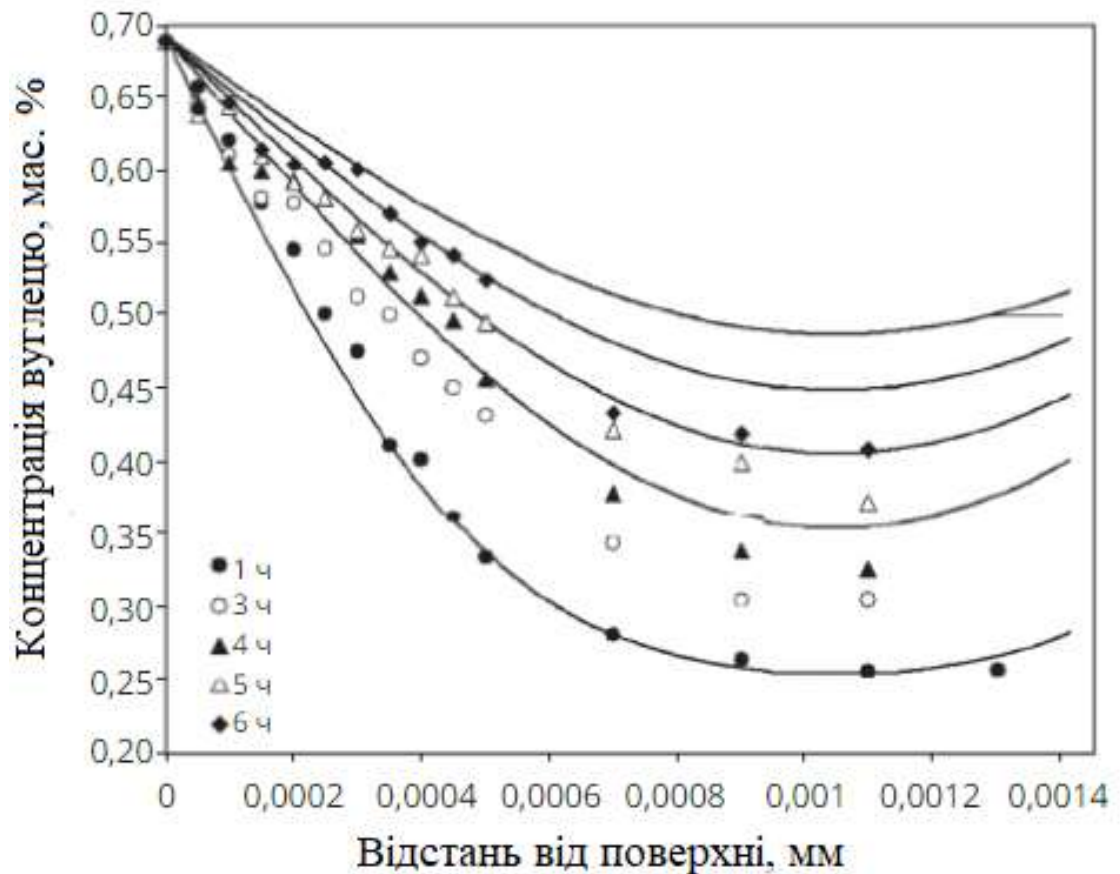


Рисунок 3.7 – Порівняння результатів експерименту і чисельного моделювання цементації зразків сталі 15Х з постійним коефіцієнтом дифузії.

Для підвищення точності розрахунку в модель ввели змінний коефіцієнт дифузії $D = f(\tau)$. Коефіцієнт дифузії варіювали на кожному кроці за часом для досягнення найкращого опису експериментальних даних. Отримані в результаті розрахунків концентрації вуглецю достатньо добре збіглися з експериментальними даними для всього дослідженого інтервалу тривалості цементації (рис. 3.8).

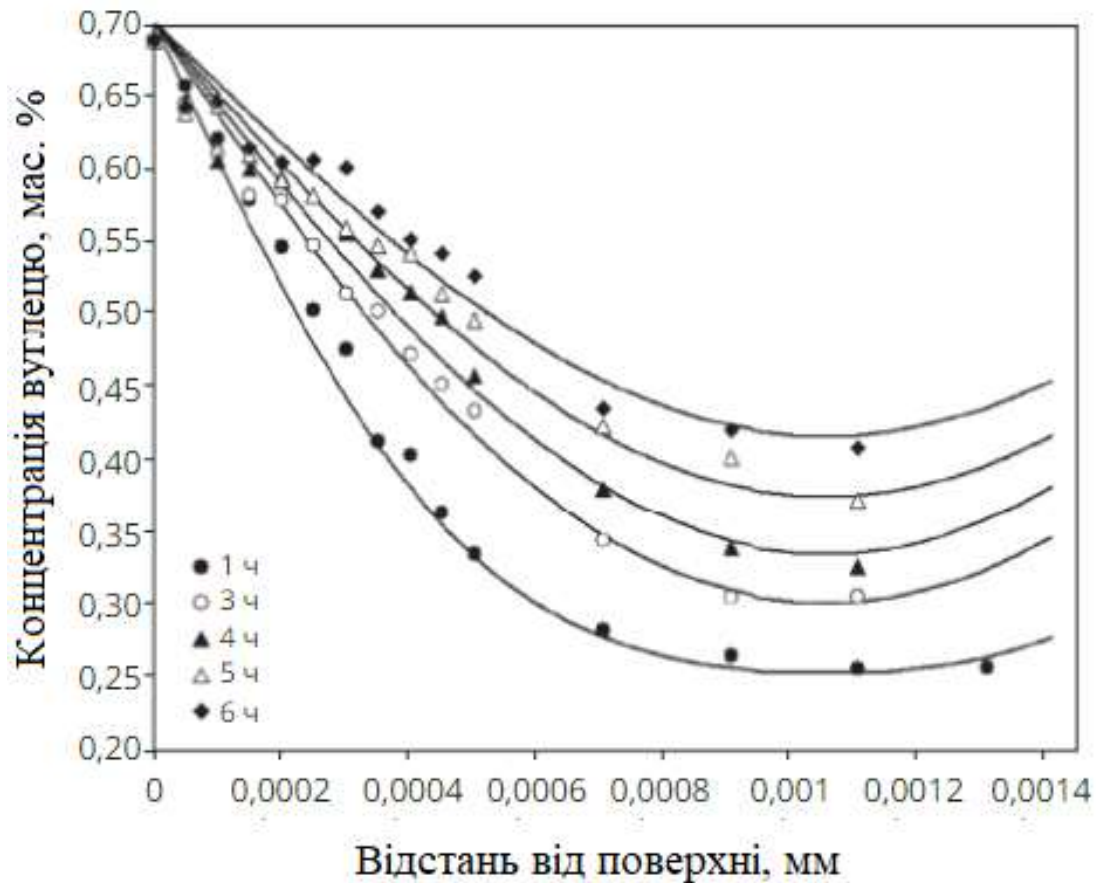


Рисунок 3.8 – Порівняння результатів експерименту і чисельного моделювання цементації зразків сталі 15Х з змінним коефіцієнтом дифузії.

Відповідну розрахункову зміну коефіцієнта дифузії вуглецю в часі наведено на рис. 3.9. Як видно, на початку цементації коефіцієнт дифузії максимальний ($2,1 \cdot 10^{-11}$ м/с). Потім спостерігається його зниження до мінімального ($1,2 \cdot 10^{-11}$ м/с) за ~ 3 -год цементації. Збільшення тривалості цементації призводить до незначної зміни D (від $1,3 \cdot 10^{-11}$ до $1,4 \cdot 10^{-11}$ м/с), що пов'язано зі зменшенням швидкості насичення внаслідок зменшення градієнта концентрації. Про це свідчить також той факт, що концентрації вуглецю за перерізом зразків після 5 і 6-годин цементації відрізняються незначною мірою (див. рис. 3.6).

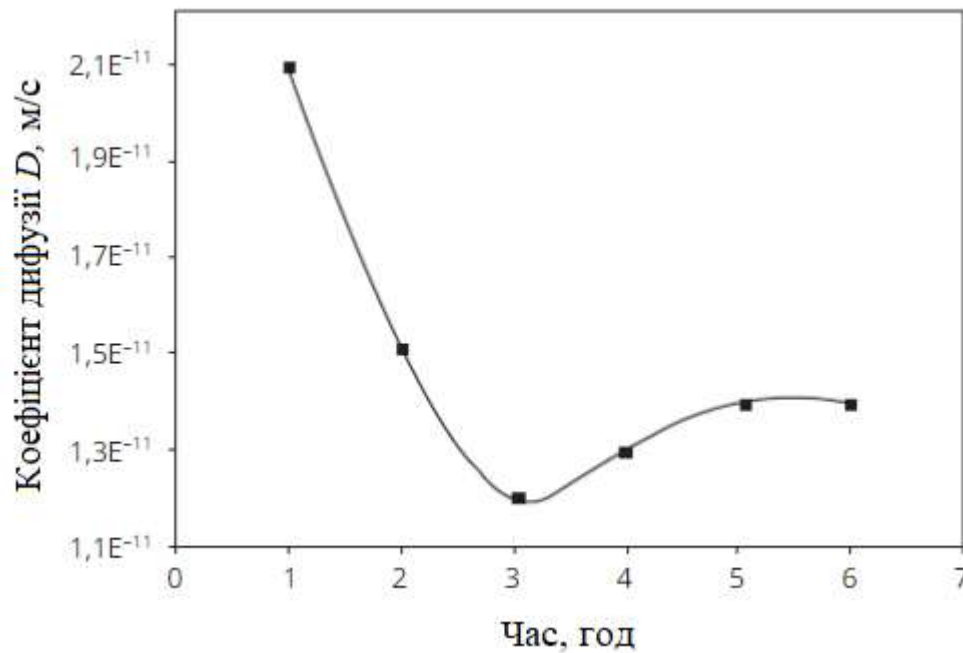


Рисунок 3.9 – Розрахункова зміна коефіцієнту дифузії вуглецю під час цементації

Таким чином, запропонована модель (див. рівняння 3.4 – 3.9) дає змогу з достатньою точністю визначати необхідні температурно-часові параметри процесу цементації для одержання необхідних параметрів дифузійного шару - товщини та концентрації вуглецю (а отже, твердості після гартування).

Розрахункові концентрації вуглецю за перерізом пластин для різної тривалості цементації (рис. 3.8) можуть бути апроксимовані поліномом четвертого ступеня:

$$C = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (3.10)$$

де C – концентрація вуглецю, мас. %;

x – відстань від поверхні зразка, м;

a, b, c, d, e – коефіцієнти поліному.

Було отримано набір коефіцієнтів полінома (3.10) для кожної дослідженої тривалості цементації пластин зі сталі 15Х. В свою чергу, це дало змогу встановити залежності коефіцієнтів полінома (3.10) від тривалості

цементациї τ :

$$a = -3,11 \cdot 10^9 \tau^3 + 4,71 \cdot 10^{10} \tau^2 - 2,34 \cdot 10^{11} \tau + 3,27 \cdot 10^{11}; \quad (11)$$

$$b = 1,29 \cdot 10^7 \tau^3 - 1,96 \cdot 10^8 \tau^2 + 9,70 \cdot 10^8 \tau - 1,35 \cdot 10^9; \quad (12)$$

$$c = -1,63 \cdot 10^4 \tau^3 + 2,49 \cdot 10^5 \tau^2 - 1,28 \cdot 10^6 \tau + 2,19 \cdot 10^6; \quad (13)$$

$$d = 1,29 \cdot 10^7 \tau^3 - 1,96 \cdot 10^8 \tau^2 + 9,70 \cdot 10^8 \tau - 1,35 \cdot 10^9; \quad (14)$$

$$e = -1,02 \cdot 10^{-4} \tau^3 + 1,64 \cdot 10^{-3} \tau^2 - 8,81 \cdot 10^{-3} \tau + 7,16 \cdot 10^{-1}. \quad (15)$$

Рівняння 3.10 – 3.15 можуть бути використані для експрес-оцінки розподілу концентрації вуглецю в дифузійному шарі для різної тривалості цементациї низьколегованих і вуглецевих сталей за вуглецевого потенціалу пічного середовища 0,70 мас. % і початкового вмісту вуглецю в сталі $0,25 \pm 0,05$ мас. %. Крім того, наведена методика розрахунково-експериментального дослідження процесу цементациї може бути використана надалі під час розроблення, коригування та аналізу хіміко-термічної обробки сталевих виробів на металургійних і машинобудівних підприємствах.

4 ЕКОНОМІЧНКА ЧАСТИНА

4.1 Тенденції розвитку світового ринку технологій

Розвиток промисловості несе за собою необхідність підвищення ефективності технології виробництва. Одним з найважливіших технологічних процесів при виготовленні деталей з низьколегованих конструкційних сталей, до яких висуваються підвищені вимоги до зносостійкості, є цементация. Існують декілька принципово відмінних технологічних рішень які можуть використовуватися для підвищення рівня зносостійкості майбутніх деталей, а саме газова цементация, цементация в твердому карбюризаторі, цементация в рідкому карбюризаторі, нітроцементация і гартування поверхневих шарів матеріалу струмом високої частоти.

Вагомим фактором підвищення прибутків є зменшення витрат на виробництво продукції. Останні дві наведені технології, а саме нітроцементация і гартування струмом високої частоти, висувають певні вимоги до матеріалів, що оброблюються, тому вони не завжди є доцільними. Цементация в рідкому карбюризаторі майже не використовується, через низьку якісь до отримуваних виробів і ефективність виробництва.

Найбільш широко використовувані технології цементации – це газова і в твердому карбюризаторі. З точки зору економічної доцільності використання даних технологій у кожної з них є свої недоліки і переваги.

Так як використання технології цементации в твердому карбюризаторі має низьку здатність до автоматизації для виготовлення виробів за цією технологією виникає необхідність залучати більше фахівців. Крім того виконання великих партій виробів не є можливим за цим методом.

В свою чергу газова цементация добре піддається автоматизації і підходить для виготовлення деталей будь-скільки складної форми. Однак обладнання яке використовується при цьому коштує значно більше. До того ж обидві технології можуть використовувати речовини носія вуглецю, більше

ніж того вимагається для виготовлення виробу. Тому оптимізація процесу виробництва є нагальною задачею, яка не тільки допоможе раціонально використовувати виробничі ресурси, зменшити необхідність людського втручання, а й підвищити ефективність роботи обладнання.

Передовими країнами що використовують у своєму виробництві методи цементації є Китай, Японія, Німеччина, Італія, Франція, Україна. Серед країн, що розвиваються - Індія, Бразилія, Мексика, Південна Корея та ін.

В таблиці 4.1 викладене уявлення про зміст ідеї та потенційні ринки, в межах яких можуть бути знайдені майбутні клієнти.

Таблиця 4.1 – Опис основної ідеї дипломного проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувачів
Основна ідея проекту полягає в оптимізації процесу газової цементації шляхом використання каталізатора та встановлення залежності часу цементації на якість отриманих виробів.	Виробництво деталей з низьколегованих конструкційних сталей, що працюють в умовах зношення	Збільшення довговічності
		Підвищення механічних властивостей
		Зменшення витрат ресурсів за рахунок оптимізації технології

В таблиці 4.2 викладені результати попереднього аналізу характеристик потенційного ринку.

Таблиця 4.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Головні конкуренти	Головними конкурентами оптимізації технології газової цементації є технології цементації в рідкому чи твердому карбюризаторі, сучасні розробки (іонна, плазменна цементації) та інші.
2	Динаміка ринку	Щорічне підвищення об'ємів продукції з використанням цементованих деталей свідчить про позитивну динаміку ринку (тобто ринок зростає)
3	Наявність обмежень для входу	Головними чинниками, що обмежують можливість виходу на ринок є: - фінансове – необхідність грошових вливань на модернізацію обладнання і інших витрат; - матеріальне – необхідність у високоякісних вихідних матеріалах (сировині); - кадрове – необхідність у спеціалістах котрі зможуть підтримувати виробничий процес на високому рівні.
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Обладнання, що буде використовуватися на виробництві має пройти сертифікацію. Крім того робочі місця мають відповідати вимогам техніки безпеки та охорони праці. Вироби мають відповідати висунутим вимогам.

Карта стейколдерів – це інструмент, що допомагає визначити, яким чином лідер компанії чи проекту може впливати на зацікавлені сторони. Важливим аспектом при складанні карти стейкохлдерів є включення всіх відносин, за допомогою яких компанія може впливати на людей інші компанії або, навпаки, люди можуть чинити вплив на підприємство та його діяльність.

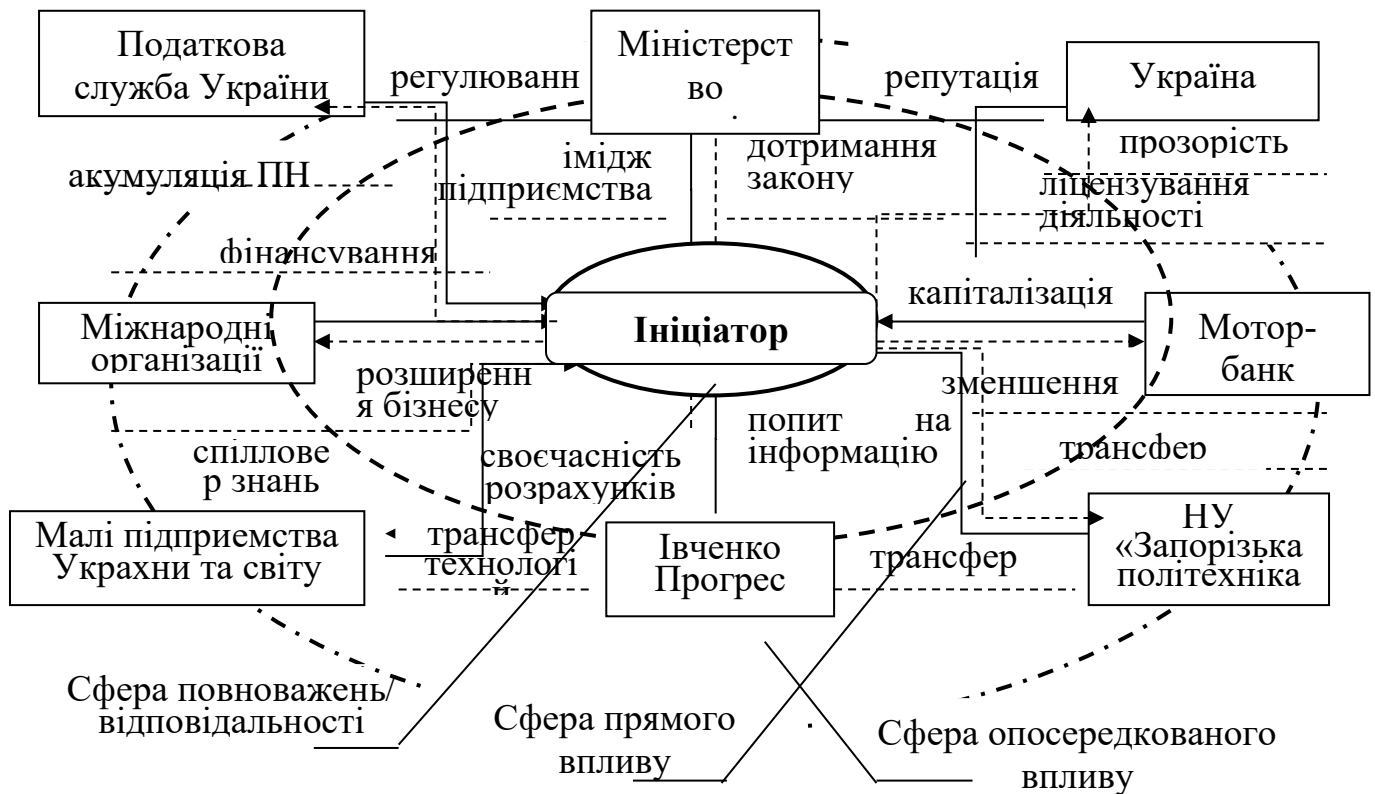


Рисунок 4.1 – Карта стейхолдерів

4.2 Техніко-економічні розрахунки

Метою даного розділу є економічне обґрунтування доцільності оптимізації технології газової цементації. В таблиці 4.3 наведені техніко-економічні показники виробів.

Вартість сировини та основних матеріалів розраховується на основі технічно обґрунтованих норм використання на виробництво одиниці виробу,

цін відповідних видів матеріальних ресурсів. При цьому враховуються транспортно-заготівельні витрати. Сума витрат на сировину та матеріали зменшується на величину зворотних відходів, які створюються в процесі виробництва.

Таблиця 4.3 – Техніко-економічні показники виробів

Найменування виробу	Базова технологія	Іновація
1. Шестерні з низьколегованої конструкційної сталі 15X	Стандартна газова цементация	Оптимізована газова цементация з використанням каталізатору
2. Програма випуску, шт	18000	18000

До складу витрат на виконання науково-дослідної роботи включається вартість всіх ресурсів, які необхідні для реалізації комплексу робіт.

Визначаємо витрати на оплату праці з урахуванням робочого часу одного працівника (таблиця 4.4, 4.5), визначаємо суму ЄСВ.

При виробництві деталей з низьколегованих конструкційних сталей застосовуються потужності плавильної дільниці, дільниці токарної обробки, поверхневої обробки, хіміко-термічної дільниці та травлення. Таким чином формується собівартість безпосередньо перед передачею в складальний цех, де здійснюється вузла складання.

Таблиця 4.4 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати виробничих працівників

Категорії працівників	Наявна чисельність, осіб		Тарифна ставка за розрядом виконуваних робіт, грн	Ефективний фонд робочого часу, год	Тарифний заробіток, грн	Преміальний відсоток до тарифного заробітку	Розмір премії, грн	Річний фонд заробітної плати, тис. грн	ЄСВ, тис. грн
	За зміну	На добу							
Виробничі працівники у тому числі: Основні працівники	30	45	40,52	190	346446,0	30	103933,8	450379,8	76218,1
Допоміжні працівники	20	25	36,50	198	180675,0	30	54202,5	234877,5	39748,5
Черговий та ремонтний персонал	15	20	42,10	206	173452,0	30	52035,6	225487,6	38159,4
Разом виробничих працівників	65	90	-	Всього	700573,0	-	210171,9	910744,9	154126,0

Таки чином фонд заробітної плати основних працівників з урахуванням преміальних виплат складає 910744,9 грн, тобто 50,6 грн. на одну деталь. Сума ЄСВ встановлена на рівні 22% від тарифного заробітку. Сума ЄСВ становитиме 154126 грн., тобто 8,56 грн на одиницю продукції.

Визначаємо склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу (табл. 4.5). Розраховуємо загальний посадовий оклад як добуток тарифу та 10% від річного фонду часу (186 годин) відповідної кількості працівників.

Таблиця 4.5 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу.

Посада	Наявна кількісні	Загальний посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до	Сума премій, грн	Загальний фонд оплати праці,	ЄСВ, грн
1	2	3	4	5	6	7
Начальник цеху	1	17093,4	20,0	3418,7	20512,1	3760,6
Заступник	2	29760,0	20,0	5952,0	35712,0	6547,2
Керівник груп	5	51708,0	20,0	10341,6	62049,6	11375,76
Майстри дільниць	5	42408,0	20,0	8481,6	50889,6	9329,76
Керівник ПДБ	1	11346,0	20,0	2269,2	13615,2	2496,1
Керівник ТБ	1	11904,0	20,0	2380,8	14284,8	2618,9
Керівник ФЕУ	1	10230,0	20,0	2046,0	12276,0	2250,6
Керівник БВ	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2
Керівник БТЗ	1	9858,0	20,0	1971,6	11829,6	2168,8
Керівник ВТК	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2
Механік цеху	1	9858,0	20,0	1971,6	11829,6	2168,8
Енергетик	1	9114,0	20,0	1822,8	10936,8	2005,1

Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4	5	6	7
Робітники ПДБ	3	22096,8	20,0	4419,4	26516,2	4861,3
Робітники ТБ	5	39060,0	20,0	7812,0	46872,0	8593,2
Робітники ФЕУ	2	15810,0	20,0	3162,0	18972,0	3478,2
Робітники БО	2	16963,2	20,0	3392,6	20355,8	3731,9
Робітник БТЗ	2	14359,2	20,0	2871,8	17231,0	3159,0
Керівник лабора- торії	5	55800,0	20,0	11160,0	66960,0	12276,0
Керівник відділу УК	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2
Робітник УК	2	16740,0	20,0	3348,0	20088,0	3682,8
Головний інженер	1	15047,4	20,0	3009,5	18056,9	3310,4
Констру -ктор	1	14061,6	20,0	2812,3	16873,9	3093,6
Майстер КБ	5	54498,0	20,0	10899,6	65397,6	11989,6
Головний металург	1	15177,6	20,0	3035,5	18213,1	3339,1
Головний метролог	1	11122,8	20,0	2224,6	13347,4	2447,0

Кінець таблиці 4.5.

1	2	3	4	5	6	7
Старший метролог	1	9653,4	20,0	1930,7	11584,1	2123,7
Головний технолог	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2
Майстер контролер	5	7179,0	20,0	1435,8	8614,8	1579,4
Всього	68	632566,8	-	126513,4	759080,2	139164,7

Таким чином, річний фонд заробітної плати адмінперсоналу складатиме 759080,2 грн. з урахуванням преміальних виплат, тобто 42,17 грн. на одиницю виробу. Сума ЄСВ для адміністративних працівників на рік становитиме 139164,7 грн, тобто 7,73 грн на одну деталь. Загальний ЄСВ становить 16,29 грн на одну деталь або 293290,7 грн.

Розраховуємо матеріальні витрати на виконання річної виробничої програми виготовлення деталей з низьколегованих конструкційних сталей за новою технологією.

Річна програма випуску розглядаємих деталей складає 180000 шт. За наявною у публічному доступі інформацією один кілограм сировини (сталі 15Х) складає в середньому 36 гривень 3 копійки. Середня маса виготовляємих деталей складає близько 1 кілограма. Таким чином вартість сировини, що витрачається на виробництво дорівнює 648524 гривні 42 копійки.

Загалом сировини та матеріалів витрачається 998550 грн, що становить 55,475 грн на одну деталь.

Розраховуємо вартість спожитих послуг, під час виробництва (табл. 4.6).

До розрахунку електропостачання необхідно віднести вартість електроенергії витраченої на переплавлення, токарну обробку, зачистку, полірування, термічну обробку у печах, травлення у електролітичних ваннах та освітлення відповідних ділянок.

Тариф на купівлю електроенергії ПАТ «Запоріжжяобленерго» складає 1,705 грн за кВт/год. Тариф на розподіл електроенергії для підприємств другого класу складає 0,653 грн за кВт/год. Таким чином вартість одного кВт/год складає 2,356 грн.

Витрата електроенергії загальна на одну садку складає 600 кВт/год, що становить 1413,6 грн, тобто 18,848 грн на одну лопатку.

Витрати на освітлення на годину складають 23,56 грн.

Вартість електроенергії першої дільниці складає 19,7904 грн на одні деталь.

Вартість електроенергії на токарну обробку складає 4,7832 грн на одну деталь.

Вартість всієї поверхневої обробки складатиме 2,5601 грн на одну деталь.

Вартість хіміко-термічної обробки складатиме 4,4764 грн на одну деталь.

Вартість електроенергії на травлення складатиме 1,8848 грн на одну деталь.

Загальні витрати на електроенергію становлять 33,4949 грн на одну деталь.

Тариф на водопостачання та водовідведення становить 54,888 грн на 12 м³.

Вартість тепла становить 34,56 грн на 1м³ у зимовий період. Вартість газу розраховується виходячи із використання у термічній обробці та подачі кисню в охолоджувачі.

Для оптимізованої технології вартість електропостачання та витрати газу на хіміко-термічну обробку скорочується в чотири рази.

Таблиця 4.6 – Розрахунок вартості споживчих послуг для стандартної і оптимізованої технології.

Вид послуг	Норматив у розрахунку на одиницю продукції		Виробнича програма, шт	Тариф, грн	Сума, грн	
	Стандартна технологія	Оптимізована технологія			Стандартна технологія	Оптимізована технологія
Електропостачання	33,49	8,38	18000	2,356	602908,2	150727,1
Водопостачання	3,21			54,89	57841,2	
Теплопостачання	5,76			34,56	103680,0	
Газопостачання	7,25	1,81		-	130620,6	32655,2
Разом	49,72				895050,0	344903,5

Визначаємо річну суму амортизації з урахуванням первісної вартості основних засобів та норми амортизації (табл. 4.7). Час використання становить 10% від загального річного на ділянці. Амортизація розраховується за наступною формулою:

$$B_p = (B_n^n - Z_v^n + \sum Z_n^{n-1}) \cdot A^n / 100 \quad (4.1)$$

де B_n^n – початкова вартість основних засобів n-ного періоду;

Z_v^n – вартість засобів, що вибули за відповідний період;

Z_n - вартість засобів, що надійшли за відповідний період;

Оскільки важко здогадатися в якому з місяців були введені які кошти, зробимо загальний розрахунок витрат на рік за остаточною вартістю ОЗ із нормою амортизації, і віднесемо 10% її до вартості випуску деталей.

Таблиця 4.7 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Норма амортизації, %	Первісна вартість ОЗ, тис. грн	Надійшло ОЗ, тис. грн	Вибуло ОЗ, тис. грн	Сума амортизації, тис. грн
Будівлі	2	23667	-	-	473,3
Споруди	3	7560	-	-	226,8
Передавальні і пристрої	5	5540	230	250	276,0
Машини та обладнання	8	93720	1200	5810	7128,8
Інструменти, інвентар	10	2250	150	-	240,0
Інші основні засоби	10	275	25	-	30,0
Тара	20	500	120	100	104,0
Предмети прокату	10	1280	120	200	120,0
Разом	-	134792	1845	6360	8598,9

Таким чином загальна амортизація складає 8598900 грн.

Амортизація, яку можна віднести на виробництво деталей відповідно становить 859890 грн, або 47,77 грн на одну деталь

Визначаємо повну собівартість одиниць продукції виготовленої за стандартною технологією і за запропонованою.

Витрати на утримання та експлуатацію основних засобів (поточний ремонт) приймаємо за 0,2 % від фактичної вартості.

Калькуляція собівартості виробів виготовлених за стандартною і оптимізованою технологіями наведена в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Калькуляція собівартості ціни на вироби

Калькуляційні статті	Витрати, грн			
	По стандартній технології		По оптимізований технології	
	Розрахунок на одиницю продукції	Розрахунок на весь річний обсяг продукції	Розрахунок на одиницю продукції	Розрахунок на весь річний обсяг продукції
1	2	3	4	5
Сировина та матеріали	55,49	998550,00	55,49	998550,00
Електропостачання	33,49	602908,20	8,38	150727,10
Водопостачання	3,21	57841,20	3,21	57841,20
Теплопостачання	5,76	103680,00	5,76	103680,00
Газопостачання	7,25	130620,60	1,81	32655,20
Разом	105,2	1893600,00	74,65	1343453,50
Заробітна плата основних виробничих працівників	50,60	910744,90	50,60	910744,90
ЄСВ	16,29	293290,70	16,29	293290,70
Амортизація	47,77	859890,00	47,77	859890,00
Витрати на утримання та експлуатацію основних засобів, поточний ремонт	14,98	269584,00	14,98	269584,00
Загальновиробничі витрати	15,56	280072,10	15,56	280072,10

Кінець таблиці 4.8

1	2	3	4	5
Виробнича собівартість	250,40	4507181,70	219,85	3957035,20
Адміністративні витрати	42,17	759080,20	42,17	759080,20
Інші витрати	2,11	37980,00	2,11	37980,00
Повна собівартість	294,68	5304241,90	264,13	4754095,40

Таким чином повна собівартість деталей за стандартною технологією складає 294,68 грн. В свою чергу за оптимізованою технологією собівартість складе 264,13 грн.

Економічна ефективність використання оптимізованої технології визначаємо таким чином:

$$E = (C_6 - C_o) \cdot N, \text{ грн.} \quad (4.2)$$

де C_6 – собівартість виробів, що виготовляються за стандартною технологією;

C_o - собівартість виробів, що виготовляються за оптимізованою технологією.

$$E = (294,68 - 264,13) \cdot 18000 = 549900 \text{ грн.}$$

В результаті економічних розрахунків встановлено, що деталі виготовлені за оптимізованою технологією, має і меншу собівартість, яка становить 264,13грн. Таким чином економічний ефект склав 549900грн Отже можна зробити висновок, що застосування оптимізованої технології цементації є доцільним в економічному плані завдяки меншій собівартості отриманих виробів.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У цьому розділі представлені основні принципи забезпечення безпеки праці під час проведення досліджень можливостей вдосконалення технології цементації низьколегованих конструкційних сталей.

5.1 Аналіз потенційних небезпек

- Ураження електричним струмом в результаті порушення правил електробезпеки, несправності обладнання для підготовки дослідницьких зразків може призвести до електричних травм або летального наслідку.

- Термічні опіки внаслідок торкання нагрітих поверхонь обладнання або зразків, знехтування індивідуальними захисними засобами.

- Хімічні опіки внаслідок необережного поводження з травильниками при травленні мікрошліфів.

- Механічні травми при виготовленні зразків для металографічних досліджень структури при використанні обладнання з частинами, що обертаються.

- Незадовільні параметри повітряного середовища на робочому місці через неправильну систему кондиціювання призводять до захворювання органів дихальних шляхів та легенів, а також негативно впливають на шкіру та очі.

- Напруженість праці-характеристика трудового процесу, що пов'язана з навантаженням переважно на центральну нервову систему, органи чуття, емоційну сферу працівника - монотонність, емоційні перевантаження, що може призвести до роздратованості, зниження насаги на дотримання правил

безпеки, втоми та перевтоми, втрати працездатності.

- Незадовільні ергономічні умови робочого місця, внаслідок використання застарілого офісного обладнання, не відповідності параметрів робочого місця антропометричним характеристикам виконавця., що може призвести до зниження працездатності та пошкоджень опорно-рухового апарату.

- Недостатнє освітлення через вихід з ладу освітлювальних приладів та неправильного їх розміщення впливає на функціонування зорового апарату, тобто визначає зорову працездатність, на психіку людини, її емоційний стан, викликає втому центральної нервової системи, що виникає в результаті докладених зусиль для впізнання чітких чи сумнівних сигналів.

- Можливість загоряння внаслідок порушення правил безпеки чи виходу з ладу обладнання може призвести до пожежі.

- Не правильні дії в надзвичайних ситуаціях через недотримання правил дії при надзвичайних ситуаціях може призвести до паніки.

5.2 Заходи по забезпеченню загальної безпеки

Для запобігання ураження електричним струмом електрообладнання має відповідати ДСТУ 12.2.007.0-75 «Вироби електротехнічні. Загальні вимоги безпеки», ДСТУ 12.2.003-91 «Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки» и ПУЕ-2007. Експлуатація електрообладнання та електроустановок має проводитися відповідно «Правила технічної експлуатації електроустановок» (ПТЕ), «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачем» та «Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачем».

Для забезпечення захисту від випадкового торкання до струмопровідних частин необхідно прийняти наступні способи і засоби: захисне

огородження; ізоляція струмопровідних частин; захисне відключення; блокування; знаки безпеки. Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при торканні до металевих не струмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою в наслідок пошкодження ізоляції, застосовують захисне заземлення, занулення, вирівнювання потенціалу системи захисних дротів, захисне відключення, ізоляцію не струмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою вище 24 В. засоби індивідуального захисту та ін. Всі металеві частини виробничого обладнання (станини, корпуси, електродвигуни, каркаси пультів керування та ін.), якщо вони можуть опинитися під напругою вище 42 В, мають бути заземлені згідно ПУЕ-2007.

Для цього їх оснащують легко оглядним пристроєм заземлення $K < 4 \text{ Ом}$ або з'єднують з нульовим дротом.

Для уникнення хімічних опіків передбачено:

- зберігання кислот у місцях, де можливе їх стикання з деревиною, та іншими речовинами органічного походження (для нейтралізації випадково розлитих кислот місця їх зберігання необхідно забезпечувати готовими розчинами крейди, вапна або соди);

- під час зберігання азотної та сірчаної кислот треба вжити заходів до недопущення стикання їх з деревиною, та іншими речовинами органічного походження. Концентровану азотну кислоту не дозволяється розливати у скляні сулії.

- під час роботи використовувати гумові рукавиці ДСТУ 20010-93 «Рукавички гумові технічні. Технічні умови», окуляри «Окуляри захисні» ДСТУ Р 12.4.013-97, респіратор ДСТУ 12.4.028-76 ССБТ. Респіратори ШБ-1 "Пелюстка ". Технічні умови (зі змінами № 1, 2), спеціальний одяг ДСТУ 12.4.011-89 «Засоби захисту працюючих»;

- мати поблизу нейтралізуючі речовини, аптечку, джерело проточної води;

Заходи безпеки при роботі на шліфувальних і заточувальних верстатах:

- установка абразивних кіл на верстатах повинна проводитися тільки

спеціально проінструктований наладчиками;

- перед установкою коло ретельно оглянути на відсутність тріщин;
- користуватися колами, мають тріщини або вибоїни, забороняється.

Круги абразивні повинні мати штамп або наклейку про випробування - порядковий номер кола і підпис особи, відповідальної за випробування. Використання кіл без відмітки про випробування забороняється. Дані про випробування кожного кола записуються в журнал випробувань кола;

- у кожного верстата вивішати табличку із зазначенням допустимої роботи окружної швидкості використовуваних кіл і частоти обертання шпинделя верстата в хвилину;

- обертається абразивний круг , виступаючі кінці шпинделя і кріпильні деталі захистити захисними кожухами;

- підручники повинні мати достатню за величиною майданчик для стійкого положення оброблюваного виробу. Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею шліфувального круга повинен бути не більше 3 мм;

- при заточуванні інструменту не ставати проти поворотного круга. Стояти дозволяється поза небезпекою обертання кола (каменя);

- при роботі на верстаті підводити деталь необхідно плавно , не допускати ударів деталі про коло;

- при виявленні биття кола необхідно зупинити верстат і встановити несправність;

- при заточуванні інструмент надійно тримати в руках , щоб не допустити заклинювання його між підручником і кругом. Під час роботи заточувальних верстатів не допускається: зачищати коло і торкатися його руками ;

- користуватися несправними і невипробуваними колами ;
- відкривати захисні кожухи кола , вала, шпинделя, шківа, ремня;
- одягати, знімати і перекладати ролики;

- працювати без підручника , захисного екрана або окулярів, якщо верстат не заземлений і не обладнаний установкою для відсмоктування

абразивного пилу. ДСТУ 12.3.028-82 «Процеси обробки абразивним і ельборовим інструментом».

Напруженість праці визначається згідно ГН 3.3.5-8-6.6.1-2002 «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Для профілактики втоми застосовують скорочену тривалість робочого дня, враховують засоби механізації, автоматизації, застосовують раціональну організацію трудового процесу, максимально скорочують статичні операції, усувають зайві прийоми у роботі і т. ін.

Важливе значення для профілактики втоми має режим праці та відпочинку, що передбачено в КЗпП. Завдяки періодам відпочинку, що регламентується законодавством, працездатність відновлюється, що є функціональною властивістю організму людини.

При обладнанні робочого місця для проведення дослідницьких робіт необхідно враховувати, що конструкція всіх елементів виробничого обладнання, з якими людина в процесі трудової діяльності здійснює безпосередній контакт, повинна відповідати його антропометричним характеристикам, при виконанні робіт в сидячому положенні в конструкцію робочого місця слід включити крісло і підставку для ніг, а також передбачити в конструкції виробничого обладнання простір для розміщення ніг, що дозволяють виконувати роботи при високій посадці працюючого згідно 12.2.049-80 ССБТ «Обладнання виробниче. Загальні ергономічні вимоги». Робоче місце при виконанні робіт в положенні сидячі повинно відповідати вимогам ДСТУ 12.2.032-78 «Робоче місце при виконанні робіт сидячи. Загальні ергономічні вимоги», в положенні стоячи – ДСТУ 12.2.033-78 «Система стандартів безпеки праці. Робоче місце при виконанні робіт стоячи. Загальні ергономічні вимоги».

5.3 Заходи із забезпечення виробничої санітарії і гігієни праці

Для забезпечення задовільних параметрів повітряного середовища робочого простору (температура, вологість, швидкість переміщення повітряних мас) обов'язковим є кондиціювання приміщення згідно ДСТУ 2.2.137-96 «Устаткування для кондиціювання повітря та вентиляції. Загальні вимоги безпеки», ДСТУ 2.04.05-91 «Опалення, вентиляція та кондиціювання», ДСТУ 30646-99 «Кондиціонери центральні загального призначення. Загальні технічні умови», ДСТУ 12.1.005-88 ССБТ «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони».

Вибір системи освітлення залежить від зорових робіт і визначається за Державними будівельними нормами України ДБН В.2.5- 28-2006 «Природне і штучне освітлення», ДСТУ 12.2.007.13-2000 ССБТ «Лампи електричні. Вимоги безпеки», ДСТУ МОК 60598-2-2- 2002 «Світильники. Частина 2. Приватні вимоги. Розділ 2. Світильники вбудовані».

При цьому враховується вимога, що при виконанні в приміщеннях робіт І—ІІІ, IVа, IVб, IVв, Va розрядів слід застосовувати систему комбінованого освітлення. Використання системи загального освітлення передбачено при технічній неможливості або недоцільності влаштування місцевого освітлення при узгодженні з органами державного санітарного нагляду.

Освітленість робочої поверхні, створена світильниками загального освітлення в системі комбінованого, повинна складати не менше 10 % нормованої для комбінованого освітлення при таких джерелах світла, які застосовуються для місцевого освітлення. При цьому освітленість повинна бути не менше 200 лк при розрядних лампах, не менше 75 лк - при лампах розжарювання. Створювати освітленість від загального освітлення в системі комбінованого більше 500 лк при розрядних лампах і більше 150 лк при лампах розжарювання допускається тільки за наявності обґрунтувань [22].

Нормою освітлення для приміщень дослідницької лабораторії є 300лк.

Розрахунок освітленості приміщення дослідницької лабораторії

1. Визначаємо сумарний світловий потік освітлювальної установки Φ_{Σ}

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot A \cdot B \cdot K_z \cdot z}{\eta} \quad (5.1)$$

де E_n – рівень нормованого загального освітлення, лк;

A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

K_z – коефіцієнт запасу;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{300 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,62} = 31935 \text{ лм}$$

2. Вибір світильника та відповідної лампи

Обираємо світильник типу ЛПП та лампу ЛХБ ($\Phi_{\text{л}}=2840\text{лм}$).

3. Розрахунок кількості світильників та ламп

$$N_{\text{св}} = \frac{\hat{O}_{\Sigma}}{\hat{O}_{\text{Е}}} \frac{\Phi_{\Sigma}}{\Phi_{\text{л}}} \quad (5.2)$$

$$N_{\text{св}} = 11,24 = 12 \text{ штук}$$

4. За умови встановлення двох ламп в один світильник отримуємо 6 світильників по 2 лампи.

5. Чисельна перевірка типу світильника і кількості стандартних ламп

$$E_p = (-10\% \dots +20\%) \cdot E_n \quad (5.3)$$

Розраховуємо загальну розрахункову освітленість

$$E_p = \frac{\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} \cdot \eta}{A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z} \quad (5.4)$$

$$E_p = \frac{2840 \cdot 12 \cdot 0,62}{8 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 320 \text{лк}$$

Загальна розрахункова освітленість становить 320 лк, що потрапляє в інтервал $E_p = 270 \leq 320 \leq 360$ лк. Отже, рівень освітленості задовільний.

5.4 Заходи щодо забезпечення безпеки у випадку надзвичайних ситуацій

5.4.1 Заходи щодо забезпечення пожежної безпеки

Для попередження пожеж передбачається використовувати первинні засоби пожежогасіння. До них відносяться: вогнегасники, пожежний інвентар (покривала з негорючого полотна, ящика з піском, бочки з водою, пожежні відра, совкові лопати, ломы, сокири тощо), системи автоматичного пожежогасіння.

Первинні засоби пожежогасіння, в залежності від категорії приміщень, можуть розташовуватись як окремо, так і в складі пожежних щитів.

Також необхідно періодично проводити протипожежні інструктажі, навчання та тренування персоналу.

За вибухо–пожежною небезпекою приміщення й будівлі поділяють на п'ять категорій: А, Б, В, Г, Д. Встановлення категорії приміщення виконується шляхом послідовної перевірки належності приміщення до категорій від найвищої (А) до на найнижчої (Д) з урахуванням характеру технологічних процесів і пожежонебезпечних властивостей речовин, що в них застосовується, з метою виявлення можливих обставин і причин виникнення вибухів і пожеж та їх наслідків.

Приймаємо категорію Д, так як ця категорія більш підходить по характеристиці речовин і матеріалів, що зберігаються в приміщенні, а саме знаходяться незаймисті речовини і матеріали в холодному стані, а також кабельні електропроводки до устаткування, окремі предмети меблів на місцях.

Визначення класу пожежі. Залежно від агрегатного стану й особливостей горіння різних горючих речовин й матеріалів пожежі за ДБНВ.1.1.7–2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» поділяються на відповідні класи та підкласи:

1. Клас А – пожежі твердих речовин, переважно органічного походження, горіння яких супроводжується тлінням (деревина, текстиль, папір);
2. Клас В – пожежі горючих рідин або твердих речовин, які розтоплюються;
3. Клас С – пожежі газів;
4. Клас D – пожежі металів та їх сплавів;
5. Клас Е (додатковий) – пожежі, пов'язані з горінням електроустановок.

Обираємо клас Е (додатковий) пожежі, пов'язані з горінням електроустановок.

Вибір типу та визначення необхідної кількості первинних засобів пожежогасіння. Визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння слід проводити з урахуванням фізико–хімічних та пожежонебезпечних властивостей горючих речовин, їх взаємодії з вогнегасними речовинами, а також розмірів площ виробничих приміщень, відкритих майданчиків та установок.

Необхідну кількість первинних засобів пожежогасіння визначають окремо для кожного поверху та приміщення, а також для майданчиків та установок.

Пожежний інвентар з пожежним інструментом і вогнегасниками розміщується на спеціальних пожежних щитах (стендах). Такі щити (стенди) відповідно до "Правил пожежної безпеки в Україні" встановлюють на

території об'єкта з розрахунку один щит (стенд) на площу 5000 м². До комплекту засобів пожежогасіння, які розміщують на стенді, слід включити: вогнегасники – 3 шт.; ящик із піском – 1 шт.; пожежне покривало розміром 2×2 м – 1 шт.; гаки – 3 шт.; лопати – 2 шт.; ломи – 2 шт.; сокири – 2 шт. Ящик із піском, який є елементом конструкції пожежного щита (стенда), повинен мати ємність не менше 0,1 м³ та виключати потрапляння в нього опадів.

Серед первинних засобів пожежогасіння особливе місце займають вогнегасники, які відзначаються високою ефективністю дії.

Вибір типу та визначення потрібної кількості вогнегасників здійснюється згідно вогнегасної здатності вогнегасників, граничної площі, класу пожежі горючих речовин та матеріалів у захищуваному приміщенні, або на об'єкті (стандарт ISO 3941–77). Крім перерахованих параметрів береться до уваги також категорія приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

Вибір типу вогнегасника (пересувний чи переносний) зумовлений розмірами можливих осередків пожеж; у разі збільшених їх розмірів рекомендується використовувати пересувні вогнегасники.

Відстань від можливого осередку пожежі до місця розташування вогнегасника не має перевищувати: 20 м – для громадських будівель та споруд; 30 м – для приміщень категорій А, Б, В (горючі гази та рідини); 40 м – для приміщень категорій В, Г; 70 м – для приміщень категорії Д.

Своєчасне виявлення ознак займання і виклик пожежних підрозділів дає змогу швидко локалізувати осередки пожежі та вжити заходи щодо її ліквідації, а отже, створює можливість суттєво зменшити обсяги заподіяної шкоди. Найшвидшим та найнадійнішим засобом сповіщення про виникнення пожежі вважаються установки електричної пожежної сигналізації (ЕПС).

Залежно від схеми з'єднання розрізняють променеві (радіальні) та кільцеві установки ЕПС. В установках ЕПС можуть обладнуватися адресні та не адресні пожежні сповіщувачі. Не адресним вважається автоматичний

сповіщувач, який реагує на фактори, що супроводжують пожежу в місці його встановлення, та формує сигнал про виникнення пожежі в захищуваному приміщенні без зазначення свого номера (адреси). Адресний сповіщувач постійно або періодично активно формує сигнал про стан пожежонебезпечності у захищуваному приміщенні та про власну працездатність із зазначенням свого номера (адреси).

5.4.1 Забезпечення безпеки в разі виникнення надзвичайних ситуацій

Найбільшу небезпеку для життєдіяльності виробничого персоналу представляють аварії технічних систем. Причинами аварій можуть бути стихійні лиха, порушення режимів технологічних процесів (недотримання технологічної дисципліни) або правил експлуатації виробничого, енергетичного, транспортного та інше обладнання, а також правил техніки безпеки.

З особливостей небезпечних аварій слідує: захисні заходи і, перш за все, прогнозування, виявлення і періодичний контроль за змінами обстановки, оповіщення персоналу підприємства повинні проводитися з надзвичайно високою оперативністю. Локалізація джерела надходження СДОР в навколишнє середовище має вирішальну роль в попередженні масової поразки людей. Швидке здійснення цієї задачі може направити аварійну ситуацію в контрольоване русло, зменшити викид СДОР і істотно знизити збитки.

Захист від СДОР являє собою комплекс заходів, що здійснюються з метою виключення або максимального послаблення поразки персоналу і збереження його працездатності.

Комплекс заходів по захисту від СДОР включає:

1. Інженерно-технічні заходи щодо зберігання і використання СДОР;

2. Підготовку сил і засобів для ліквідації хімічно небезпечних аварій ;
3. Навчання їх порядку і правилам поведінки в умовах виникнення аварій;
4. Оповіщення про безпосередню загрозу поразки СДОР;
5. Тимчасову евакуацію з небезпечних районів;
6. Хімічну розвідку району аварії ;
7. Пошук і надання медичної допомоги постраждалим ;
8. Локалізацію та ліквідацію наслідків аварії .

Обсяг і порядок здійснення заходів щодо захисту багато в чому залежать від конкретної обстановки, яка може скластися в результаті аварії, наявність часу, сил і засобів для здійснення заходів з захисту та інших факторів.

Всі заходи щодо захисту відображаються в плані захисту об'єкта, який розробляється завчасно з участю всіх головних фахівців об'єкту. План розробляється, як правило, текстуально з додатком необхідних схем, що вказують розміщення об'єкту, сил і засобів ліквідації наслідків аварії, їх організацію і т.д. Він складається з декількох розділів і визначає підготовку об'єкту до захисту та порядок ліквідації наслідків аварії згідно з ДБН В.1.2-4-2006 «Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони)».

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасних технологій цементації. Встановлені переваги та недоліки кожної з них. Визначена загальні проблеми з якими можна зіткнутися при виконанні процесу цементації.

2. Проведено загальний аналіз основних характеристик, що притаманні низьколегованим конструкційним сталям. Розглянуто структуру яка отримується в процесі цементації.

4. Визначено потенційні напрямки удосконалення процесу цементації. Обрано метод оптимізації технології газової цементації, а саме застосування каталізатору крізь який проходить газова суміш (карбюризатор) утворюючи при цьому активні іони вуглецю.

3. Експериментально досліджено кінетику насичення вуглецем зразків з низьколегрованої конструкційної сталі 15X у процесі газової цементації за вуглецевого потенціалу 0,70 мас. %. Встановлено, що в першу годину процесу швидкість насичення становить близько 0,5 мм/год, це значно вище, ніж за стандартної газової цементації без каталізатора. Крім того, каталітична газова цементація протягом 1 год забезпечує на поверхні пластин концентрацію вуглецю, що відповідає вуглецевому потенціалу пічного середовища.

4. Визначено розподіл твердості в дифузійному шарі вуглецевих пластин після загартування. На підставі залежності твердості мартенситу від вмісту в ньому вуглецю, наведеної в довідниках, отримано профілі концентрації вуглецю в дифузійному шарі пластин після каталітичної газової цементації різної тривалості.

5. Запропоновано спрощену методику моделювання каталітичної газової цементації сталевих пластин на базі чисельного розв'язання диференційного рівняння дифузії в одновимірній постановці. Показано, що адекватний опис експериментальних профілів концентрації вуглецю в дифузійному шарі досліджуваних пластин досягається при використанні в моделі змінного в часі

коефіцієнта дифузії вуглецю.4. Отримано рівняння, що дають змогу провести експрес-оцінку розподілу концентрації вуглецю в дифузійному шарі після різної тривалості каталітичної газової цементації більшості конструкційних сталей, що цементуються.

6. Визначена економічна доцільність використання оптимізованої технології цементації у порівняннях з стандартною технологією. Розраховано економічний ефект, який складає 549900 грн на рік.

7. Для забезпечення безпеки життя та здоров'я працівників лабораторії під час проведення досліджень було встановлено необхідні заходи з техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці, а також з пожежної безпеки та у надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. George K. Steels: Heat treatment and processing principles. Materials Park, Ohio : ASM International, 1989. 497 p.
2. Carnegie-Illinois Steel Corporation. Research and Technology Dept. Suiting the heat treatment to the job: A simple discussion of the problems of heat treatment ... [Pittsburgh] : United States Steel, 1946. 54 p.
3. ASM materials engineering dictionary / ed. by J. R. Davis & Associates., A. International. [Metals Park, Ohio] : ASM International, 1992. 555 p.
4. Steel and its Heat Treatment : a Handbook / ed. by T. Holm, P. Olsson, E. Troell. — Sweden : Swerewa IVF, 2012. — 832 p.
5. Stuart B. H. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
URL: <https://doi.org/10.1002/0470011149> (date of access: 05.12.2023).
6. Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing. / L. F. Shampine et al. *The American Mathematical Monthly*. 1987. Vol. 94, no. 9. P. 889.
URL: <https://doi.org/10.2307/2322833> (date of access: 05.12.2023).
7. Edenhofer B., Joritz D., Rink M., Voges K. Carburizing of steels / in “Thermochemical Surface Engineering of Steels”. — Elsevier Ltd., 2015 P. 485 – 553.
8. Syropyatov V. Ya. Automated modular complex MPPA-SSI12 — a breakthrough technology for «liquid» cementation // *Metallurgist*. 2011. Vol. 54. № 11 – 12. P. 717 – 724.
9. Lee S.-J., Matlock D. K., Van Tyne C. J. An Empirical Model for Carbon Diffusion in Austenite Incorporating Alloying Element Effects // *ISI International*. 2011. Vol. 51. P. 1903 – 1911.11.
10. Kim D.-W., Cho H.-H., Lee W.-B. et al. A finite element simulation for carburizing heat treatment of automotive gearing incorporating transformation plasticity // *Materials and Design*. 2016. Vol. 99. p. 243 – 253.12.

11. Sugianto A., Narazaki M., Kogawara M. et al. Numerical simulation and experimental verification of carburizing-quenching process of SCr420H steel helical gear // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. P. 3597 – 3609
12. Totten G. E. *Steel Heat Treatment : Metallurgy And Technologies*. — CRC Press, 2006. — 848 p.
13. Differential Geometry / M. P. do Carmo et al. *Mathematical Models*. Wiesbaden, 2017. P. 155–180. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-18865-8_10 (date of access: 05.12.2023).
14. Ross R. B. *Steel. Metallic Materials Specification Handbook*. Boston, MA, 1992. P. 295–581. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3482-2_45 (date of access: 05.12.2023).
15. Beswick J. M. Chapter 6 | Heat Treatment Process Technologies—Softening Heat Treatments. *Rolling Bearing Steel: Design, Technology, Testing and Measurements*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2022. P. 141–149. URL: <https://doi.org/10.1520/mnl8320200008> (date of access: 05.12.2023).
16. Chotěborský R., Brožek M. Influence of heat treatment on mechanical properties of steel. *Research in Agricultural Engineering*. 2012. Vol. 50, No. 4. P. 152–155. URL: <https://doi.org/10.17221/4942-rae> (date of access: 05.12.2023).
17. Contact potential difference of alloy steel after heat treatment / L. P. Aref`eva et al. *Advanced Engineering Research*. 2020. Vol. 20, no. 3. P. 289–294. URL: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294> (date of access: 05.12.2023).
18. Di Schino A., Gaggiotti M., Testani C. Heat Treatment Effect on Microstructure Evolution in a 7% Cr Steel for Forging. *Metals*. 2020. Vol. 10, no. 6. P. 808. URL: <https://doi.org/10.3390/met10060808> (date of access: 05.12.2023).
19. Institute M. E. Practical heat treating. Materials Park, Ohio : ASM International, Materials Engineering Institute, 1995.

20. Yin F. S. Grain Boundary Character of 9Cr Ferritic/Martensitic Heat Resistant Steels Strengthened by Nano-Sized MX Precipitates. *Materials Science Forum*. 2010. Vol. 638-642. P. 2882–2887. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.638-642.2882> (date of access: 05.12.2023).
21. ДБН В.2.5-28-2006. Природнє та штучне освітлення. [Дійсн. від 15.05.06]. К.: Мінбуд, 1977. 96 с

ДОДАТОК