



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

на тему *Оптимізаційні моделі та чисельне моделювання цементації металевих конструкцій*

Шифр: КРБМТВАТАМ 25.22155.000. ПЗ

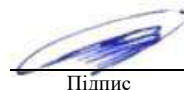
Галузь знань	<u>13 – Механічна інженерія</u> Шифр і назва галузі знань
Спеціальність	<u>132 – Матеріалознавство</u> Шифр і назва спеціальності
Рівень вищої освіти	<u>Перший бакалаврський</u> Рівень вищої освіти
Освітньо-професійна програма	<u>Відновлення та технічний сервіс автомобілів</u> Назва освітньої програми

Виконав: студент 3 курсу, група МТВАс-22-2  Максим КУЧЕРУК
Курс, група виконавця Підпис Ім'я, прізвище

Керівник: д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ  Ілона ДРАЧ
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

зав. кафедри ТАМ, д-р.техн.н., професор

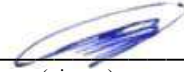

Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, прізвище

5 червня 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*
Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*
Рівень вищої освіти *перший бакалаврський*
Галузь знань *13 – Механічна інженерія*
Спеціальність *132 – Матеріалознавство*
Освітньо-професійна програма *Відновлення та технічний сервіс автомобілів*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ



(підпис)

д-р.техн.н., проф. Олександр ДИХА

Науковий ступінь, ім'я, прізвище

20 лютого 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Завдання видано студенту

Кучеруку Максиму Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Оптимізаційні моделі та чисельне моделювання цементації металевих конструкцій»

Керівник роботи

професор кафедри ТАМ Драч Ілона Володимирівна

(посада, прізвище, ім'я, по батькові)

2. Затверджено наказом університету від 7 лютого 2025 р. № 26

3. Дата видачі завдання студенту: 20 лютого 2025 р.

4. Строк подання студентом роботи на кафедру: 10 червня 2025 р.

5. Вихідні дані: *джерела інформації щодо теми КРБ; матеріали переддипломної практики: технічні умови на технології цементації сталей.*

6. Зміст пояснювальної записки (перелік задач): *провести аналіз предметної області, вивчити основи процесу цементації: визначення, мету, механізм процесу та основні технологічні параметри; порівняти особливості різних методів цементації (газової, рідинної, порошкової): середовище процесу, умови проведення, переваги та недоліки кожного методу; розробити та проаналізувати математичні моделі насичення вуглецем для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках при газовій динамічній цементації.*

7. Перелік графічного матеріалу: *графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах.*

8. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

9. Календарний план виконання кваліфікаційної роботи бакалавра:

№	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання	Примітка
1	<i>Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи бакалавра з керівником</i>	<i>01.02.2025</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Ознайомлення з предметною областю, формулювання мети та задач дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження</i>	<i>30.02.2025</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Робота над розділом 1 – Характеристика предметної області та постановка задачі</i>	<i>30.02.2025</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Робота над розділом 2 – Цементация – процес хіміко-термічної обробки сталі</i>	<i>15.04.2025</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Робота над розділом 3 – Моделювання процесу цементации металевих конструкцій</i>	<i>15.05.2025</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Оформлення пояснювальної записки згідно вимог</i>	<i>30.05.2025</i>	<i>виконано</i>

Виконавець: студент 3 курсу, група МТВАс-22-2

Курс, група виконавця



Підпис

Максим КУЧЕРУК

Ім'я, прізвище

Керівник: д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ

Науковий ступінь, посада



Підпис

Ілона ДРАЧ

Ім'я, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: *Оптимізаційні моделі та чисельне моделювання цементації металевих конструкцій*

Виконавець кваліфікаційної роботи бакалавра: *студент групи МТВАс-22-2
Кучерук Максим Васильович*

Керівник кваліфікаційної роботи бакалавра: *д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ
Драч Ілона Володимирівна*

Кваліфікаційна робота бакалавра містить:

Пояснювальна записка				Кількість додатків
Сторінок	Рисунків	Таблиць	Джерел інформації	
58	19	2	25	1

Мета кваліфікаційної роботи полягає в розробці математичних моделей цементації для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках, поміщених у вуглецевовмісне термічне середовище із змінним вуглецевим потенціалом.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання дослідження:

– вивчити основи процесу цементації: визначення, мету, механізм процесу та основні технологічні параметри;

– порівняти особливості різних методів цементації (газової, рідинної, порошкової): середовище процесу, умови проведення, переваги та недоліки кожного методу;


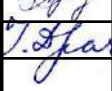


– розробити та проаналізувати математичні моделі насичення вуглецем для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках при газовій динамічній цементації.

Представлені результати показують широкі можливості щодо моделювання розподілу вуглецю в сталі, підданій цементації.

Ключові слова: цементація сталей, газова динамічна цементація, оптимізаційна модель, модель розподілу вуглецю.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Характеристика предметної області та постановка задачі.....	10
1.1 Аналіз предметної області	10
1.2 Класифікація методів моделювання процесів хіміко-термічної обробки	12
1.3 Мета і задачі дослідження	15
2 Цементация – процес хіміко-термічної обробки сталі	17
2.1 Суть та призначення процесу цементации	17
2.2 Методи цементации сталей	22
2.3 Переваги та недоліки цементации сталей	34
Висновки до розділу 2	35
3 Моделювання процесу цементации металевих конструкцій	37
3.1 Основні математичні моделі процесу цементации металевих конструкцій	37
3.2 Розробка математичних моделей цементации для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках	39
3.2.1 Модель А процесу цементации (оптимізація)	40
3.2.2 Модель В (моделювання розподілу вуглецю в сталі)	47
Висновки до розділу 3	54

					КРБМТВАТАМ 25.22155.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Оптимізаційні моделі та чисельне моделювання цементации металевих конструкцій	Лім.	Арк.	Акрівші
Розроб.		Кучерук					5	58
Перевір.		Драч						
Реценз.								
Н. Контр.		Бабак						
Затверд.		Диха						
						ХНУ група МТВАс 22-2		

Висновки.....	55
Перелік посилань	56
Додаток.....	59

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена застосуванню математичних моделей процесів хіміко-термічної обробки, зокрема, цементації сталей, до задачі оптимізації розподілу вуглецю у зразках, поміщених у вуглецевовмісне термічне середовище із змінним вуглецевим потенціалом.

Актуальність.

Технологія цементації активно застосовується у галузі машинобудування. Цей метод дозволяє збільшити міцність зовнішнього шару деталі, зберігши внутрішню в'язкість. Оскільки верхній шар більш щільний, в металі виникає стискуючі напруження, які в поверхневому шарі перетворюються в залишкові напруження, що також підвищує міцність виробу [1].

Ефективність роботи деталей машин значною мірою визначається структурними особливостями цементованого шару та основного матеріалу, що, своєю чергою, впливає на вибір сталей, технологій попередньої обробки, а також безпосередньо на технологічні параметри цементації [2]. У цьому контексті моделювання та прогнозування процесів формування структури й властивостей у дифузійному шарі при цементації набуває особливої актуальності.

Моделювання процесів, що відбуваються під час цементації, є одним із найрезультативніших підходів до розробки технологічного процесу. Математичне моделювання процесів цементації забезпечує зручне та швидке вирішення багатьох інженерних задач: контроль і регулювання режимів насичення, прогнозування кінцевих властивостей виробів, а також розробку інноваційних підходів до обробки. З огляду на складність та високу вартість проведення великої кількості експериментів, такий підхід вважається перспективним та економічно доцільним засобом дослідження процесів цементації [3].

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відомо, що оптимізація процесу цементації на основі математичного моделювання є актуальним завданням, оскільки вона дозволяє знизити енерговитрати на проведення хіміко-термічної обробки, пов'язаної з просторовою конфігурацією деталі [4].

У цій роботі пропонуються математичні моделі, що дозволяють з високим ступенем точності проводити моделювання процесу цементації металевих конструкцій. Моделі використовують цільову функцію, на основі якої вибирається функція коефіцієнта дифузії від температури, що дозволяє найкраще мінімізувати розкид теоретичних та експериментальних даних по концентрації вуглецю.

Метою цієї роботи є розроблення математичних моделей цементації для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках, поміщених у вуглецевовмісне термічне середовище із змінним вуглецевим потенціалом.

Для оптимізації процесу цементації пропонуються дві математичні моделі, кожна з яких має своє змістовне значення для розрахунку процесу цементації. Перша математична модель (А) процесу цементації складається з рівнянь для оптимізації та вибору дифузійної залежності за експериментальними даними. Друга модель (В) призначена для моделювання розподілу вуглецю у сталі. Математичні моделі складаються з: системи рівнянь (модель А): теплопровідності та рівнянь дифузії для модельованого об'єкта, цільової функції, значення якої необхідно мінімізувати відносно функції дифузії; з системи рівнянь (модель В): теплопровідності та рівнянь дифузії для моделювання та розрахунку розподілу вуглецю в об'єкті.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання дослідження:

- вивчити основи процесу цементації: визначення, мету, механізм процесу та основні технологічні параметри;
- порівняти особливості різних методів цементації (газової, рідинної, порошкової): середовище процесу, умови проведення, переваги та недоліки кожного методу;

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– розробити та проаналізувати математичні моделі насичення вуглецем для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках при газовій динамічній цементації.

Об’єкт дослідження – процеси газової динамічної цементації.

Предмет дослідження – математичні моделі розподілу вуглецю у зразках.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Аналіз предметної області

Хіміко-термічна обробка (ХТО) – поєднання хімічного та термічного впливу з метою зміни складу, структури та властивостей поверхневого шару деталі у необхідному напрямку. При цьому відбувається поверхнєве насичення металевого матеріалу відповідним елементом (С, N, В, Al, Cr, Si, Ti та ін) шляхом його дифузії його атомів із зовнішнього середовища (твердої, газової, парової, рідкої) при високій температурі [5].

Процес хіміко-термічної обробки складається із трьох елементарних стадій [6]:

- виділення дифузного елемента в атомарному стані завдяки реакціям, що відбуваються у зовнішньому середовищі (дисоціація);
- контактування атомів дифузного елемента з поверхнею сталевого виробу та проникнення (розчинення) їх у решітку заліза (адсорбція);
- дифузія атомів насичуючого елемента в глиб металу.

Цементациєю називається процес насичення поверхневого шару сталі вуглецем. Розрізняють такі види цементації: тверду, газову цементацію, цементацію пастами, рідинну цементацію. Метою цементації є одержання твердої зносостійкої поверхні, що досягається збагаченням поверхневого шару вуглецем до концентрації 0,8–1,2 % та подальшим загартуванням з низьким відпуском. Цементация та подальша термічна обробка одночасно підвищують зносостійкість та межу витривалості [7].

Для цементації зазвичай використовують сталі із вмістом вуглецю 0,1–0,3% різного легування. Вибір таких сталей необхідний для того, щоб серцевина виробу, що не насичується вуглецем при цементації, зберігала високу в'язкість після гартування [7, 8].

					<i>КРЕМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Технологію цементації почали застосовувати ще в дев'ятнадцятому столітті (рис.1.1). Цей метод схожий на азотування, проте в останньому випадку використання азоту сприяє підвищенню антикорозійних властивостей сплаву.



Рисунок 1.1 – Промисловий процес цементації у термічній печі

По суті цементація є хіміко-термічною технологією. У процесі обробки поверхня насичується атомами вуглецю, насичення відбувається за рахунок процесу дифузії.

Метод цементації забезпечує [6]:

- підвищення твердості;
- підвищення стійкості до механічних навантажень;
- поліпшення характеристик міцності.

Цементацію застосовують для низьколегованих та вуглецевих сортів сталі. Залежно від інтенсивності впливу величина шару може досягати 2,5 мм. За допомогою технології підвищують міцність поверхні металу, однак внутрішні шари деталі залишаються в'язкими.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними особливостями технології є [6]:

1. Важливість дотримання температурного режиму. Оптимальне насичення вуглецем відбувається на діапазоні від 850 до 950 °С.
2. Процес дифузії відбувається з низькою швидкістю. Приблизно 60 хвилин потрібно для отримання шару в 0,1 мм.
3. Цементацію проводять для низьковуглецевих сталей, що зберігають здатність до поглинання атомів вуглецю.
4. Обробку можна проводити у різних середовищах. Найбільш поширеними методами цементації сталі є використання карбюризаторів у твердому та газоподібному стані, паста-реагенти, електролітні розчини.

1.2 Класифікація методів моделювання процесів хіміко-термічної обробки

За Wołowies E. [9] в основу класифікації методів моделювання хіміко-термічної обробки (ХТО) покладено два основні принципи: фізичний та статистичний. Кожен принцип має свої власні сфери застосування (рис. 1).

Методи постійно вдосконалюються та застосовуються для моделювання різних процесів і кореляцій, як при виробництві первинного матеріалу, так і при його подальшій обробці методами матеріалознавства [4, 10].

Фізичні методи засновані на фундаментальних законах і теоріях, які описують фізичну природу процесу. Тому основним припущенням у цьому принципі моделювання є повне розуміння явища і можливість його опису з використанням фізичної моделі та математичних рівнянь.

В основі статистичних методів у моделюванні хіміко-термічної обробки є: теорія ймовірностей – для враховування природні випадковості в процесах (наприклад, неоднорідність матеріалу, флуктуації температури); методи обробки експериментальних даних – для виділення основних закономірностей з великої кількості результатів; статистичні гіпотези – для перевірки значущості

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впливу зміни параметрів на результат; апроксимація й інтерполяція – для створення математичних моделей на основі експериментальних точок; оптимізація – для підбору режимів, які дають найкращу якість обробки. Ці методи допомагають перетворити "сирі" вимірювання в зрозумілі формули і правила.



Рисунок 1.1 – Класифікація методів моделювання процесів хіміко-термічної обробки [11]

Математичне моделювання процесу цементації є надзвичайно важливим як з наукової, так і з практичної точок зору. Основними ключовими аспектами, які підкреслюють його значущість, є [12]:

1) глибше розуміння фізико-хімічних процесів. Математичне моделювання дозволяє досліджувати внутрішні механізми дифузії вуглецю в сталеву матрицю, кінетику фазоутворення, розподіл концентрацій, температур і напружень у шарі. Це дає змогу краще розуміти взаємозв'язки між параметрами процесу та отримуваними властивостями шару;

2) оптимізація технологічних режимів. Завдяки моделям можна прогнозувати оптимальні температурно-часові режими цементації без потреби в численних експериментах. Це допомагає:

- економити енергоресурси;
- зменшити тривалість обробки;
- уникнути дефектів, таких як перегартування або надмірне зростання шару;

3) зниження витрат на експерименти. Проведення повномасштабних термічних експериментів — це дорогий і тривалий процес. Моделювання дозволяє значно зменшити кількість необхідних досліджень, перевіряючи гіпотези та режимні параметри у віртуальному середовищі;

4) прогнозування властивостей цементованого шару. Моделі дають можливість передбачити:

- глибину цементованого шару;
- градієнт твердості;
- розподіл залишкових напружень;
- зносостійкість і контактну витривалість.

Це особливо важливо для відповідальних деталей, таких як шестерні, вали, кулачки;

5) інтелектуальні системи управління. Математичне моделювання лягає в основу сучасних автоматизованих систем управління термічними процесами.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Алгоритми, побудовані на основі моделей, дозволяють в режимі реального часу коригувати параметри печі, забезпечуючи стабільну якість продукції;

б) підтримка цифрових технологій (Industry 4.0). У рамках переходу до цифрового виробництва, моделі цементації інтегруються в цифрові двійники виробничих процесів, що відкриває нові можливості для гнучкого планування, віддаленого контролю та прогнозування результатів ще до запуску процесу в реальному середовищі.

1.3 Мета і задачі дослідження

Відомо, що процес управління хіміко-термічною обробкою деталей є найважливішим завданням, від вирішення якого безпосередньо залежить ефективність роботи термічних цехів промислових підприємств. Досі, незважаючи на актуальність цього завдання, багато питань, пов'язаних з розрахунком дифузії та моделюванням процесів термічної обробки, залишаються для розв'язання швидше фізиком-теоретикам, ніж практикам-металознавцям.

Різноманітність математичних моделей, заснованих на рівнянні дифузії, скоріше відбиває теоретичні погляди на процес термічної обробки, ніж пропонує конкретні розрахунки технологічного процесу хіміко-термічної обробки. Це призводить до того, що вибір режимів термічної обробки кожної нової деталі здійснюється значною мірою з урахуванням досвіду технологів і має емпіричний характер.

Слід зазначити, що сучасні термічні цехи оснащені обладнанням, яке дозволяє керувати та контролювати процес хіміко-термічної обробки, що проводиться з газової фази, зокрема це стосується проведення цементації для сталевих деталей.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосування розрахункових методів дозволяє оперативно отримувати інформацію про характеристики зміцненого шару, швидкість протікання дифузійних процесів, формування карбідної фази, а також ефективно варіювати температурно-часові режими обробки.

Актуальність завдань розробки та використання математичних моделей у процесах дослідження, удосконалення та розрахунку процесів хіміко-термічної обробки призвела до вибору теми цього дослідження, метою якого є розробка математичних моделей цементації для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках, поміщених у вуглецевовмісне термічне середовище із змінним вуглецевим потенціалом.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання роботи:

– вивчити основи процесу цементації: визначення, мету, механізм процесу та основні технологічні параметри;

– порівняти особливості різних методів цементації (газової, рідинної, порошкової): середовище процесу, умови проведення, переваги та недоліки кожного методу;

– розробити та проаналізувати математичні моделі насичення вуглецем для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках при газовій динамічній цементації.

					<i>КРЕМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ЦЕМЕНТАЦІЯ – ПРОЦЕС ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

2.1 Суть та призначення процесу цементациї

Цементация – це процес дифузійного насичення поверхневих шарів сталевих деталей вуглецем [13].

Цементацию проводять для низьковуглецевих сталей, що містять до 0,25...0,3% вуглецю, які називають цементованими. Це доєвтектоїдні сталі, їх структура в рівноважному (відпаленому) стані – ферит (більша частина) та перліт. Твердість та міцність цих сталей низькі, а пластичність та ударна в'язкість високі. Через низький вміст вуглецю вони практично не гартуються [6].

Цементацию проводять у карбюризаторах, середовищах, що містять вуглець, при 900...950 С, тобто вище точки *G* – в області стійкого аустеніту (рис. 2.1) [7].

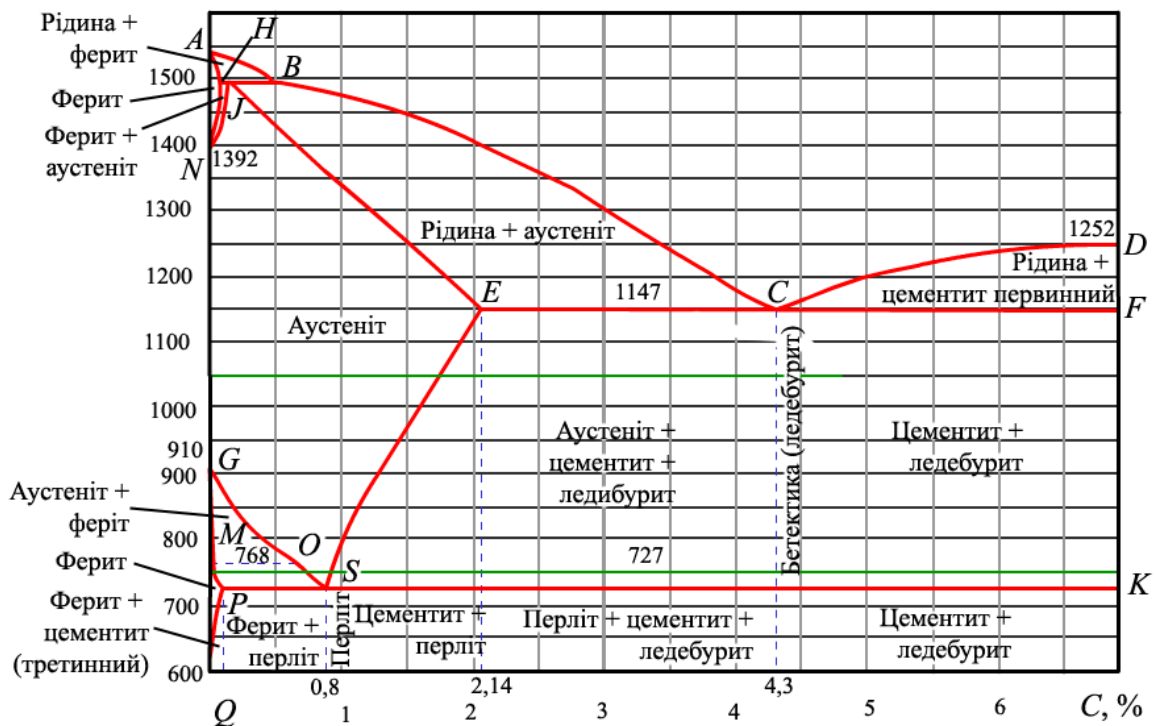


Рисунок 2.1 – Діаграми стану системи залізо-цементит (Fe–Fe₃C) [14]

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк. 17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір температури пояснюється тим, що розчинність вуглецю в аустеніті значно вища, ніж у фериті: до 2,14% в аустеніті та 0,02% у фериті, що відповідає точкам *E* і *P* діаграми стану Fe - Fe₃C (рис. 2.1). Чим вища температура нагріву, тим більше вуглецю може розчинитися в аустеніті, але при цьому зростає розмір його зерна. Швидкість насичення становить приблизно 0,1 мм/год. Таким чином, для одержання цементованого шару глибиною 1 мм потрібно не менше 10 год [15].

Концентрація вуглецю в цементованому шарі зменшується від поверхні до серцевини деталі (рис. 2.2) [15].

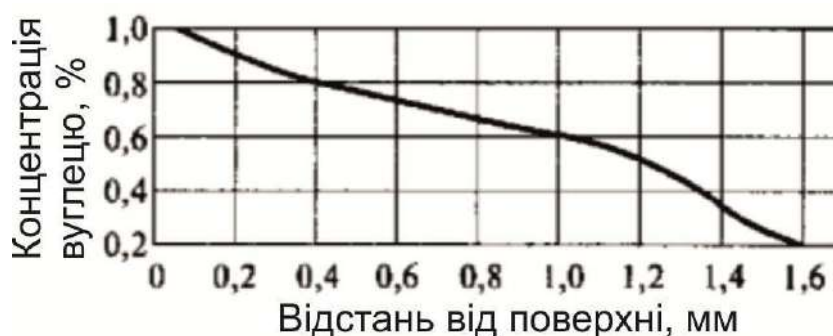


Рисунок 2.2 – Зміна концентрації вуглецю в цементованому шарі

У зв'язку з цим після повільного охолодження у структурі шару можна розрізнити три зони: заевтектоїдну, евтектоїдну та доевтектоїдну зі структурами відповідно П + ЦП; П і П+Ф (рис. 2.1). За ефективну величину цементованого шару прийнято 50% фериту і 50% перліту (з вмістом до 0,4 ... 0,45% вуглецю) [7].

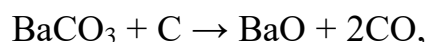
Наявність зон з твердістю, що поступово змінюється, забезпечує її плавне зниження від поверхні до серцевини деталей, що виключає появу концентраторів напруг, що виникають при різкому перепаді твердості.

Застосовують дві основні технології цементації: тверду та газову. Тверда цементація здійснюється в карбюризаторі, що містить активоване деревне вугілля (70%) і порошки: ВаСО₃ (25%) для інтенсифікації процесу, СаСО₃ (5%)

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

для запобігання спікання вугільних гранул. Деталі укладають рядами в сталеві зварні чи чавунні ящики (контейнери). Дно ящика та кожен ряд деталей засипають шаром карбюратора. Ящик закривають кришкою, герметизують з'єднання вогнетривкою глиною, а потім поміщають у піч [16].

Вуглець деревного вугілля взаємодіє з киснем повітря, що є в цементацийному ящику, і вуглекислим барієм, утворюючи оксид вуглецю CO:



який дисоціює з утворенням атомарного вуглецю



Атомарний вуглець, що утворюється, адсорбується на поверхні сталевих деталей і дифундує вглиб, розчиняючись в аустеніті.

До недоліків такої технології слід віднести неможливість регулювання ступеня насичення поверхні деталей вуглецем, а також нижчу швидкість цементації порівняно з газовою (в 2 рази менша), оскільки потрібен час для прогрівання контейнерів та суміші. Тверда цементація застосовується в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва, відрізняється простотою виконання, не потребує спеціального обладнання.

Газова цементація характерна для серійного і більш масштабного виробництва. Вона здійснюється у середовищі газів, що містять вуглець. Найчастіше використовується карбюратор, що складається із суміші метану CH₄ (природний газ) і оксиду вуглецю CO, при дисоціації яких утворюється атомарний вуглець [17].

Газова цементація дозволяє забезпечити задану концентрацію вуглецю в шарі, механізацію та автоматизацію процесу. Крім того, процес займає менше часу.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сама по собі цементация не забезпечує виконання головного завдання – отримання високої твердості та зносостійкості поверхні деталей. Вона тільки створює вигідний розподіл вуглецю за перерізом деталі. Необхідне зміцнення поверхневого шару досягається наступною після цементации термічною обробкою, що складається із гартування та низького відпуску (160...180°C). Застосовують різні технології гартування залежно від вимог до міцності поверхневого шару та серцевини деталей (рис. 2.3) [7].

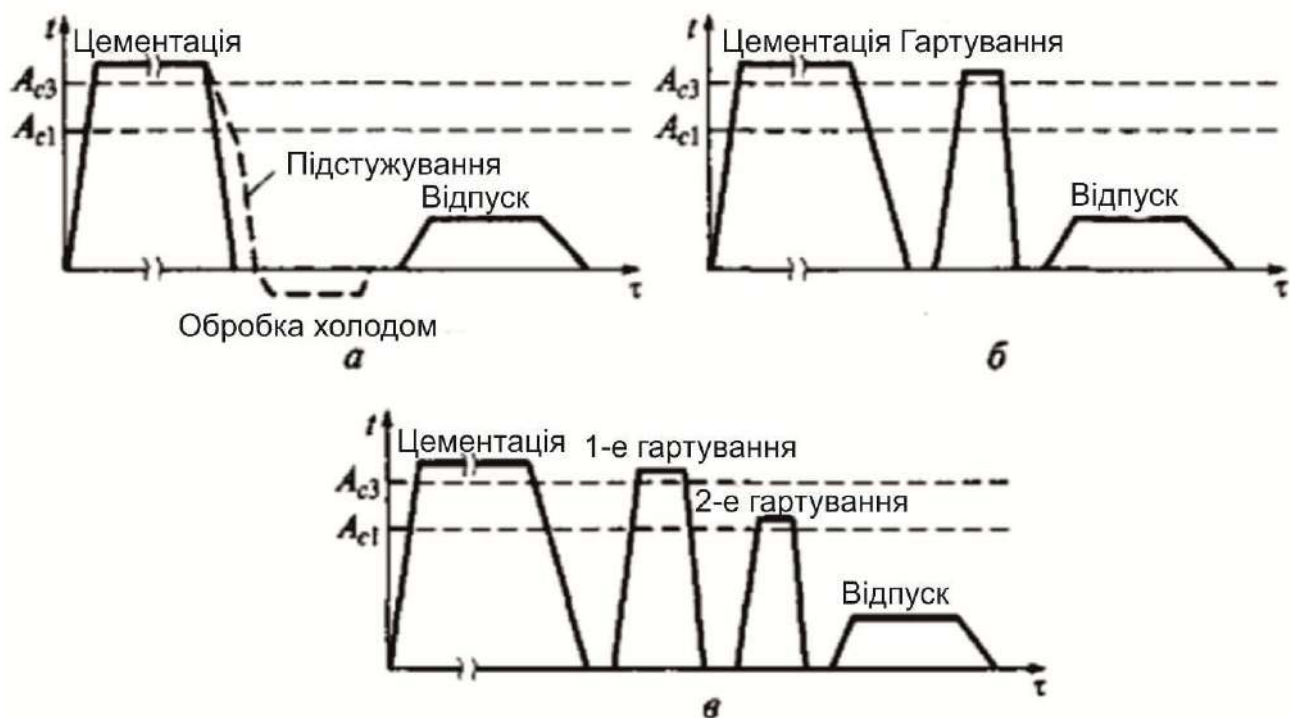


Рисунок 2.3 – Технології цементации та подальшої термічної обробки:

- а) гартування від цементацийного нагріву з підстуджуванням;
- б) одинарне гартування; в) подвійне гартування

Для деталей, від яких потрібно лише поверхнева твердість, а інші механічні властивості не лімітують працездатності, гартування виконують від температури цементацийного нагріву. Технологія може бути реалізована лише за газової цементации. Деталь, витягнуту з печі, охолоджують на повітрі до гартованої температури (підстуджують), а потім охолоджують остаточно в

гартувальному середовищі (рис. 2.3, а). Підстуджування дозволяє знизити термічні гартувальні напруження. Така технологія є найбільш економічною та легко піддається автоматизації. Однак сталь має крупнозернисту будову та знижену міцність та ударну в'язкість. Більш задовільні властивості після такої обробки отримують спадково дрібнозернисті сталі.

Найбільш поширена технологія - гартування деталей додатковим нагріванням після їх охолодження від температури цементації до цехової. У цьому випадку гартування виконують від температур 820... 850 °С (рис. 2.3, б), які дещо вищі за температури, які зазвичай використовуються при гартуванні заевтектоїдних сталей (780... 800 °С). При цьому в результаті перекристалізації подрібнюється зерно не тільки цементованого шару, а й частково серцевини, оскільки при гартуванні від таких температур серцевина піддається неповному гартуванню. На поверхні утворюється структура дрібногочастого мартенситу, вторинного цементиту та залишкового аустеніту (5...8%) [16].

Тяжконавантажені деталі, для яких необхідні високі міцність і ударна в'язкість серцевини, після цементації піддають подвійному гартуванню (рис. 2.3, в). Перше гартування виконується від температури вище точки A_{c3} . Структура серцевини (це структура доевтектоїдної сталі) при цьому проходить повну перекристалізацію і стає дрібнозернистою. Проте в результаті цього першого гартування на поверхні утворюється структура великогочастого мартенситу зниженої міцності. Друге гартування виконується від температури дещо вищих точки A_{c1} (750...780°С) для подрібнення зерна цементованого шару (це структура заевтектоїдної сталі), перегрітого при першому гартуванні. Недолік такої технології - підвищене жолоблення деталей в результаті подвійного гартування [16].

Структура серцевини залежить від складу сталі. Для деталей з вуглецевих сталей – це ферит та перліт; легованих – сорбіт, троостит або низьковуглецевий мартенсит залежно від рівня легування сталі. Після цементації, гартування та низького відпуску твердість поверхневого шару

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

становить 58...62 HRC, а сердцевины – близко 20 HRC для углеродистых сталей та 25—45 HRC для легированных. Таким чином, у деталей досягається поєднання високої твердості поверхні (забезпечується зносостійкість) та високої ударної в'язкості серцевини (добрий опір ударним навантаженням) [16].

Цементациї піддають деталі, що працюють в умовах підвищеного зношування та динамічних навантажень (наприклад, зубчасті колеса, черв'яки, кулачки, розподільні валики тощо). Цементациї може піддаватися не вся поверхня виробу. У цьому випадку ділянки, що не підлягають цементациї, захищають гальванічним зменшенням або особливими обмазками.

Типовий технологічний процес виготовлення деталі, що зміцнюється цементациєю та наступною термообробкою [16]:

- заготівельна операція;
- попередня механічна обробка (включаючи шліфування);
- захист ділянок деталі, які не слід зміцнювати;
- цементация;
- гартування;
- низький відпуск;
- фінішне оброблення (шліфування).

Після цементациї та подальшої термічної обробки виникають деформації, тому проведення фінішної обробки є обов'язковим. Найбільш поширена товщина цементованого шару деталі 0,8...1,2 мм, отже, при цементациї слід отримувати шар більшої товщини – 1,2...1,5 мм з урахуванням припуску на шліфування [6].

2.2 Методи цементациї сталей

У виробництві використовують різні методи цементациї, які розрізняють відповідно до середовища, що використовується [7]:

- тверда;

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- газ;
- рідка;
- використання пасти;
- вакуумна.

Розглянемо докладно кожен із методів.

Цементация сталі з твердим карбюризатором (рис. 2.4).

Як карбюризатор, за рахунок якого буде проходити насичення верхнього шару металу атомами вуглецю, використовують деревне вугілля та каталізатори (активуючі речовини). В якості каталізатора може використовуватись кальцинована сода, вуглекислий барій тощо [6].



Рисунок 2.4 – Цементация сталі з твердим карбюризатором

Процес у твердому середовищі проводиться так:

- 1) деталі або заготовки попередньо готують ретельно очищаючи поверхню;
- 2) для цементации заготовки укладають у чавунні або сталеві ємності таким чином: шар вугілля у дерев'яних ящиках, шар заготовок;

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 3) кількість шарів визначають відповідно до стандартів технології;
- 4) необхідно робити відступи між стінками резервуара та оброблюваними деталями;
- 5) між заготовками засипають карбюризатор шаром в 1-1,5 см, верхній шар карбюризатора повинен бути від 3,5 до 4 см;
- 6) ємність щільно закривають кришкою, всі зазори ретельно герметизують вогнетривкими матеріалами (зазвичай використовують глину або глиняно-піщану суміш).

Підготовлену ємність нагрівають до температури 930 °С.

Після витримки в печі ємність охолоджують до 450-500 °С, потім відкривають.

При твердій цементації зазвичай використовують дубове або березове вугілля, при цьому необхідно подрібнити вугілля на дрібні фракції. Робочий склад готують сухим або вологим способом. У першому випадку вугілля посипають кальцинованою сіллю, у другому – поливають розчином, потім просушують. При цьому вологість одержаної сировини не повинна перевищувати 7%.

Перевагами твердої цементації сталі є простота процесу (можна використовувати як у промислових підприємствах, так і у кустарному виробництві), а також невисока вартість. Недоліками є необхідність постійно контролювати процес і трудомісткість.

При цементації в твердому карбюризаторі вироби укладають в ящики і засипають карбюризатором, найчастіше деревним вугіллям. При нагріванні вуглець деревного вугілля, з'єднуючись з киснем повітря, утворює оксид вуглецю, який, своєю чергою, взаємодіючи із залізом, дає атомарний вуглець. Цей активний вуглець поглинається аустенітом і дифузує в глиб виробу. Для прискорення процесу цементації до деревного вугілля (коксу) додають каталізатори процесу: вуглекислий барій (BaCO_3) та кальциновану соду (Na_2CO_3) у кількості 10-40% від маси вугілля [7].

					<i>КРЕМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цементация в газовому середовищі (рис.2.5).

Газова цементация є більш продуктивним процесом, тому у виробничих умовах найчастіше використовують саме цю технологію [6].



Рисунок 2.5 – Цементация в газовому середовищі

Як середовище використовують побічні продукти розпаду нафтопродуктів, гас, у деяких випадках газу піддають модифікації, що дозволяє збільшити глибину проникнення атомів вуглецю. Для проведення цементации використовують спеціальні закриті печі. Як правило, для отримання шару 1,1 мм потрібно близько 14 годин. Процес проводиться при температурі 930-950 °С, у деяких випадках для прискорення процесу науглерожування допустимим є нагрівання до 1000-1500 °С [15].

Також варто відзначити, що при використанні газового середовища гартування можна проводити безпосередньо в печі. Це значно полегшує процес металообробки. Цементация є проміжною операцією, мета якої – збагачення поверхневого шару вуглецем. Необхідне зміцнення поверхневого шару виробу досягається гартуванням після цементации. Гартування має не тільки зміцнити поверхневий шар, але й виправити структуру перегріву, що виникає через

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багатогадинну витримку сталі при високій температурі цементації. Після цементації в твердому карбюризаторі відповідні вироби піддають подвійному гартуванню, так як вміст вуглецю в серцевині і на поверхні виробу різний, а оптимальна температура нагрівання під гартування залежить від вмісту вуглецю сталі. Перше гартування проводять з нагріванням до 850-900 ° С (вище точки А₃ серцевини виробу), щоб відбулася повна перекристалізація з подрібненням аустенітного зерна в доевтектоїдній сталі. У вуглецевій сталі через малу глибину прожарюваності серцевина виробу після першого гартування складається з фериту і перліту. Замість першого гартування до вуглецевої сталі можна застосовувати нормалізацію. У легованій сталі, що прожарюється наскрізь, серцевина виробу складається з низьковуглецевого мартенситу. Така структура забезпечує підвищену міцність та достатню в'язкість серцевини. Після першого гартування цементований шар виявляється перегрітим і містить підвищену кількість залишкового аустеніту, тому застосовують друге гартування за температури 700-780 ° С, оптимальної для заевтектоїдних сталей. Після другого гартування поверхневий шар складається з дрібногочастого високовуглецевого мартенситу та глобулярних включень вторинного карбїду.

При газовій цементації найчастіше застосовують одне гартування із цементаційного нагріву після підстуджування виробу до 840–860 °С. Заключною операцією термічної обробки цементованих виробів у всіх випадках є низький відпуск при 160–180 °С і мартенсит, що переводить гартування в поверхневому шарі у відпущений мартенсит, що знімає напруження [15].

Процес гартування не тільки сприяє підвищенню міцності, але також дозволяє знизити жолоблення металу, вирівняти структуру та усунути дефекти, що з'явилися в результаті нагрівання до високих температур.

Процес газової цементації має низку переваг у порівнянні з цементацією в твердому карбюризаторі:

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- підвищується продуктивність процесу порівняно з цементацією у твердому карбюризаторі, оскільки не потрібно витратити час на упаковку та прогрівання ящиків;

- скорочується потрібна виробнича площа та кількість робочої сили, оскільки відпадає необхідність в упаковці та розпакуванні деталей, зберіганні та транспортуванні ящиків та карбюризатора;

- скорочується потреба в жаростійкому матеріалі, оскільки витрати його на муфелі та пристосування при газовій цементації набагато менші, ніж на ящики при цементації в твердому карбюризаторі;

- з'являється можливість регулювання процесу отримання цементованого шару заданої глибини і насиченості;

- зменшується деформація деталей внаслідок більш рівномірного нагрівання до робочої температури;

- покращуються санітарно-гігієнічні умови праці;

- з'являється можливість гартування деталей безпосередньо після цементації;

- застосування печей безперервної дії дозволяє повністю механізувати та автоматизувати процес.

Щодо недоліків газової цементації, то можна виділити:

- процес вимагає наявності дорогого обладнання;
- до роботи слід залучати висококваліфікований персонал;
- піч потребує постійного обслуговування, у тому числі, перевірку на герметичність та усунення дефектів;
- складні вимоги щодо техніки безпеки.

При проведенні газової цементації сталі необхідно чітко дотримуватися технічного регламенту та вимог безпеки. Від цього залежить безпека оператора.

Глибина цементації, залежно від призначення виробу та складу сталі, зазвичай є в межах 0,5–2,00 мм. Цементацию проводять за 910–950 °С або для прискорення процесу при 1000–1050 °С. З підвищенням температури

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшується час досягнення заданої глибини цементації. Так, при газовій цементації науглерожений шар товщиною 1,0-1,3 мм одержують при 920 °С за 15 год., а при 1000 °С – за 8 год. Щоб запобігти сильному зростанню аустенітного зерна, високотемпературній цементації піддають спадково дрібнозернисті сталі. Також перегрів після цементації можна виправити наступною повною перекристалізацією сплаву при гартуванні з повторного нагрівання. Концентрація вуглецю в поверхневому шарі виробу зазвичай становить 0,8-1,0% і не досягає межі розчинності при температурі цементації. Отже, сітка Fe₃C при температурі цементації не утворюється і поверхневий шар, як і серцевина, знаходиться в аустенітному стані. Після повільного охолодження цементований шар зі змінною концентрацією вуглецю складається з фериту та цементиту і характеризується гамою структур, типових для заевтектоїдної, евтектоїдної та доевтектоїдної сталі [17, 18].

Рідинна цементація (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Процес цементації у рідкому середовищі

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цементация сталі в рідкому середовищі проводиться з використанням розчинів лужних або карбонатних солей [6].

Обробка металу проводиться так:

1. У ванну поміщають соляний розчин, поступово підвищують температуру до розчинення частинок солі.
2. Деталі та заготовки занурюють у соляний розплав.
3. Температура розчину має становити 850С.
4. Тривалість цементації у соляній ванні – від півтори до трьох годин.

При цьому глибина шару виходить в межах 0,2 - 0,5 мм.

Перевагами цього методу є повна відсутність деформації металу та рівномірний шар покриття, недолік методу – невелика глибина шару, максимальний показник – 0,5 мм.

Цементация пастою (рис. 2.7).

В умовах індивідуального та дрібносерійного виробництва застосування знайшла цементация з спеціальних паст. У цьому випадку на поверхню металу наносять спеціальний склад, потім вироби складають у металеву (сталеву або чавунну) ємність і завантажують в піч для нагрівання [7].



Рисунок 2.7 – Процес цементації пастою

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Паста містить: сажу (33 - 70 %), деревний пил (20 - 60 %), жовту кров'яну сіль (5 - 20 %) та інші компоненти. Як сполучні матеріали використовують органічні, органомінеральні та неорганічні клеї (технічні олії або будівельні клеї). При цьому товщину шару пасту розраховують таким чином, щоб він у 6-8 разів перевищував товщину необхідного вуглецевого шару. Час витримки заготовок за високої температури – від 2 годин.

Перевагою науглерожування за допомогою паст є простота обробки та продуктивність процесу. Недолік – нерівномірний вуглецевий шар.

Цементация у вакуумному середовищі (рис. 2.8).

Використання вакуумного середовища для науглерожування металів – відносно нова технологія. Перша інформація про процес вакуумної цементации належить до початку 70-х років, коли фахівці фірми "Хейес" (США) вперше здійснили вакуумну цементацию у модернізованих печах типу VCQ [7].



Рисунок 2.8 – Вакуумна термічна піч, яка використовується для цементации при низькому тиску (LPC — Low Pressure Carburizing)

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основною перевагою методу є значне прискорення процесу. Обробка повністю автоматизована, що дозволяє отримувати очікуваний результат та виключити помилки.

Навуглерожування у вакуумному середовищі відбувається наступним чином:

- деталі поміщають у спеціальну камеру, де створюють вакуум;
- потім здійснюється нагрівання заготовок до потрібної температури;
- коли деталі нагріті, у вакуумну піч під тиском подають вуглець, атоми газу активно впроваджуються в кристалічні ґратки сталі.

Процес подачі вуглецю може відбуватися у кілька етапів, це залежить від заданої товщини шару. Після закінчення процесу навуглерожування у камеру подають інертний газ і охолоджують заготовки.

Більш детально. При вакуумній цементації, загрузку деталей здійснюють в холодну камеру, далі пуск печі, і подальше управління всіма технологічними параметрами (температура, витрата газу, тиск, тривалості періодів цементації та дифузії) проводиться за допомогою програми, введеної в керуючий комп'ютер. Спочатку піч вакуумується, потім слідує ступінчасте нагрівання до температури цементації. Потім садка з деталями витримується при постійній температурі для вирівнювання температури всередині садки та видалення забруднень із поверхні сталі, що перешкоджають проникненню вуглецю. Тривалість витримки за температури становить від 20 до 60 хв. (залежно від поперечного перерізу деталей). Далі відбувається подача в камеру реакційного газу, в якості якого застосовують такі вуглеводні як метан, пропан, бутан або ацетилен. Тиск та витрата газу залежать від типу газу, об'єму камери та площі поверхні деталей. Тиск газу може бути в інтервалі 4 - 400 мбар, а витрата в інтервалі 500 -5000 нл/год. При цьому намагаються якомога більше збагатити поверхневу зону вуглецем, щоб концентрація вуглецю в цій зоні досягла більш високих значень, ніж значення, що задаються для остаточно обробленої деталі. За стадією навуглерожування слідує дифузійна стадія процесу. Для того, щоб уникнути

					<i>КРЕМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подальшого науглерожування під час дифузійної стадії, після закінчення стадії науглерожування піч знову вакууюють. Далі закачують у піч трокси азоту (до встановлення тиску в печі 2 мбара) з метою зменшення ефекту сублимації (вивітрювання, випаровування) у вакуумі вуглецю та легуючих елементів з поверхні деталей при проходженні стадії дифузії. Стадії науглерожування та дифузії чергують доти, доки не будуть отримані необхідні глибина цементованого шару та концентраційний профіль вуглецю. Оптимальний технологічний процес вакуумної цементації складається з трьох стадій науглерожування та трьох стадій дифузії. На наступному етапі здійснюється охолодження печі та садки з деталями до цехової температури і в залежності від конструкції печі це може відбуватися як у самій камері з використанням інертного газу (азот, аргон або гелій) при різних тисках, так і в маслі гартового бака. Після досягнення піччю цехової температури комп'ютерне управління відключається і за допомогою навантажувача садку вивантажують [19].

Перевагами вакуумної цементації є:

- можливість ефективного регулювання профілю розподілу вуглецю в цементованому шарі та його мікроструктури;
- відсутність кисневмісних компонентів в атмосфері, що виключає внутрішнє окислення деталей;
- найкраще проникнення газу-карбюратора в отвори малого діаметра, що забезпечує рівномірну цементацію внутрішніх порожнин;
- висока повторюваність результатів процесів, що проходять в однакових умовах;
- отримання світлої поверхні деталей після цементації;
- відсутність газопідготовчих установок та приладів контролю вуглецевого потенціалу;
- зменшення питомої витрати електроенергії та технологічного газу;
- велика мобільність обладнання (пуск та зупинка займають кілька хвилин);

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- за допомогою вакууму досягається очищення поверхні деталей перед цементациєю, що сприяє прискоренню процесу;
 - скорочення тривалості процесу внаслідок проведення його за високої температури та зміни потенціалу атмосфери;
 - підвищення культури виробництва та поліпшення умов праці.
- До недоліків належать лише дороге обладнання та високі вимоги до кваліфікації операторів.

Цементация з контрольованим вуглецевим потенціалом.

Газова цементация – це загальний термін – будь-яка цементация у газовому середовищі (атмосфера містить вуглецеві гази, наприклад CH_4 , CO) [15].

Ендотермічна цементация – це різновид газової цементацияї, де використовують спеціально підготовлену ендотермічну атмосферу (CO , H_2 , N_2).

Цементация з контрольованим вуглецевим потенціалом – це коли в процесі газової (зокрема ендотермічної) цементацияї чітко регулюють концентрацію вуглецю у печі, щоб досягти заданих властивостей.

При газовій цементацияї в ендотермічній атмосфері на початку процесу (в активний період насичення) підтримують високий вуглецевий потенціал атмосфери за рахунок добавки до ендотермічної атмосфери необробленого вуглеводневого газу (метану або пропану-бутану). У дифузійний період вуглецевий потенціал атмосфери встановлюється 0,8 – 1,0% і кількість вуглеводневого газу, що додається, різко зменшується.

Дослідження, проведені у [18, 20, 21], показали, що окисні плівки типу кольорів побіжності при короткочасних процесах прискорюють науглерожування. В ендотермічній атмосфері плівки оксидів легко відновлюються, утворюючи тонкий шар пористого чистого заліза. Цей шар є хорошим каталізатором дисоціяції молекул CO і завдяки розвиненій поверхні має високу адсорбуючу здатність. Шар відновленого заліза не містить

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

легованих елементів, тому в ньому зростає коефіцієнт дифузії. Розчинність вуглецю досягає ступеня насичення 1,4%, як у нелегованому аустеніті.

Зауваження.

"Кольори побіжності" – термін із металургії, що означає забарвлення поверхні металу, яке виникає внаслідок утворення оксидної плівки при нагріванні. Кольори побіжності можуть вказувати на температуру нагріву і використовуються для візуального контролю в процесі термічної обробки металів.

Іноді під час цементації необхідно захистити деякі поверхні. Для цього застосовують 3 основні способи:

– захист допусками. При такому способі деталі спочатку науглерожують, потім знімають припуск під науглеражування, з необхідних поверхонь і після відправляють деталі на гартування і низький відпуск;

– міднення поверхні. Електрохімічний спосіб нанесення міді на поверхні, що захищаються, з подальшим зняттям міднення на верстатах для механічної обробки;

– захист пастами. Спосіб захисту поверхні, що полягає у нанесенні спеціальної пасти на поверхню металу. Після цементації такі пасти зазвичай змиваються в теплій воді.

2.3 Переваги та недоліки цементації сталей

Науглерожування дозволяє отримати тверді, зносостійкі поверхні, що застосовуються як у побуті, так і на виробництві. Механізми зі сталі, що пройшли процес збагачення вуглецем, набагато сильніше захищені від пошкоджень через ударне навантаження при м'якшій серцевині. На відміну від інших процесів поверхневого зміцнення, цей процес зазвичай використовується для більшої товщини вуглецевої плівки [22].

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліками є:

- можлива зміна структури металу;
- науглеводжені вироби потребують фінішної обробки;
- для проведення робіт потрібен досвід та дороге обладнання.

Висновки до розділу 2

Внаслідок науглевожування твердість верхнього шару металу (нелеговані сплави) досягає до 58 HRC, а на низьковуглецевих сплавів – до 60 HRC. В результаті вироби набувають потрібну твердість, а їх серцевина залишається в'язкою. При цьому варто враховувати, що в процесі збагачення може змінитися структура сплаву, і це, як згадувалося вище, є головним недоліком цементації. Щоб нівелювати цю властивість, науглевожені заготовки піддають гартуванню з наступним відпуском чи нормалізацією (залежить від типу сталі). У процесі гартування відбувається утворення фериту, що призводить до подрібнення зернової структури. Щоб уникнути поверхневих деформацій, проводять низькотемпературний відпуск сплаву.

М'які сталеві сплави, піддані науглевожуванню, мають тверду поверхню та м'яку серцевину. Це означає, що цементована низьковуглецева сталь твердіша, але не є крихкою. Серцевина значною мірою зберігає свою пластичність і міцність, будучи захищеною твердою поверхнею, що дозволяє виготовляти деталі навіть дуже складних форм (наприклад, внутрішні компоненти машин).

Посилена поверхня показує кращу стійкість до зносу та втоми – метали, що пройшли науглевожування, здатні витримувати високі навантаження і служать набагато довше.

Результати порівняння різних методів цементації (газової, рідинної, порошкової): середовище процесу, умови проведення, переваги та недоліки кожного способу наведено в таблиці 2.1.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика методів цементації

Метод	Середовище процесу	Умови проведення	Переваги	Недоліки	Приклади застосування
Газова цементація	Газоподібне (наприклад, CO, CH ₄)	Висока температура (900–950°C), контроль вуглецевого потенціалу	Хороша рівномірність шару, можливість автоматизації	Вимагає складного обладнання	Деталі автомобільних коробок передач, шестерні, вали – там, де потрібен рівномірний шар твердості й автоматизація процесу.
Рідинна цементація	Рідке (розплав солей із вуглецем)	Середня температура (800–850°C)	Вища швидкість процесу	Агресивне середовище, екологічні ризики	Дрібні або середні деталі складної форми (шпинделі, втулки), де потрібна висока швидкість обробки.
Порошкова цементація	Порошкоподібні суміші (наприклад, деревне вугілля)	Тривалий нагрів у твердій фазі	Простота обладнання	Тривалий час процесу, нерівномірність шару	Великогабаритні або індивідуальні деталі (наприклад, важкі зубчасті колеса), де не обов'язкова висока продуктивність, а обладнання обмежене.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЦЕМЕНТАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1 Основні математичні моделі процесу цементациї металевих конструкцій

Математичне моделювання дозволяє детально аналізувати закономірності розподілу вуглецю в сталевій матриці, прогнозувати глибину цементованого шару, твердості, а також кінетичні особливості фазових перетворень. За допомогою моделювання можливо обрати оптимальні температурно-часові режими обробки, зменшуючи при цьому кількість дорогих і тривалих експериментів [12].

Застосування чисельних методів та спеціального програмного забезпечення забезпечує можливість моделювання процесів цементациї в різних умовах: у газовому, твердому або вакуумному середовищі, з урахуванням геометрії деталі, її теплопровідності та структури. Це дозволяє мінімізувати похибки у виробництві та забезпечити стабільну якість обробки.

Крім того, моделі цементациї стають основою для створення автоматизованих систем керування технологічними процесами. Застосування цифрових технологій у рамках концепції «Industry 4.0» відкриває нові горизонти: від впровадження цифрових двійників до побудови систем прогнозування й оптимізації процесів у реальному часі [12].

Таким чином, математичне моделювання цементациї є не лише інструментом дослідження, а й потужним засобом практичної оптимізації виробництва, що забезпечує ефективність, надійність і передбачуваність результатів хіміко-термічної обробки.

Процес цементациї досліджується за допомогою математичних моделей дифузії вуглецю в сталь. Ці моделі дозволяють передбачити розподіл концентрації вуглецю, товщину цементованого шару, час обробки тощо. Це такі математичні моделі [4, 12].

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Модель на основі закону Фіка (Fick's Laws of Diffusion).

Перший закон Фіка – описує потік дифузії:

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

де J – густина потоку вуглецю, D – коефіцієнт дифузії, dc/dx – градієнт концентрації.

Другий закон Фіка – описує зміну концентрації в часі:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Це основне диференціальне рівняння для моделювання цементації.

2. Моделі зі змінним вуглецевим потенціалом.

Коли процес відбувається в ендотермічному середовищі, потрібно враховувати вплив газової атмосфери на концентрацію вуглецю на поверхні сталі, тобто ввести крайову умову:

$$c(x = 0, t) = c_s(t)$$

де $c_s(t)$ – концентрація вуглецю на поверхні, яка змінюється в залежності від вуглецевого потенціалу атмосфери.

3. Чисельне моделювання (Finite Difference / Finite Element Method).

Для складних умов (змінна температура, непостійний потенціал) використовують:

- Метод скінченних різниць (FDM);
- Метод скінченних елементів (FEM) – COMSOL, ANSYS, ABAQUS;

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Програмне забезпечення (SimuCarb, DANTE, Sysweld).

4. Емпіричні моделі.

Іноді застосовують наближені формули для оцінки глибини шару:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

або

$$x = k \cdot \sqrt{t}$$

де k – експериментально визначений коефіцієнт.

5. Термодинамічні моделі.

Використовують програмне забезпечення типу Thermo-Calc для розрахунку фазової рівноваги Fe–C та прогнозування структур після цементації.

3.2 Розробка математичних моделей цементації для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках

Відомо, що оптимізація процесу цементації на основі математичного моделювання є актуальною задачею, оскільки вона дозволяє знизити енерговитрати на проведення хіміко-термічної обробки, пов'язаної з просторовою конфігурацією деталі. У цій роботі пропонуються математичні моделі, що дозволяють з високим ступенем точності проводити моделювання процесу цементації металевих конструкцій. Моделі використовують цільову функцію, на основі якої вибирається функція коефіцієнта дифузії від температури, що дозволяє найкраще мінімізувати розкид теоретичних та експериментальних даних по концентрації вуглецю.

Для оптимізації процесу цементації пропонуються дві математичні моделі, кожна з яких має своє смислове навантаження при розрахунку процесу

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цементації. Перша математична модель (А) процесу цементації складається з рівнянь для оптимізації та вибору дифузійної залежності за експериментальними даними. Друга модель (В) призначена для моделювання розподілу вуглецю в сталі.

Математичні моделі складаються з:

– системи рівнянь (модель А): теплопровідності (1) та рівнянь дифузії (2)-(4) для модельного об'єкта, цільової функції F (5), значення якої необхідно мінімізувати відносно функції дифузії;

– системи рівнянь (модель В): теплопровідності (1) та рівнянь дифузії (12)-(14) для моделювання та розрахунку розподілу вуглецю в об'єкті.

3.2.1 Модель А процесу цементації (оптимізація).

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial C^p}{\partial \tau} = a_p e^{b_p T} \frac{\partial^2 C^p(x, a_p, b_p, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C^p}{\partial \tau} = a_p e^{b_p T} \frac{\partial^2 C^p(y, a_p, b_p, \tau)}{\partial y^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C^p}{\partial \tau} = a_p e^{b_p T} \frac{\partial^2 C^j(z, a_p, b_p, \tau)}{\partial z^2}, \quad (4)$$

$$F_p = \sum_{i=1}^{40} (C_i^p - C_i^{\text{експ}})^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

де $(x, y, z) \in \Omega_1$; Ω_1 – простір модельного металевго об'єкта; Ω_2 – простір вуглецевмісного середовища печі (рис. 3.1); $T(x, y, z, \tau)$ – функція температури в точці середовища і об'єкта з координатами (x, y, z) у час τ ; $c(T)$ – питома теплоємність сталі модельного об'єкта за температури T ; $\rho(T)$ – функція густини

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сталі модельного об'єкта при температурі T ; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності сталі модельного об'єкта при температурі T ; $C_i^p = C^p(h_i, a_p, b_p, \tau)$ – значення концентрації вуглецю в металевому об'єкті, розраховані з використанням моделі А для h_i -ої глибини куба та коефіцієнтів a_p, b_p ; $C_i^{експ}$ – значення концентрацій вуглецю в металевому об'єкті для h_i -ої глибини модельного об'єкта – задані режими печі EPSEN (фірми Epsen Industrial Furnaces (Німеччина), що спеціалізується на виробництві вакуумних печей (для гартування, цементації, азотування)); $h_i, i = 1, \dots, 40$ – глибина i -го шару модельного об'єкта, починаючи від поверхні з кроком 0,05 мм; F_p - цільова функція, значення якої необхідно мінімізувати з метою знаходження оптимальних значень a_p, b_p .

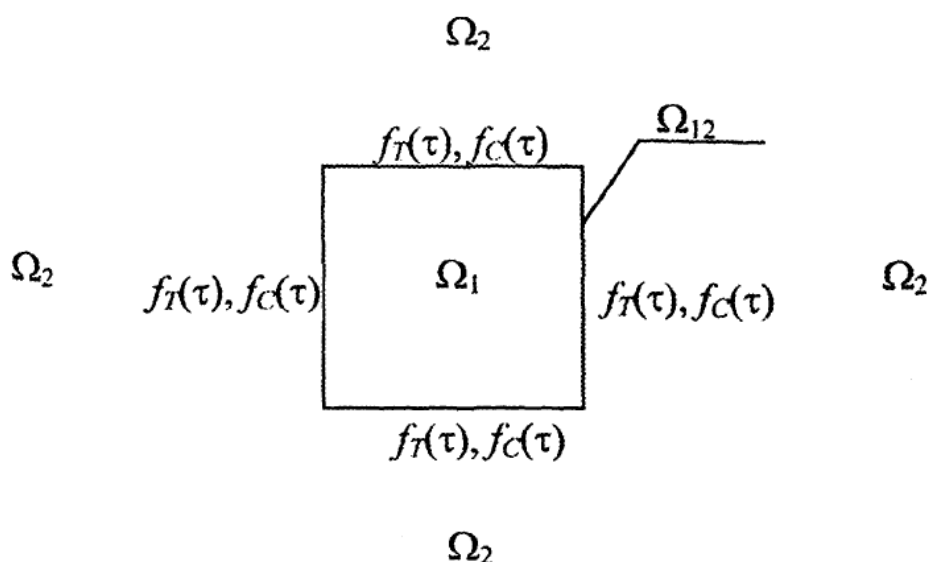


Рисунок 3.1 – Ілюстрація граничних умов для температури та вуглецевого потенціалу середовища (проекція модельного об'єкта дослідження)

Розв'язком системи (1) – (5) є коефіцієнти, що дозволяють мінімізувати F_p .

Граничні умови II роду для температури та концентрації вуглецю для точок з координатами $(x, y, z) \in \Omega_{12}$ є:

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$\begin{cases} T(x, y, z, \tau)|_{\Omega_{12}} = f_T(\tau), \\ C(x, y, z, \tau)|_{\Omega_{12}} = f_C(\tau) \end{cases}$$

де Ω_{12} – межа модельного об'єкта з вуглецевмісним середовищем (рис. 3.1); $f_T(\tau)$ – функціональна залежність, яка задає закон зміни температури на межі об'єкта, що розраховується, (рис. 3.2); $f_C(\tau)$ – функціональна залежність, яка задає закон зміни концентрації вуглецю (вуглецевого потенціалу) на межі об'єкта, що розраховується, (рис. 3.3). Як вуглецевий потенціал було взято експериментальні дані, що характеризують закон зміни вуглецевого потенціалу від часу в печах типу EPSEN. Як початкові значення коефіцієнта дифузії взяті експериментальні дані з роботи [18, 23].

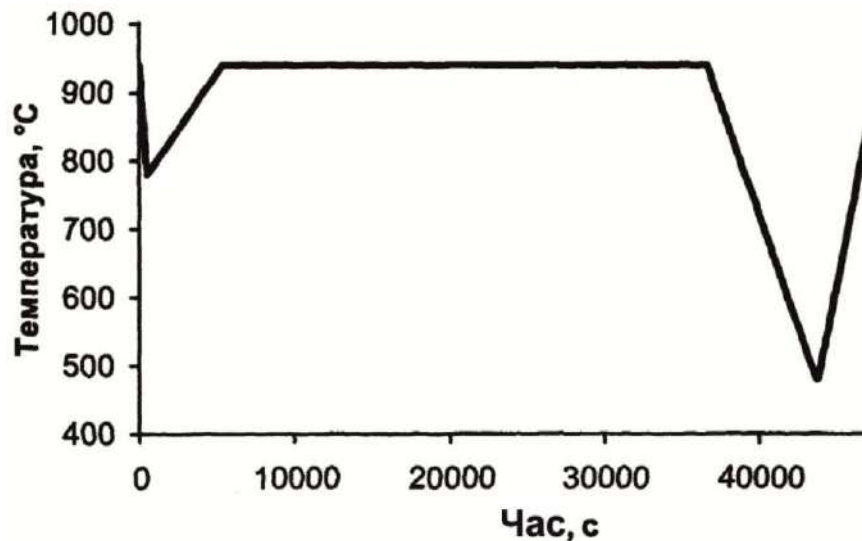


Рисунок 3.2 – Зміна температури середовища залежно від часу цементації

На рис. 3.3 показана геометрична область з ілюстрацією граничних умов об'єкта, що розраховується.

Початкові умови з координатами $(x, y, z) \in \Omega_1$ є:

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{cases} C_{t=0} = 0,1, \\ T_{t=0} = 20 \end{cases}$$

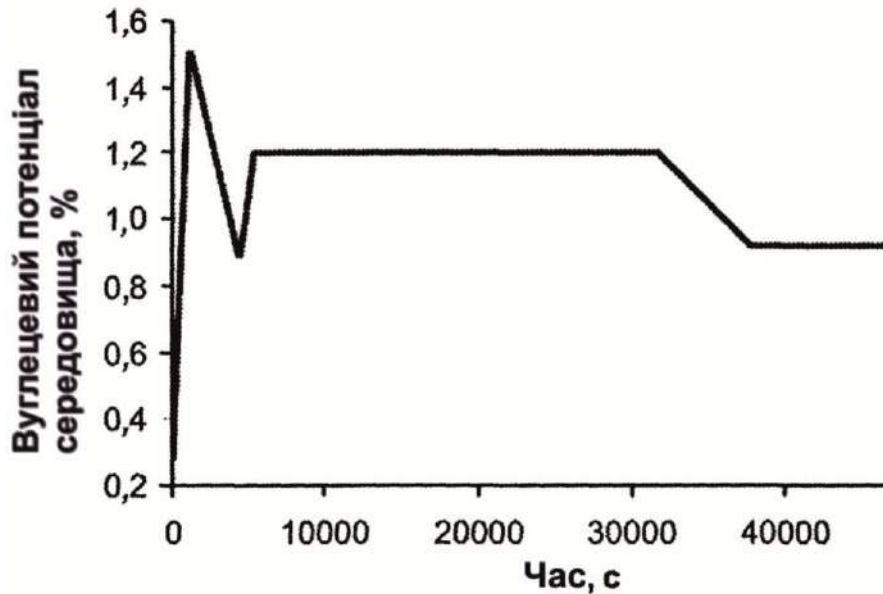


Рисунок 3.3 – Зміна значення вуглецевого потенціалу середовища залежно від часу цементації

Як модельний об'єкт дослідження для застосування описаної вище математичної моделі був обраний зразок зі сталі з розмірами $a = b = c = 100$ мм.

При розв'язанні рівнянь моделі А використали такий алгоритм оптимізації.

Алгоритм оптимізації дифузійної функції.

Крок 1. Обчислення температурного поля модельного об'єкта.

Початок циклу.

Крок 2. Задання $j = 1$ (*1-а ітерація циклу*).

Крок 3. Задання коефіцієнтів a_1 , b_1 для визначення функції зміни коефіцієнта дифузії $D_1 = a_1 e^{b_1 T}$.

Крок 4. Розрахунок дифузійного поля куба (розподіл вуглецю по глибині об'єкта – функція C_1).

Крок 5. Визначення значення цільової функції F_1 .

Крок 6. Збільшення j на 1 ($j = 2$) (2-а ітерація циклу).

Крок 7. Задання коефіцієнтів a_2 , b_2 для визначення функції зміни коефіцієнта дифузії $D_2 = a_2 e^{b_2 T}$.

Крок 8. Розрахунок дифузійного поля куба (розподіл вуглецю за глибиною об'єкта – функція C_2).

Крок 9. Визначення значення цільової функції F_2 .

Повторювати кроки 2-5 поки $j < n$, де n – кількість ітерацій циклу.

Кінець циклу.

Крок k . Визначення оптимальних параметрів $a_{\text{опт}}$, $b_{\text{опт}}$, при яких цільова функція F_p досягає мінімуму.

Кінець алгоритму.

Після знаходження коефіцієнта дифузії $D_{\text{опт}}$ було проведено моделювання розподілу вуглецю у зразках із заданим вуглецевим потенціалом середовища.

Моделювання температурного поля об'єкта проводили з використанням явної схеми методу скінченних різниць для тривимірного об'єкта (рис. 3.1) за допомогою програмних модулів DICTRA (Thermo-Calc). Застосування та послідовність роботи в системі Thermo-Calc описані в [24]. При моделюванні були використані такі параметри чисельної схеми: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,0005$ м, $\Delta \tau = 0,02$ с. Теплофізичні характеристики об'єкта: $c = 600$ Дж/(кг К), $\lambda = 40$ Вт/(м К), $\rho = 7600$ кг/м³.

У результаті моделювання була розрахована динаміка нагрівання модельного об'єкта (рис. 3.4). Як видно з рисунка, вона визначається функцією зміни температури середовища (гранична умова – функція $f_T(\tau)$).

Моделювання дифузійного поля проводили з використанням явної схеми методу скінченних різниць для одновимірного рівняння. При моделюванні були

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використані такі параметри чисельної схеми: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,00003$ м,
 $\Delta \tau = 0,8$ с.

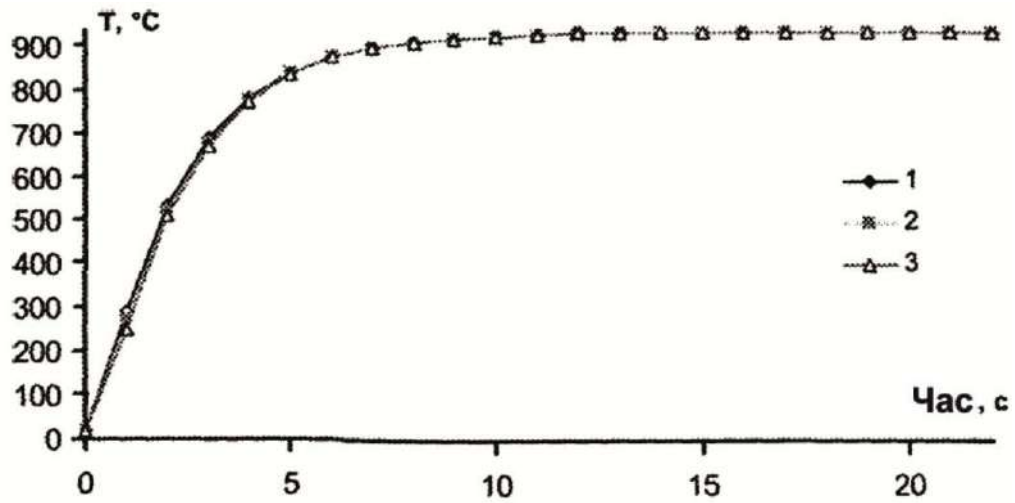


Рисунок 3.4 – Динаміка зміни температури модельного об’єкта на глибині:

1 – 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм

Таким чином, з урахуванням розв’язків рівнянь системи за допомогою методу скінчених різниць систему рівнянь (1)-(5) можна записати в такому вигляді:

$$T_{i,j,k}^{m+1} = T_{i,j,k}^m + \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{T_{i-1,j,k}^m - 2T_{i,j,k}^m + T_{i+1,j,k}^m}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1,k}^m - 2T_{i,j,k}^m + T_{i,j+1,k}^m}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j,k-1}^m - 2T_{i,j,k}^m + T_{i,j,k+1}^m}{\Delta z^2} \right), \quad (6)$$

$$(C_k^{m+1})^p = (C_k^m)^p + D_p \left(\frac{(C_{k-1}^m)^p - 2(C_k^m)^p + (C_{k+1}^m)^p}{\Delta x^2} \right), \quad (7)$$

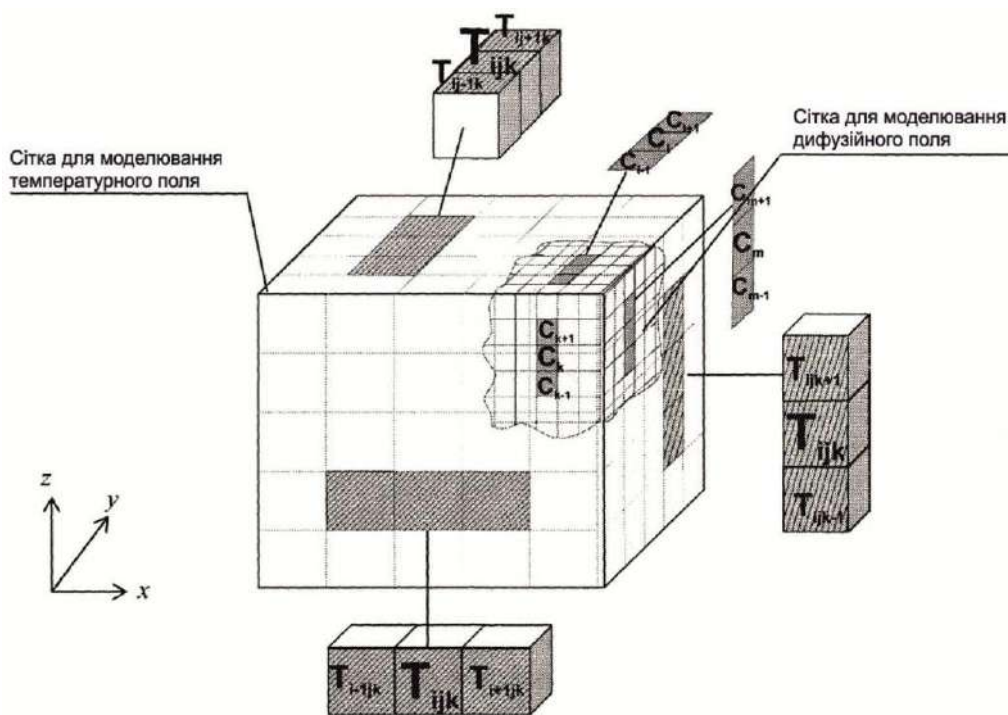
$$(C_l^{m+1})^p = (C_l^m)^p + D_p \left(\frac{(C_{l-1}^m)^p - 2(C_l^m)^p + (C_{l+1}^m)^p}{\Delta y^2} \right), \quad (8)$$

$$(C_l^{m+1})^p = (C_l^m)^p + D_p \left(\frac{(C_{l-1}^m)^p - 2(C_l^m)^p + (C_{l+1}^m)^p}{\Delta z^2} \right), \quad (9)$$

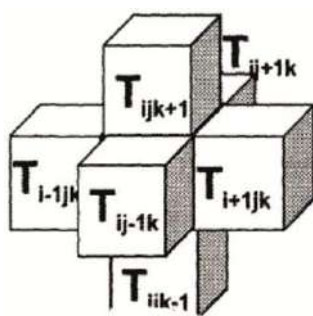
$$F_p = \sum_{i=1}^{40} (C_i^p - C_i^{\text{експ}})^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

де рівняння (6) – формула визначення температури для $(m + 1)$ -го часового шару; i, j, k – вузли сіткової структури температурного поля модельного об'єкта; рівняння (7)-(9) – формули для визначення концентрацій на $(m + 1)$ -му часовому шарі; k, l, n – вузли сіткової структури дифузійного поля модельного об'єкта.

Ілюстрація застосування явних схем методу скінченних різниць для моделювання температурного та дифузійного полів подана на рис. 3.5.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Ілюстрація застосування явної схеми методу скінченних різниць для моделювання температурного та дифузійного полів модельного об'єкта:
а – суміщення сіток для моделювання температурного та дифузійного полів;
б – фрагмент сітки температурного поля

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Як видно з рисунка, різниця між умовами моделювання температурного і дифузійного полів полягає у розмірі сіткового елемента. Для дифузійного поля крок просторової сітки менший, ніж крок просторової сітки температурного поля.

Для моделювання коефіцієнти задавалися в такий спосіб, щоб наблизити функцію зміни значення коефіцієнта дифузії $D_p(a_p, b_p, T)$ до заданого діапазону (рис. 3.6) [18].

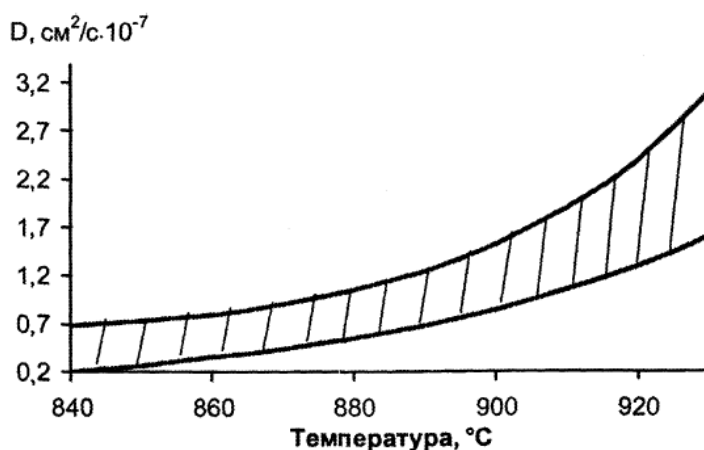


Рисунок 3.6 – Діапазон значень коефіцієнта дифузії залежно від температури

3.2.2 Модель В (моделювання розподілу вуглецю в сталі)

$$\left\{ \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right), \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \frac{\partial C}{\partial \tau} = a_{\text{опт}} e^{b_{\text{опт}} T} \frac{\partial^2 C(x, a_{\text{опт}}, b_{\text{опт}}, \tau)}{\partial x^2}, \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \frac{\partial C}{\partial \tau} = a_{\text{опт}} e^{b_{\text{опт}} T} \frac{\partial^2 C(y, a_{\text{опт}}, b_{\text{опт}}, \tau)}{\partial y^2}, \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \frac{\partial C}{\partial \tau} = a_{\text{опт}} e^{b_{\text{опт}} T} \frac{\partial^2 C(z, a_{\text{опт}}, b_{\text{опт}}, \tau)}{\partial z^2}. \right. \quad (14)$$

При розв'язанні рівнянь систем для моделі використовували наступний алгоритм розрахунку.

Алгоритм розрахунку деталі.

Крок 1. Обчислення температурного поля деталі.

Крок 2. Розрахунок дифузійного поля деталі (функція C) з використанням отриманих оптимальних параметрів $a_{\text{опт}}$, $b_{\text{опт}}$. Результати моделювання з використанням рівнянь системи моделі А наведені в таблиці 3.1;

- для кожного варіанта p (стовпець 1) значення коефіцієнтів a_p , b_p (стовпці 2 та 3) та вид кривої зміни функції коефіцієнта дифузії D у порівнянні з діапазоном, наведеним на рис. 3.1 (пунктирні лінії);

- розподіл вуглецю в модельному об'єкті після закінчення цементації (період часу = 49 000 с), розрахований з використанням моделі А (суцільна крива) та задані режими печі EPSEN (пунктирна крива); на графіки нанесені задані значення ($h_{\text{зад}}$) та розрахункові значення ($h_{\text{розрах}}$) глибини цементації (стовпець 4);

- значення цільової функції F_p .

Як видно з таблиці 3.1, вид розподілу вуглецю в модельному об'єкті після закінчення цементації у порівнянні з заданими режимами печі EPSEN для значень концентрацій вуглецю різних.

До прикладу, для функції $D = D_4 = 0,000000001 \cdot e^{0,021T}$ після $h > 0,2$ мм спостерігається занадто різке зменшення розрахункової функції по розподілу вуглецю в порівнянні з заданими режимами. Для функції $D = D_9 = 0,0000000045 \cdot e^{0,022T}$ після $h > 0,5$ мм також спостерігається розбіжність розрахункової функції із заданою. Подібна тенденція спостерігається і для функції $D = D_1 = 0,000000005 \cdot e^{0,019T}$.

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Моделювання розподілу вуглецю по глибині модельного об'єкта для різних коефіцієнтів a_p , b_p

p	b_p	a_p	Розподіл вуглецю по глибині об'єкта	F_p
	Функція D_p			
1	0,019	0,000000058		0,382
2	0,0247	0,0000000002		0,691
3	0,0223	0,0000000015		0,360
4	0,021	0,000000001		2,712
5	0,0226	0,000000002		0,496

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ

Арк.

49

p	b_p	a_p	Розподіл вуглецю по глибині об'єкта	F_p
	Функція D_p			
6	0,0227	0,00000000165		0,381
7	0,02265	0,00000000165		0,334
8	0,02265	0,00000000145		0,243
9	0,0232	0,0000000009		0,261
10	0,022	0,0000000045		0,876

Аналіз наведених результатів показав, що найкращою функцією дифузії є $D = D_8 = 0,00000000145 \cdot e^{0,02265T}$, яка забезпечує мінімальний розкид заданого і

розрахункового вуглецю у зразку (значення цільової функції = 0,243), тому для проведення подальших розрахунків була обрана ця функція для моделі В.

Як видно з рисунків таблиці 3.1 (стовпець «Розподіл вуглецю по глибині об'єкта»), задане значення глибини цементації ($h_{\text{зад}} = 1,48$ мм) є досить близьким до експериментального ($h_{\text{експ}} = 1,4$ мм).

Було проведено дослідження зміни концентрації вуглецю в поверхневій кромці об'єкта. На рис. 3.7 показано зміну концентрації вуглецю в часі в поверхневій кромці модельного об'єкта, розрахованої з використанням функцій D_4 (крива 1), D_9 (крива 2), D_8 (крива 3), задані режими машини EPSEN (крива 4), у вуглецевмісному середовищі (крива 5 – функція $f_C(\tau)$).

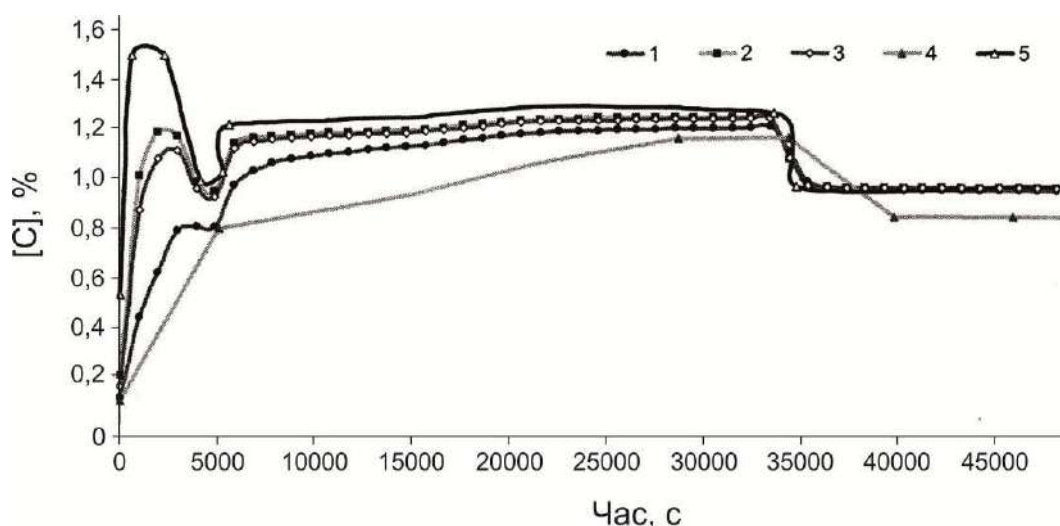


Рисунок 3.7 – Розподіл вуглецю в поверхневій кромці об'єкта

за часом цементації залежно від функції дифузії:

- 1 – функція D_4 ; 2 – функція D_9 ; 3 – функція D_8 ; 4 – задані режими печі EPSEN;
5 – зміна вуглецевого потенціалу середовища

Як видно з рисунка, у початковий період дифузії спостерігається різке зростання у проникненні вуглецю в метал, яке далі для критичного моменту часу знижується. Для різних функцій D динаміка насичення поверхневого шару

має різний характер. Процес дифузії вуглецю в сталь можна розділити на шість областей:

- інтервал $t \in (0; 3500)$ – відбувається активне насичення вуглецем поверхневої кромки;
- інтервал $t \in (3500; 5100)$ – величина концентрації вуглецю падає;
- інтервал $t \in (5100; 6000 \dots 11000)$ – значення концентрації вуглецю збільшується до 1,16-1,2%;
- інтервал $t \in (6000 \dots 11000; 34000)$ – величина концентрації вуглецю стала;
- інтервал $t \in (34000; 37000)$ – відбувається різке зниження концентрації;
- інтервал $t \in (37000; 49000)$ – відбувається повільне зниження вмісту вуглецю.

На початковій ділянці дифузії розподіл вуглецю повторює перебіг заданого вуглецевого потенціалу та зміни температурного режиму.

На рис. 3.8 показано розподіл вуглецю по глибині модельного об'єкта для різних періодів часу.

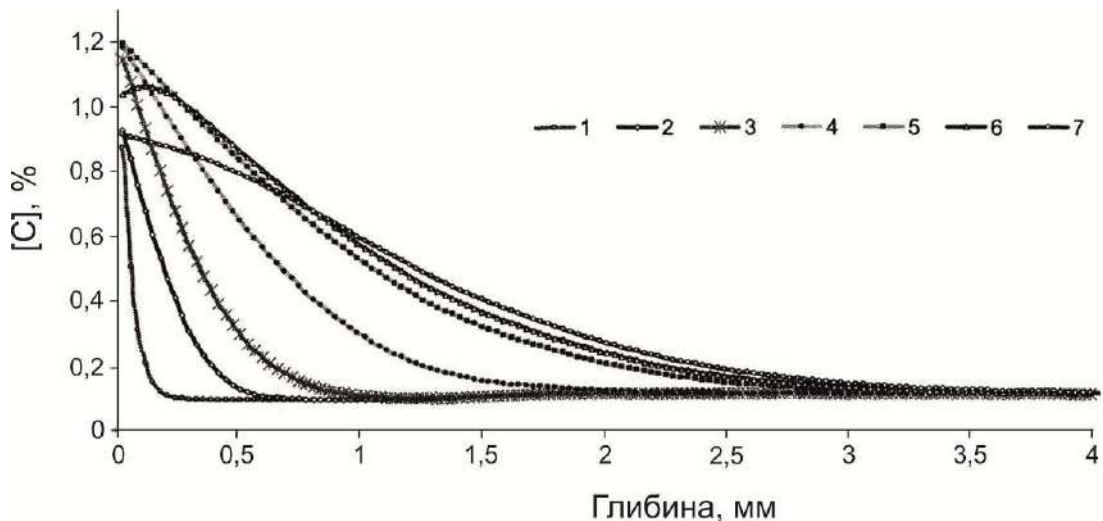


Рисунок 3.8 – Розподіл вуглецю по глибині об'єкта для різних періодів часу Δt :

1 – $\Delta t = 1000$ с; 2 – $\Delta t = 5000$; 3 – $\Delta t = 7000$;

4 – $\Delta t = 15000$; 5 – $\Delta t = 30000$; 6 – $\Delta t = 35000$; 7 – $\Delta t = 49000$ с

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як видно із рис. 3.7 і 3.8 процес дифузії можна умовно розбити на два етапи:

- спочатку відбувається активне насичення вуглецем (криві 1-5, рис. 3.8),
- потім проводиться перерозподіл вуглецю всередину об'єкта (криві 6, 7, рис. 3.8). Це пов'язане із зниженням температури середовища (див. рис. 3.2). Оскільки при зниженні температури коефіцієнт дифузії і насичення вуглецем поверхневих шарів зменшуються, вуглець дифузує в глиб об'єкта.

На рис. 3.9 наведено зміни концентрацій вуглецю для шарів модельного об'єкта різної глибини, розраховані з використанням функції D_7 .

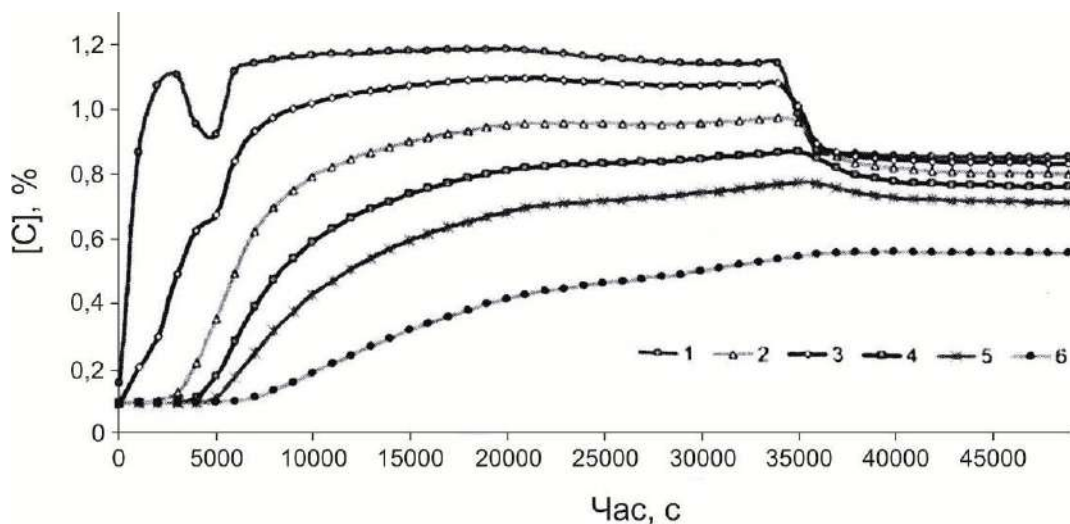


Рисунок 3.9 – Зміна концентрації вуглецю для шарів модельного об'єкта різної глибини цементации h :

1 – $h = 0$ (в поверхневій кромці об'єкта); 2 – $h = 0,15$ мм;

3 – $h = 0,3$; 4 – $h = 0,45$; 5 – $h = 0,6$; 6 – $h = 1$ мм

З рисунка видно, що для різних шарів динаміка насичення вуглецем різна. Для шарів об'єкта, що знаходяться ближче до поверхні, функція зміни концентрації повторює характер функції зміни вуглецевого потенціалу середовища (функція $f_c(\tau)$). Для глибших шарів динаміка насичення має більш плавний характер.

Висновки до розділу 3

Розроблена модель хіміко-термічної обробки сталевих деталей, що складається з тривимірного рівняння теплопровідності, одновимірного рівняння дифузії за трьома координатами (x, y, z), що відрізняється від відомих наявністю цільової функції, граничними умовами, що дає можливість проводити чисельний пошаровий аналіз розподілу концентрації вуглецю.

Це має важливе практичне значення для хіміко-термічної обробки деталей. Представлені результати показують широкі можливості щодо моделювання розподілу вуглецю в сталі, підданій цементації.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						54
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВКИ

Цементацию широко застосовують у машинобудуванні для підвищення твердості та зносостійкості виробів із збереженням високої в'язкості їх серцевини.

Питомий обсяг загартованого науглероженного шару більше, ніж серцевини, і тому в ньому виникають значні стискаючі напруги.

Залишкові напруги стиснення в поверхневому шарі, що досягають 400-500 МПа, підвищують межу витривалості виробу. Низький вміст вуглецю (0,08-0,3%) забезпечує високу в'язкість серцевини за рахунок неповної прожарюваності. Цементации піддають якісні сталі 08, 10, 15 і 20 та леговані сталі 12ХНЗА, 18ХГТ та ін. Твердість поверхневого шару для вуглецевої сталі становить 60-64 HRC, а для легованої – 58-61 HRC; зниження твердості пояснюється утворенням підвищеної кількості залишкового аустеніту [25].

Застосування розрахункових методів дозволяє оперативно отримувати інформацію про характеристики зміцненого шару, швидкість протікання дифузійних процесів, формування карбідної фази, а також ефективно варіювати температурно-часові режими обробки.

У роботі проаналізовано математичні моделі, що дозволяють з високим ступенем точності проводити моделювання процесу цементации металевих конструкцій.

На їх основі розроблено модель хіміко-термічної обробки сталевих деталей методом динамічної газової цементации. Модель складають тривимірне рівняння теплопровідності, одновимірні рівняння дифузії за трьома координатами (x , y , z). Вона відрізняється від відомих наявністю цільової функції, граничними умовами, що дає можливість проводити чисельний пошаровий аналіз розподілу концентрації вуглецю.

Це має важливе практичне значення для хіміко-термічної обробки деталей. Представлені результати показують широкі можливості щодо моделювання розподілу вуглецю в сталі, підданій цементации.

					<i>КРЕМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Dearnley P.A. Introduction to Surface Engineering. Cambridge University Press; 2017.

2 Основи фізико-технічних та хіміко-термічних процесів для підвищення ресурсу виробів машинобудування : навчальний посібник для здобувачів ступеня доктора філософії, що навчаються за спеціальністю 131 "Прикладна механіка" / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С.П. Гожій. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 104 с. URI : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48518>

3 Samaras, G. F., Haidemenopoulos, G. N. (2015). Carburization of high-temperature steels: A simulation-based ranking of carburization resistance. Engineering Failure Analysis, 51, 29-36.

4 Hosseini, S. R. E., Li, Z. (2016). Pack Carburizing: Characteristics, Microstructure, and Modeling. Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys (Online Version), 1-24.

5 Матеріалознавство. Організація самостійної та практичної роботи : навчальний посібник / В. І. Савуляк, О. П. Шиліна, В. Й. Шенфельд. – Вінниця : ВНТУ, 2019.

6 Теорія і технологія термічної обробки : методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 132 «Матеріалознавство» / О. С. Дробот. Хмельницький : ХНУ, 2022. 35 с.

7 Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.

8 Хижняк В.Г., Курило Н. А., Більченко О. В. Вплив ступеня дисоціації аміаку на структуру та властивості неіржавіючих азотованих сталей. Металознавство та термічна обробка металів. 2009. – Х12. – с. 31-34.

9 Wołowicz-Korecka, E. (2018). Modeling methods for gas quenching, low-pressure carburizing and low-pressure nitriding. Engineering Structures, 177, 489-505.

					КРЕМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10 Wang H, Liu J, Tian Y, Wang Z, An X. Mathematical Modeling of Carbon Flux Parameters for Low-Pressure Vacuum Carburizing with Medium-High Alloy Steel. Coatings. 2020; 10(11):1075. <https://doi.org/10.3390/coatings10111075>

11 Колісник Р. В. Моделювання процесів кінетики нагріву при хіміко-термічній обробці інструментальної сталі Р6М5 : дипломна робота магістра : 132 Матеріалознавство / Р. В. Колісник ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2024. – 100 с. URI : <https://elar.khmmu.edu.ua/handle/123456789/17354>

12 Păun, D., Cojocaru, Mihai Ovidiu, Mihailov, Valentin. (2012). Mathematical modeling of the influence of main carburizing thermochemical treatment parameters on the surface hardness of parts made of MSRR 6009 steel. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 48. 10.3103/S106837551203009X.

13 Металловедение и термическая обработка стали: Справочник / Под общ. ред. М. Л. Берштейна, А. Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение. – Т. 2.- 1962. – 1358-1363 с.

14 Iron-carbon phase diagram. URL: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=iron-carbon_phase_diagram

15 Knerr C. H., Rose T. C. and Fikowski I. H. Gas Nitriding, Heat Treating. Vol 14, ASM Handbook, ASM International, 1991, p. 387-400.

16 Mohrbacher, H. (2016). Metallurgical concepts for optimized processing and properties of carburizing steel. Advances in Manufacturing, 4(2), 105-114.

17 Wani, Z., & Kumar, N. (2020). A review on carburizing temperature and the mechanical behaviour of mild steel. Dogo Rangsang Research Journal, 10(9), 115-128.

18 Venkatesh, B., & Reddy, C. A. K. (2021). Experimental study on heat treatment and mechanical behaviour of M50 NiL steel–A review. Materials Today: Proceedings, 46, 795-798.

19 Chen, W., He, X., Yu, W., Wang, M., & Yao, K. (2021). Microstructure, hardness, and tensile properties of vacuum carburizing gear steel. Metals, 11(2), 300.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20 Vamshi, M., Singh, S. K., Sateesh, N., Nagaraju, D. S., & Subbiah, R. (2020). A review on influence of carburizing on ferritic stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 26, 937-943.

21 Boumediri, H., Touati, S., Debbah, Y., Selami, S., Chitour, M., Khelifa, M., ... & Fernandes, F. (2024). Effect of carburizing time treatment on microstructure and mechanical properties of low alloy gear steels. *Materials Research Express*, 11(7), 076505.

22 Fuller, A. J. (2017). *Carburizing*.

23 Chen, W., He, X., Yu, W., Shi, J., Wang, M., & Yao, K. (2021). Characterization of the microstructure and hardness of case-carburized gear steel. *Micron*, 144, 103028.

24 Thermo-Calc Software AB. Diffusion Module (DICTRA) Getting Started Guide. Stockholm, Sweden: Thermo-Calc Software AB, 2020. Доступно: <https://thermocalc.com/support/getting-started-guides/diffusion-module-dictra-guide/> Thermo-Calc Software+3Thermo-Calc Software+3Thermo-Calc Software+3

25 Edenhofer, B., Joritz, D., Rink, M., & Voges, K. (2015). Carburizing of steels. In *Thermochemical surface engineering of steels* (pp. 485-553). Woodhead Publishing.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК

					КРЕМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Презентаційний матеріал

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

ОПТИМІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ ТА ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦЕМЕНТАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Виконав: студент групи МТВАс-22-2 Кучерук М.В.

Керівник: д.т.н., доцент Драч І.В.

1

ОБ'ЄКТ дослідження – процеси газової динамічної цементациї.

ПРЕДМЕТ дослідження – математичні моделі розподілу вуглецю у зразках.

МЕТА кваліфікаційної роботи полягає в розробці математичних моделей цементациї для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках, поміщених у вуглецевомісне термічне середовище із змінним вуглецевим потенціалом.

ЗАВДАННЯ кваліфікаційної роботи:

- вивчити основи процесу цементациї: визначення, мету, механізм процесу та основні технологічні параметри;
- порівняти особливості різних методів цементациї (газової, рідинної, порошкової): середовище процесу, умови проведення, переваги та недоліки кожного методу;
- розробити та проаналізувати математичні моделі насичення вуглецем для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках при газовій динамічній цементациї.

2

Результати аналізу предметної області

Основні особливості цементациї :

1. Мета процесу

- Підвищення твердості поверхні сталевих деталей.
- Підвищення зносостійкості та витривалості при терті.
- Збереження міцності та ударної в'язкості в середині деталі.

2. Матеріали для цементациї

- В основному використовуються **низьковуглецеві сталі** (0,1–0,25% С).
- Це дозволяє легко обробляти деталь до цементациї, а після — отримати міцну сердцевину й тверду поверхню.

3. Температурний режим

- Зазвичай проводиться при **900–950 °С**.
- Висока температура сприяє дифузії атомів вуглецю в поверхневі шари сталі.

4. Тривалість процесу


- Залежить від бажаної глибини цементованого шару (0,5–2,5 мм).
- Тривалість — від кількох годин до десятків годин.

5. Подальша обробка

- Після цементациї деталі **гартують** (різко охолоджують) і часто **відпускають**, щоб зняти внутрішні напруження.
- Це дозволяє досягти **твердості 58–64 HRC** на поверхні.

6. Застосування

- Зубчасті колеса, вали, втулки, кулачки, шестерні, направляючі тощо.
- У машинобудуванні, автомобілебудуванні, авіаційній промисловості.



Переваги:

- ✓ Висока зносостійкість
- ✓ Міцна і пластична сердцевина
- ✓ Можливість локальної обробки

Недоліки:

- ✗ Тривалість і енергомісткість процесу
- ✗ Вартість обладнання
- ✗ Можливість деформацій

3

					КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

МЕТОДИ ЦЕМЕНТАЦІЇ :

Тверда цементация — у твердих вуглецевмісних середовищах

- Карбюризатор: деревне вугілля + активатори
- ✓ Простота, низька вартість
- ✗ Повільніша в 2 рази

Газова цементация — у середовищі газів

- Середовище: метан + оксид вуглецю
- ✓ Висока продуктивність, можливість регулювання
- ✗ Дороге обладнання

Рідинна цементация — у вуглецевмісних соляних ваннах

- Середовище: розплави солей при 850°C
- ✓ Рівномірне покриття, без деформації
- ✗ Малі глибини (до 0,5 мм)

Вакуумна цементация

- Найсучасніший метод
- ✓ Прискорення процесу, точне регулювання
- ✗ Найдорожче обладнання



4

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЦЕМЕНТАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Математичне моделювання процесу цементации дозволяє:

- Прогнозувати розподіл вуглецю в металі;
- Обирати оптимальні режими обробки (температура, час);
- Зменшувати кількість дорогих експериментів;
- Автоматизувати процес у рамках концепції "Industry 4.0".

Основні моделі :

1. Закон Фіка:

- 1-й закон — описує швидкість потоку вуглецю
- 2-й закон — описує зміну концентрації з часом

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad \frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

2. Моделі зі змінним вуглецевим потенціалом:

- Враховують реальні умови атмосфери печі, яка впливає на концентрацію вуглецю на поверхні

$$c(x=0, t) = c_s(t)$$

5

Основні моделі :

3. Чисельне моделювання:

- Методи скінченних різниць та скінченних елементів (COMSOL, ANSYS, Thermo-Calc).
- Дають змогу змоделювати складну геометрію, змінну температуру, тощо

4. Емпіричні моделі:

- Дають швидку оцінку глибини цементации за спрощеними формулами.

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = k \cdot \sqrt{t}$$

5. Термодинамічні моделі:

- Використовують Thermo-Calc для прогнозування фаз і структур.

6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ

Арк.

61

Розробка математичних моделей цементації для оптимізації та моделювання розподілу вуглецю у зразках

Модель А процесу цементації (оптимізація) :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial C^p}{\partial \tau} = a_p e^{b_p T} \frac{\partial^2 C^p(x, a_p, b_p, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C^p}{\partial \tau} = a_p e^{b_p T} \frac{\partial^2 C^p(y, a_p, b_p, \tau)}{\partial y^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C^p}{\partial \tau} = a_p e^{b_p T} \frac{\partial^2 C^p(z, a_p, b_p, \tau)}{\partial z^2}, \quad (4)$$

$$F_p = \sum_{i=1}^{40} (C_i^p - C_i^{\text{експ}})^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

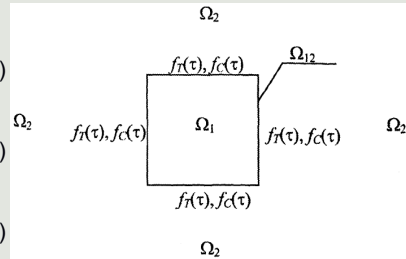


Рисунок 1 – Ілюстрація граничних умов для температури та вуглецевого потенціалу середовища (проекція модельного об'єкта дослідження)



7

Модель В (моделювання розподілу вуглецю в сталі) :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right), \quad (11)$$

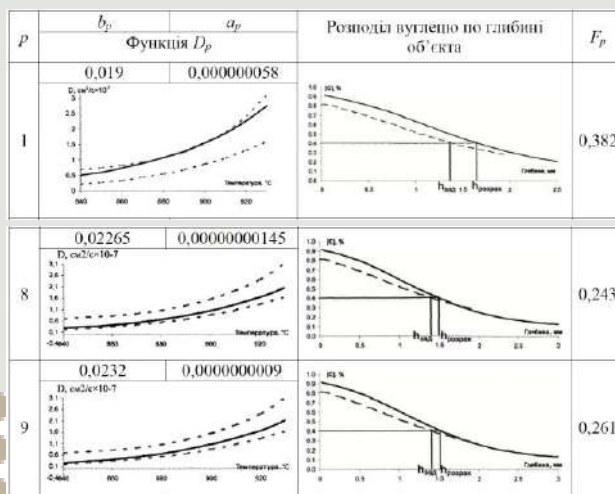
$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = a_{\text{опт}} e^{b_{\text{опт}} T} \frac{\partial^2 C(x, a_{\text{опт}}, b_{\text{опт}}, \tau)}{\partial x^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = a_{\text{опт}} e^{b_{\text{опт}} T} \frac{\partial^2 C(y, a_{\text{опт}}, b_{\text{опт}}, \tau)}{\partial y^2}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = a_{\text{опт}} e^{b_{\text{опт}} T} \frac{\partial^2 C(z, a_{\text{опт}}, b_{\text{опт}}, \tau)}{\partial z^2}. \quad (14)$$

8

Результати моделювання :



9

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КРБМТВАТАМ 25 22155. 000 ПЗ

Результати моделювання :

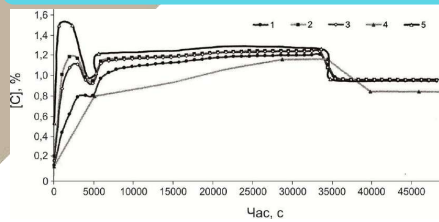


Рисунок 2 – Розподіл вуглецю в поверхневій кромці об'єкта за часом цементації залежно від функції дифузії: 1 – функція D_4 ; 2 – функція D_9 ; 3 – функція D_6 ; 4 – задані режими печі EPSEN; 5 – зміна вуглецевого потенціалу середовища

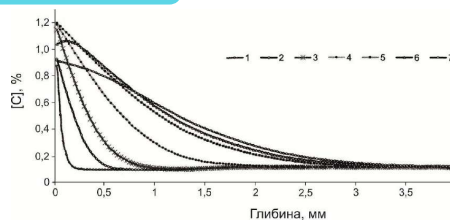
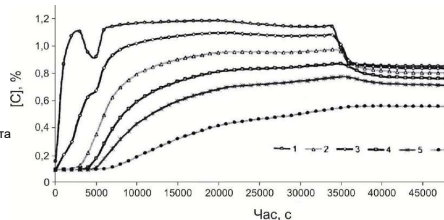


Рисунок 3 – Розподіл вуглецю по глибині об'єкта для різних періодів часу Δt : 1 – $\Delta t = 1000$ c; 2 – $\Delta t = 5000$; 3 – $\Delta t = 7000$; 4 – $\Delta t = 15000$; 5 – $\Delta t = 30000$; 6 – $\Delta t = 35000$; 7 – $\Delta t = 49000$ c

Рисунок 4 – Зміна концентрації вуглецю для шарів модельного об'єкта різної глибини цементації h : 1 – $h = 0$ (в поверхневій кромці об'єкта); 2 – $h = 0,15$ мм; 3 – $h = 0,3$; 4 – $h = 0,45$; 5 – $h = 0,6$; 6 – $h = 1$ мм



10

ВИСНОВКИ

- Цементация — эффективный способ упрочнения стальных деталей, что широко используется в машиностроении. Она позволяет сделать поверхность очень твердой (до 64 HRC), а сердцевину — пластичной и прочной. Это обеспечит высокую износостойкость и долговечность изделий.
- У работе проанализированы современные математические модели процесса цементации, которые позволяют точно предсказывать распределение углерода в металле и оптимизировать параметры обработки.
- Разработана модель, которая позволяет проводить вычисления с учетом температуры, времени и геометрии детали, что особенно ценно для автоматизации и цифрового контроля в условиях современного производства.

11