

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний

(повне найменування факультету)

Фізичне матеріалознавство

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯМ СВЧ З
МЕТОЮ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ШЕСТЕРЕНЬ

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) ІІ курсу, групи ІФ-213м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

ЦИГАНЕНКО Д.Р.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВІНІЧЕНКО В.С.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент: _____

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний
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 ФМ, д.т.н., проф.
ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ В.Ю.
« » 20 року

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

ЦИГАНЕНКА Данила Романовича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи): Дослідження процесу нагрівання застосуванням свч з метою розробки технології термічної обробки шестерень

керівник проєкту (роботи) Вініченко Валерій Степанович доцент каф. ФМ, к.т.н

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові.)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « » 2024 року №

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) технологія нагрівання СВЧ, умови експлуатації шестерень, зразки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): літературний огляд, матеріали та методи дослідження, результати та їх обговорення, охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях, економічна частина, висновки, перелік посилань.

5. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
I Літературний огляд	ВІНЧЕНКО В.С., к.т.н., доцент		
II Матеріали та методи дослідження	ВІНЧЕНКО В.С. ., к.т.н., доцент		
III Результати та їх обговорення	ВІНЧЕНКО В.С. ., к.т.н., доцент		
IV Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	НЕСТЕРОВ О.В. – к.т.н., доцент		
Нормоконтроль	Віктор ГРЕШТА, к.т.н., професор		

6. Дата видачі завдання « 4 » вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд	28.03.2024	
2	Матеріали та методи дослідження	04.09.2024	
3	Результати та їх обговорення	10.11.2024	
4	Охорона праці	20.05.2024	
5	Оформлення пояснювальної записки	24.11.2024	
6	Нормоконтроль	11.12.2024	
7	Рецензування	15.12.2024	
8	Підготовка доповіді на захист	20.12.2024	
9	Захист дипломного проєкту	24.12.2024	

Студент(ка)

_____ Данило ЦИГАНЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Валерій ВІНЧЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 75 с., 7 рис., 18 табл., 20 джерел

НАГРІВ СВЧ, ШЕСТЕРНЯ, ДИФУЗІЯ, ЦЕМЕНТАЦІЯ, ЗМІЦНЕНИЙ ШАР, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ВУГЛЕЦЬ, ІНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВ, ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР

Мета роботи: розробка новітньої технології термічної обробки із застосуванням нагріву струмом високої частоти для забезпечення підвищених експлуатаційних характеристик шестерень.

У рамках роботи було детально розглянуто сучасні підходи до виготовлення шестерень та основні матеріали, які застосовуються для їх виробництва. Виявлено основні недоліки традиційних методів, зокрема хіміко-термічної обробки, такі як значна тривалість процесу, підвищена енерговитратність та необхідність використання спеціалізованого обладнання для захисту необроблюваних поверхонь.

Досліджено потенціал використання індукційного нагріву струмами високої частоти для виконання поверхневого гартування. Запропоновано нову комбіновану технологію зміцнення шестерень, яка поєднує цементацію та подальше поверхневе гартування СВЧ. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити час термічної обробки, одночасно забезпечуючи високу твердість поверхні та оптимальний розподіл механічних властивостей у перерізі виробу.

Особливу увагу приділено залежності між частотою струму та швидкістю нагрівання матеріалу. Встановлено, що глибинний індукційний нагрів забезпечує плавний перехід механічних властивостей від поверхні до серцевини, що підвищує довговічність і стійкість шестерень до навантажень.

Також розглянуто економічні аспекти нової технології, яка скорочує тривалість виробничого циклу, знижує енерговитрати та кількість браку, забезпечуючи її ефективність і доцільність для впровадження у виробництво.

ЗМІСТ

	С.
1 Літературний огляд	8
1.1 Аналіз умов експлуатації шестерень	9
1.1 Інноваційні підходи до зміцнення та продовження строку служби шестерень	12
1.3 Цементация та нітроцементация з використанням технології нагріву свч	13
1.5 Гартування із нагріванням свч	15
1.6 Маршрутна технологія виготовлення шестерень із використанням хто	16
1.7 Технологія поверхневого гартування струмом високої частоти	19
1.8 Характеристика матеріалів виробів.....	24
2 Матеріали та методика досліджень	28
2.1 Хімічний склад та властивості матеріалу дослідження.....	28
2.2 Випробування циклічної міцності на згин.....	28
2.2 Контактна витривалість	29
2.3 Дослідження зносостійкості.....	31
2.4 Дослідження мікроструктури.....	31
3 Досліджено комбінований метод хіміко-термічної обробки із застосуванням свч-нагріву та подальшого гартування.....	33
3.1 Теоретичні основи перспективного застосування нагріву струмами високої частоти для обробки цементациєю.....	33
3.2. Розробка маршрутної технології для впровадження нового методу зміцнення поверхонь шестерень	36
3.3 Розробка режимів термічної обробки.....	38

	6
3.4 Розробка температурних режимів.....	39
3.5 Розрахунок часу термічної обробки	41
3.6 Контроль якості, усунення дефектів і запобігання браку.....	44
3.7 Отримані результати	48
4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	50
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	50
4.2 Заходи забезпечення безпеки	51
4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці.....	53
4.4 Заходи з пожежної безпеки	55
4.5 Заходи забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій	57
5 Економічна частина.....	62
5.1 Напрямки еволюції глобального технологічного ринку	62
5.2 Техніко-економічні розрахунки	65
Висновки	62
Перелік використаних джерел.....	73
Додаток А	74
Додаток Б.....	75

ВСТУП

Сучасна промисловість перебуває у стані динамічних змін, які диктують необхідність пошуку нових та вдосконалення існуючих технологій обробки матеріалів для виготовлення деталей машин і механізмів. Які відіграють ключову роль у роботі багатьох механічних систем, потребують не лише продуманих конструктивних рішень, а й високої якості матеріалів та їхньої обробки, що значною мірою визначає їхню надійність і довговічність.

Одним із перспективних напрямків у цій сфері є впровадження методів поверхневого зміцнення. Технології хіміко-термічної обробки та поверхневого гартування дозволяють отримати високу стійкість до зношування на поверхні деталей при збереженні пластичної серцевини. Це особливо важливо для деталей, які працюють у складних умовах навантажень і тертя.

Традиційний підхід до зміцнення поверхонь, зокрема хіміко-термічна обробка, хоча й забезпечує високу ефективність, залишається довготривалим і енергоємним процесом. У цьому контексті використання поверхневого гартування струмами високої частоти постає як сучасна альтернатива. Цей метод поєднує високу продуктивність із можливістю автоматизації, що робить його перспективним для масового впровадження у виробничі процеси.

Вивчення технологій поверхневого гартування СВЧ дозволяє не лише підвищити ефективність виготовлення деталей, але й суттєво оптимізувати виробничі цикли. Саме тому дослідження цього методу є актуальним завданням, спрямованим на підвищення технологічного рівня сучасної промисловості.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Шестерні є ключовими елементами механічних систем, які забезпечують передачу обертального руху між валами з необхідними параметрами швидкості та обертового моменту. Вони відіграють критичну роль у забезпеченні ефективності та надійності роботи механізмів, передаючи енергію від джерела потужності до виконавчих елементів.

Основні конструктивні елементи шестерень:

Зубці – забезпечують передачу обертального моменту. Залежно від конструкції шестерні зубці можуть бути прямозубими, косозубими, конічними або іншого профілю;

Диск – центральна частина шестерні, яка з'єднує зубці з валом і забезпечує жорсткість конструкції;

Отвір під вал – необхідний для фіксації шестерні на валу, що дозволяє передавати момент без проковзування;

Матеріал виготовлення – впливає на довговічність і зносостійкість. Зазвичай використовуються леговані сталі або сплави, які забезпечують високу міцність і твердість.

Шестерні працюють у складних умовах, піддаючись значним навантаженням і тертю, що робить їх одним із найуразливіших елементів механізму. Особливо це стосується шестерень газотурбінних двигунів (ГТД), які працюють за високих температур і навантажень, тому до них висуваються особливі вимоги щодо міцності, зносостійкості та точності.

Для підвищення характеристик шестерень застосовуються сучасні технології термічної обробки, як-от цементація, азотування або СВЧ-гартування, що забезпечують високу твердість і зносостійкість поверхонь. Удосконалення таких технологій значно підвищує ефективність, надійність і довговічність роботи механізмів навіть у складних умовах експлуатації.

1.1 Аналіз умов експлуатації шестерень

Зубчасті передачі є одними з найпоширеніших механізмів у машинобудуванні. Найчастіше використовуються циліндричні та конічні зубчасті передачі з зчепленням, які забезпечують ефективну передачу обертального моменту.

Шестерні працюють в умовах значних згинаючих навантажень, зношення та підвищених температур, які можуть досягати 400 °С. Матеріали для виготовлення шестерень обираються з урахуванням конструкторських параметрів і умов експлуатації. Вибір відповідної марки сталі залежить від ряду факторів, таких як конструктивні особливості зубчастого колеса та навантаження, що на нього діють.

До шестерень висуваються наступні вимоги:

- Ремонтопридатність
- Технологічність виготовлення
- Мінімальна собівартість виробництва
- Підвищений термін експлуатації

Шестерні, які працюють у складних умовах, зокрема в механізмах газотурбінних двигунів (ГТД), характеризуються підвищеними вимогами щодо надійності, безпечності та зменшення питомої маси. Вони повинні забезпечувати стабільну передачу обертального моменту навіть за екстремальних умов експлуатації.

Під час роботи шестерень можлива деформація зубців, яка може перевищувати похибки, закладені під час їх виготовлення. Це призводить до гарантованого контакту всіх сполучених зубців, що значно впливає на їх зносостійкість і термін служби. Отже, матеріали, технології виготовлення та обробки зубчастих передач повинні відповідати найвищим стандартам, щоб забезпечити ефективність і довговічність роботи у складних умовах.

Під час експлуатації шестерень виникає окружна сила, значення якої залежить від конструкції зуба колеса, матеріалу та режиму термічної обробки. Наприклад, окружна сила шестерень, поверхня яких зміцнена загартуванням із нагріванням СВЧ, може бути на 30–35% вищою порівняно з виробами без поверхневого зміцнення.

Основним параметром, що визначає міцність зубців шестерень, є їх здатність протистояти згинаючим навантаженням. Напруження згину, які виникають у процесі роботи зубчастої передачі, можуть досягати 294 МПа [3].

Під час короточасних перевантажень, таких як запуск машини, перемикання швидкостей, різкі повороти, гальмування двигуном або подолання перешкод, напруження згину можуть значно збільшуватися. У таких умовах вони можуть перевищувати робочі значення у 2–3 рази. Такі високі рівні перевантажень можуть спричинити утворення тріщин або сколів на зубцях, а в окремих випадках — навіть поломку зубців у кореневій зоні.

Ці фактори підкреслюють важливість вибору якісних матеріалів та використання сучасних методів термічної обробки для підвищення міцності та надійності шестерень.

У зубчастих колесах, які працюють у змінному зачепленні або за умов неповного контакту зубців через неточності в регулюванні приводу, напруження згину значно збільшуються. Це призводить до торцевого та крайового викришування зубців, а також до інтенсивного зношування на торцях, що може викликати передчасне критичне пошкодження шестерні. Крім того, на торцеві частини шестерень можуть діяти ударні навантаження, що погіршують ситуацію.

Сила удару стає особливо значною за відсутності синхронізаторів, які вирівнюють швидкості на початковому етапі зачеплення. Потужні удари по торцях шестерень можуть викликати викришування зубців і пошкодження, яке послаблює механізм. Геометрія працюючих пар шестерень визначає інтенсивність ударних і згинаючих навантажень. Заокруглення на торцях

зубців значно зменшують напруження, що виникають через удари, і сприяють рівномірному розподілу навантаження.

З іншого боку, шестерні, які піддаються високим навантаженням, зазнають значного тиску в зоні контакту. У відповідальних механізмах питомі тиски можуть досягати 2940 МПа у зоні контакту. Збільшення контактних напружень на робочій поверхні зубців може спричинити виникнення поверхневе руйнування — викришування поверхневого шару матеріалу через контактну втому. Поверхневе руйнування зазвичай розпочинається в зоні найбільших контактних напружень, які перевищують межу міцності матеріалу. Це призводить до відшаровування тонких поверхневих шарів, а згодом — до утворення глибоких вогнищ Поверхневе руйнування, які можуть сягати до 2 мм у глибину.

З огляду на це, для забезпечення довговічності шестерень важливо не лише використовувати високоякісні матеріали, але й впроваджувати сучасні технології термічної обробки та точно регулювати геометрію зачеплення.

Залежно від втомної міцності матеріалу, поверхневе руйнування може локалізуватися або прогресувати, порушуючи контакт між зубчастими парами. Це призводить до ударів під час роботи, збільшення згинаючих навантажень на зубці та передчасного руйнування зубчастих коліс, що суттєво знижує довговічність передачі.

Контактна витривалість важко навантажених зубчастих коліс значною мірою залежить від легування сталі, яка використовується для їх виготовлення. Важливим фактором також є стан поверхні зубців. Зміцнення поверхневого шару за допомогою цементації значно підвищує стійкість сталі до утворення поверхневого руйнування. Однак такі дефекти, як знеуглецювання або збіднення вуглецем поверхні, можуть значно зменшити цей ефект.

Міцність і надійність таких складно навантажених елементів, як шестерні, забезпечуються переважно якістю матеріалу. Тому вимоги до сталей, які застосовуються для їх виготовлення, є надзвичайно високими.

Помилки у виготовленні, а також деформація зубів під дією навантаження можуть спричиняти крайові удари зубців, викликаючи вібрації, крутильні коливання та підвищений рівень шуму. Підвищення точності виготовлення, збільшення коефіцієнта перекриття за рахунок конструктивних змін шестерень, а також зміцнення зубців через оптимізацію кута зачеплення можуть суттєво зменшити вібрації та биття під час роботи.

Таким чином, точність зубчастої передачі визначається з урахуванням фактичного ступеня завантаженості, твердості зубців і характеристик всієї системи в цілому. Згинальні напруження і контактна міцність шестерень є основними факторами, які визначають їх працездатність і довговічність.

1.1 Інноваційні підходи до зміцнення та продовження строку служби шестерень

На сьогодні основними методами підвищення строку експлуатації шестерень є впровадження технологій хіміко-термічної обробки поверхневого шару зубців. Ці методи спрямовані на зміцнення поверхні матеріалу, що дозволяє значно зменшити знос під час роботи в умовах високих навантажень та тертя.

Серед сучасних технологій варто виділити:

Цементацию – насичення поверхні вуглецем із подальшим гартуванням, що забезпечує високу твердість зовнішнього шару при збереженні в'язкої серцевини.

Нітроцементацию – комбінований процес насичення поверхні вуглецем і азотом, що підвищує стійкість до зношування та корозії.

Азотування – насичення поверхневого шару азотом при низькій температурі, що надає зубцям високу твердість і стійкість до втомного руйнування.

Гартування із нагріванням СВЧ – швидкий і ефективний метод локального зміцнення поверхні зубців, що дозволяє зменшити термічні деформації та забезпечити високу зносостійкість.

1.3 Цементация та нітроцементация з використанням технології нагріву СВЧ

На сьогодні цементация із подальшим термічним гартуванням поверхневого шару зубців залишається одним із ключових методів хіміко-термічної обробки металів. Використання нагріву струмами високої частоти (СВЧ) дозволяє значно підвищити ефективність цього процесу, скоротити його тривалість та зменшити витрати на енергоресурси [5].

Прискорення процесу цементации. Традиційно температура цементации становить близько 940°C , а процес формування шару товщиною 1 мм може тривати до 10 годин. Застосування індукційного нагріву СВЧ дає змогу підвищити температуру до $1000\text{--}1100^{\circ}\text{C}$, що прискорює процес дифузії вуглецю в поверхневі шари металу. Це скорочує час цементации майже вдвічі, до 4–5 годин, зберігаючи при цьому необхідну якість зміцненого шару [12].

Локалізований нагрів. Завдяки локальному впливу СВЧ тепло концентрується в поверхневих шарах виробу, залишаючи серцевину майже холодною. Це забезпечує мінімізацію термічних деформацій і знижує ризик утворення внутрішніх напружень у деталях складної форми, таких як зубчасті колеса [8].

Контроль параметрів процесу. Частота струму, що використовується в індукційному нагріві, дозволяє точно регулювати глибину нагріву і, відповідно, глибину дифузійного шару. Це забезпечує отримання стабільних характеристик зміцнення для серії виробів [6].

Нітроцементация із СВЧ. Введення азоту в процес зміцнення сприяє подальшому підвищенню зносостійкості поверхневого шару на 20–30%

порівняно зі звичайною цементацією. Для нітроцементації із застосуванням СВЧ підходять такі сталі: 20ХНЗА, 25ХГМ і 18ХГТ. Технологія із використанням СВЧ забезпечує високу стійкість до поверхневого руйнування і значно зменшує утворення окалини завдяки швидкому локалізованому нагріву[16].

Ефективність нагріву СВЧ. Для досягнення необхідної глибини зміцненого шару частота струму налаштовується таким чином, щоб нагрів був максимально ефективним і рівномірним. Замість тривалого прогрівання у традиційних печах, СВЧ дозволяє нагрівати деталі з максимальною швидкістю, уникаючи перегріву чи зайвого зростання зерна аустеніту

Фінальний етап обробки. Після цементації з використанням СВЧ нагріву вироби охолоджуються до температури гартування (850°C), після чого здійснюється гартування в підігрітому маслі. Завершальним етапом є низький відпуск при температурі 180°C , що знижує рівень залишкових напружень і стабілізує структуру зміцненого шару.

1.4 Азотування

Азотування є одним із ефективних методів зміцнення поверхонь деталей, що працюють у режимах тертя, забезпечуючи поверхневу твердість 600–800 HV [4] при глибині зміцненого шару 0,2–0,8 мм. Однак азотування поверхні зубців шестерень застосовується рідше, ніж цементація, через особливості його поведінки при тривалих і різкоударних навантаженнях. У таких випадках азотований шар може відшаровуватися у вигляді тонкої плівки, товщина якої відповідає глибині зміцнення. Водночас, при рівномірних навантаженнях і ступені перекриття понад чотири, азотовані шестерні працюють тривало та надійно.

Іонне азотування використовується для зміцнення порівняно дрібних деталей.

Цей метод має переваги над традиційним азотуванням:

- підвищується зносостійкість поверхонь, що зазнають тертя;
- скорочується час обробки завдяки зменшенню тривалості нагрівання та охолодження деталей, що робить процес економічним.

Для азотування застосовують сталі марок: 38Х2Ю, 38Х2МЮА, 40Х, 40ХФА, які забезпечують високу твердість і стійкість до зносу.

Для важко навантажених деталей, що працюють за умов циклічних згинальних і контактних напружень, використовують сталі марок: 38ХН3МА, 30Х3М, 38ХГМ. Втім, азотування має тривалий технологічний цикл. Наприклад, для отримання шару глибиною 0,8 мм потрібно близько 100 годин [5].

Азотування, попри свої особливості, залишається ефективним методом підвищення експлуатаційних характеристик шестерень, забезпечуючи високу зносостійкість і твердість у широкому спектрі умов роботи.

1.5 Гартування із нагріванням СВЧ

Гартування із нагріванням СВЧ є одним із найсучасніших методів зміцнення поверхні деталей, що працюють у високонавантажених умовах. Суть методу полягає у використанні електромагнітних хвиль високої частоти для локального нагріву поверхневого шару матеріалу до температури аустенізації. Після цього проводиться швидке охолодження, що забезпечує формування мартенситної структури, яка надає поверхні високу твердість. Цей метод дозволяє досягати поверхневої твердості в межах 55–65 HRC за глибини зміцненого шару від 0,5 до 3 мм залежно від параметрів процесу.

Особливістю гартування із нагріванням СВЧ є його локалізований характер. Нагрівається лише поверхневий шар деталі, тоді як серцевина залишається холодною, що дозволяє зберегти її в'язкість і міцність. Це мінімізує теплові деформації та забезпечує високу точність обробки. Метод вирізняється швидкістю процесу, оскільки нагрівання та загартування виконуються за лічені секунди, що суттєво скорочує тривалість обробки та підвищує її енергоефективність.

Для гартування із нагріванням СВЧ застосовуються різні леговані та вуглецеві сталі, такі як 40Х, 45. Ці матеріали забезпечують оптимальне поєднання твердості поверхні та в'язкості серцевини, що є ключовими характеристиками для деталей, які працюють у режимах високих термічних і механічних навантажень. Технологічний процес включає налаштування частоти електромагнітних хвиль для контролю глибини нагрівання (зазвичай у діапазоні 100–400 кГц), а також точний контроль температури для забезпечення необхідної структури матеріалу. Охолодження після нагрівання зазвичай проводиться за допомогою води, масла чи спеціальних охолоджуючих рідин.

Метод гартування із нагріванням СВЧ активно використовується для зміцнення шестерень, валів, зубчастих передач та інших деталей, які працюють у жорстких умовах тертя та високих динамічних навантажень. Завдяки своїм перевагам, таким як локальне нагрівання, мінімальні деформації, висока швидкість обробки та економічність, цей метод є одним із найбільш перспективних для підвищення зносостійкості, довговічності та ефективності деталей у сучасному машинобудуванні.

1.6 Маршрутна технологія виготовлення шестерень із використанням ХТО

Маршрутна технологія є детальним планом переміщення виробів через різні підрозділи та цехи виробничого підприємства, чітко визначаючи конкретні операції, що виконуються на кожному етапі [6]. Кожна операція має своє призначення, умови виконання та спрямована на досягнення необхідної форми, розмірів і властивостей виробу. Ця технологія забезпечує послідовність і логічність виробничих процесів, що є критично важливим для складних деталей, таких як шестерні.

Процес виготовлення шестерень із використанням хіміко-термічної обробки (ХТО) включає десятки, а іноді й сотні технологічних операцій. Їхня кількість залежить від геометрії виробу, матеріалу та вимог до кінцевого продукту. Основні етапи маршруту об'єднують механічну обробку, термічну обробку, поверхневе зміцнення та фінішну обробку. Усі ці операції мають бути точно сплановані, щоб забезпечити необхідні механічні властивості та якість виробу [6].

Ключову роль у маршруті відіграють спеціалісти різних підрозділів підприємства, які забезпечують виконання окремих етапів обробки. Наприклад, механічна обробка охоплює токарні та фрезерні операції, що формують основну геометрію деталі. Далі шестерня проходить етапи термічної обробки, такі як цементація, азотування або гартування із нагріванням СВЧ, які забезпечують зміцнення поверхні та довговічність виробу. Завершальні операції, такі як шліфування та полірування, проводяться для досягнення точності розмірів і необхідної якості поверхні [5].

Універсальність маршрутної технології дозволяє адаптувати її до специфіки кожного виробу. Цей підхід сприяє раціональній організації виробництва та підвищенню ефективності праці. Спрощена модель маршрутної технології представлена в таблиці 1.1, що демонструє, як координація між підрозділами підприємства забезпечує якість кінцевого продукту [6].

Таблиця 1.1 – Огляд маршрутної схеми технології виробництва шестерень із застосуванням хіміко-термічної обробки

№ п/п	Назва операції	Ділянка, на якій виконується операція	Призначення операції
1	Вхідний контроль	Заготівельний цех	Контроль хімічного складу, розмірів, макроструктури та відсутності дефектів матеріалу
2	Вирізання заготовок	Заготівельний цех/ дільниця ковальського цеху	Отримання заготовки
3	Гаряче штампування	Ковальський цех	Надання заготовці необхідної форми
4	Попередня термічна обробка	Термічне відділення механічного або термічний цех	Забезпечення матеріалу необхідних механічних властивостей для подальшої механічної обробки
5	Механічна обробка	Механічний цех	Надання заготовці форми та розмірів відповідно до вимог робочого креслення
6	Захист ділянок заготовки, які не потребують ХТО	Гальванічне відділення термічного цеху	Нанесення мідного покриття або захисних паст на поверхні, які не піддаються хіміко-термічній обробці
7	Цементация/ нітроцементация/ азотування	Хіміко-термічна дільниця термічного цеху	Насичення поверхневого шару виробів вуглецем та/або азотом
8	Відпал	Термічний цех	Нагрів виробів для усунення напружень та вирівнювання структури

Кінець таблиці 1.1

1	2	3	4
9	Гартування	Термічний цех	Термічна обробка з метою отримання мартенситної структури
10	Обробка холодом	Термічний цех	Охолодження виробів до температур нижчих за 0 °С для зменшення залишкового аустеніту
11	Відпуск	Термічний цех	Термічна обробка для зменшення внутрішніх напружень і поліпшення стабільності структури

1.7 Технологія поверхневого гартування струмом високої частоти

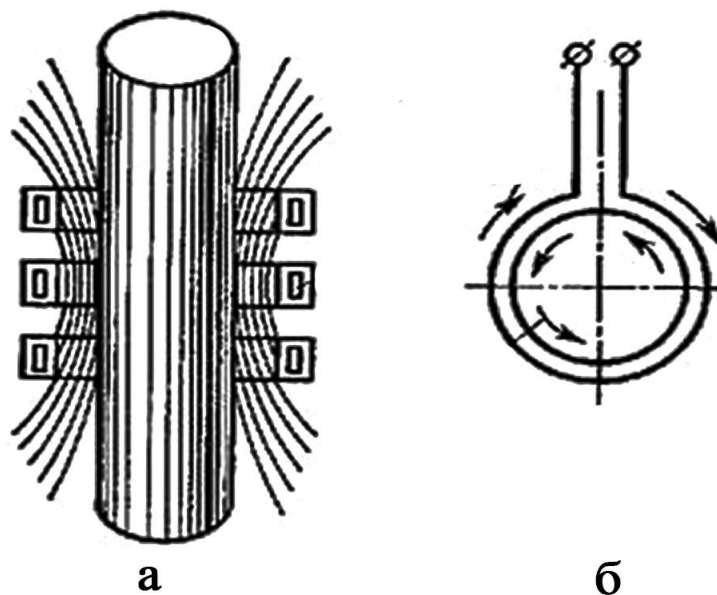
Поверхнєве зміцнення деталей шляхом термічної обробки може виконуватися за допомогою різних методів нагрівання: індукційного (струмами високої частоти — СВЧ), електронно-променевого, лазерного, електроплазмового, електричною дугою або полум'ям газового пальника. Усі ці методи базуються на використанні висококонцентрованих джерел тепла, що мають щільність потужності не менше 10^3 Вт/см² [6]. Така інтенсивність теплового впливу дозволяє досягати високих температур на поверхні деталі за короткий проміжок часу, що мінімізує нагрівання внутрішніх шарів виробу, які залишаються майже холодними.

Ця технологія застосовується для зміцнення деталей, які працюють в умовах зношення, тертя, циклічних навантажень, а також піддаються вигину, крученням або контактним напруженням. Завдяки такому методу на поверхні деталей формується зміцнений шар із високою твердістю та міцністю, при

цьому серцевина виробу зберігає в'язкість, необхідну для поглинання ударних навантажень.

Серед усіх перерахованих способів нагрівання індукційний нагрів струмами високої частоти є найбільш поширеним завдяки своїй ефективності, універсальності та економічності. На підприємствах автомобільного та сільськогосподарського машинобудування приблизно 60% деталей, що проходять термічну обробку, зміцнюються саме за допомогою гартування струмами високої частоти [7].

Цей метод забезпечує високу точність нагрівання, мінімальні термічні деформації та значне скорочення тривалості процесу. Гартування СВЧ дозволяє не лише підвищити зносостійкість та довговічність деталей, але й зменшити витрати на виробництво, що робить його ідеальним для широкого спектра промислових застосувань. На рисунку 1.1 зображено схему індукційного нагрівання, яка ілюструє основні принципи розподілу магнітного потоку в індукторі



а – розподіл магнітного потоку в індукторі; б – напрямок струмів в індукторі.

Рисунок 1.1. Схема індукційного нагрівання. [4]

Згідно із законом електромагнітної індукції, у поверхневих шарах деталі виникає електрорушійна сила, яка спричиняє появу змінного струму тієї ж частоти, що й струм, який живить індуктор. Завдяки цьому процесу в металі відбувається локальний нагрів поверхневих шарів. Відповідно до закону

Джоуля-Ленца кількість тепла, яка виділяється під час проходження струму через провідник, можна визначити за формулою:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1.1)$$

де Q – кількість тепла;

I – сила струму;

R – опір матеріалу;

t – час протікання струму.

При індукційному нагріванні близько 87% усієї теплової енергії виділяється в поверхневому шарі, товщина якого визначається глибиною проникнення струму δ . Глибина проникнення струму розраховується за формулою [7]:

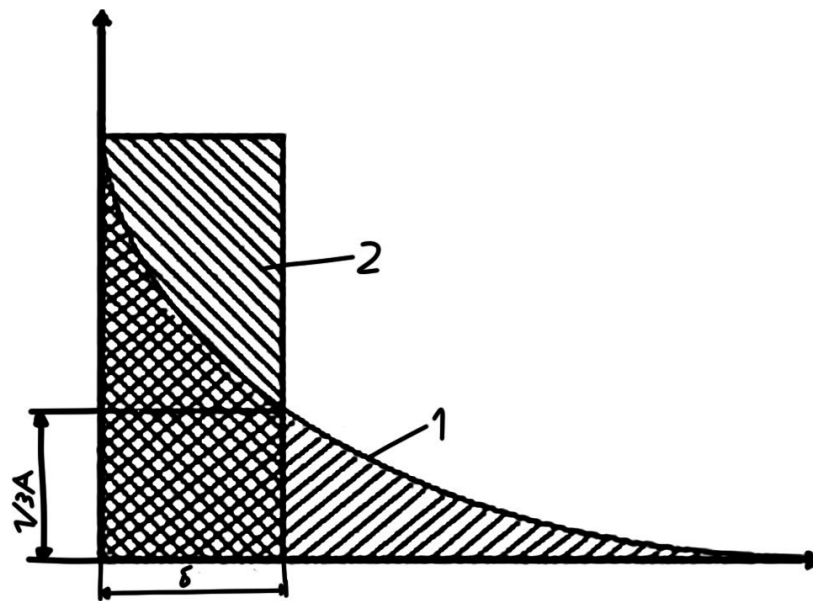
$$\delta \approx (5030 \cdot \sqrt{\rho}) / (\mu \cdot \sqrt{f}) \quad (1.2)$$

де: ρ — питомий електричний опір матеріалу деталі, Ом·см;

μ — відносна магнітна проникність матеріалу;

f — частота струму, Гц.

На рисунку 1.2 показано розподіл густини змінного струму в деталі. Максимальна густина струму знаходиться на поверхні і зменшується до серцевини, що обумовлено поверхневим ефектом, характерним для індукційного нагрівання.



1 - дійсний розподіл; 2 - умовний розподіл; δ - глибина проникнення струму в деталь

Рисунок 1.2 – Розподіл густини змінного струму по деталі, що нагрівається

Під час нагрівання характеристики матеріалу (ρ та μ) можуть змінюватися, але це параметри, які не регулюються в процесі. Для досягнення необхідної глибини проникнення струму основним параметром, який підлягає розрахунку, є частота струму. Для сталей застосовується спрощена формула:

$$\delta \approx \frac{5030}{\sqrt{f}} \quad (1.3)$$

Глибина загартованого шару ($\delta_{\text{гарт}}$) пов'язана з глибиною проникнення струму (δ) співвідношенням:

$$\delta_{\text{гарт}} \approx 0,5 \cdot \delta \quad (1.3)$$

Таким чином, під час індукційного нагрівання енергія джерела тепла виділяється безпосередньо у поверхневому шарі деталі, що значно прискорює процес нагрівання. Завдяки висококонцентрованому джерелу тепла час нагрівання становить від кількох секунд до десятків секунд.

Існують три основні методи гартування з використанням нагріву СВЧ:

Одночасний нагрів і охолодження всієї поверхні. Цей метод застосовують для деталей з невеликою зміцнюваною поверхнею, таких як пальці, валики, осьові інструменти.

Послідовний нагрів і охолодження окремих ділянок. Використовується під час гартування шийок колінчастих валів (послідовний нагрів і зміцнення однієї шийки за іншою), зубчастих коліс із модулем понад 6 (загартування "зуб за зубом"), кулачків розподільчих валів тощо.

Безперервно-послідовний нагрів і охолодження. Цей метод підходить для гартування довгих валів, осей та інших подібних деталей. У цьому випадку виріб переміщується відносно нерухомого індуктора і пристрою охолодження або навпаки. На відміну від одночасного методу, не потребує великої встановленої потужності генератора.

Після гартування з нагріванням струмами високої частоти (СВЧ) вироби часто піддаються низькотемпературному відпуску при температурі 160–200 °С. У деяких випадках застосовується само відпуск, коли після гартування охолодження не доводять до кінця, і залишкове тепло у деталі нагріває зміцнений шар до температури відпуску [8]. Цей підхід дозволяє зменшити внутрішні напруження та покращити експлуатаційні властивості деталі.

Застосування поверхневого гартування струмами високої частоти значно скорочує маршрутну технологію виробництва шестерень у порівнянні зі стандартними методами з використанням хіміко-термічної обробки (ХТО). Спрощена схема технологічного процесу дозволяє зменшити кількість етапів, прискорити виробництво та підвищити економічну ефективність. У таблиці

1.2 представлена спрощена модель маршрутної технології виробництва шестерень із використанням СВЧ-нагрівання [9].

Як видно з маршрутної технології (табл. 1.1), використання поверхневого гартування із нагрівом СВЧ значно спрощує виробничий процес. Відпадає потреба у ряді технологічних операцій, які обов'язково присутні при хіміко-термічній обробці. Зокрема, немає необхідності у нанесенні захисних покриттів на необроблювані ділянки деталей, оскільки нагрівання виконується лише у визначених зонах, які піддаються термічному впливу.

Також зникає потреба у додатковому гартуванні після формування зміцненого шару, адже метод СВЧ забезпечує достатню твердість та міцність без необхідності додаткової обробки. Окрім того, при використанні певних матеріалів не потрібен навіть окремий процес відпуску, оскільки, як зазначалося раніше, у багатьох випадках може бути застосований самовідпуск. Це суттєво скорочує тривалість виробничого циклу, знижує витрати та підвищує загальну ефективність технології.

1.8 Характеристика матеріалів виробів

При виборі матеріалів та термічної обробки необхідно враховувати такі параметри, як надійність, задана довговічність, мінімальна маса та компактні габаритні розміри виробів, а також вимоги до технологічності та економічності їх виготовлення. Основними характеристиками міцності матеріалів при розрахунках є тимчасовий опір, межа плинності, межа витривалості, відносне подовження, ударна в'язкість і твердість.

Для виготовлення шестерень можуть використовуватися такі матеріали, як сталь, чавун, бронза та латунь. Особливе значення надається сталям, оскільки вони дозволяють знижувати масу виробу і зменшувати його

габарити, забезпечуючи високу міцність і зносостійкість. Асортимент марок сталей є досить широким, і їх вибір залежить від умов експлуатації виробів. Для зубчастих коліс, які піддаються термообробці до нарізування зубів, твердість матеріалу має перебувати в межах від 250 до 330 одиниць за Брінелем. Верхня межа твердості визначається можливістю проведення механічної обробки при нарізуванні зубів.

Механічні властивості сталевих поковок класифікуються за категоріями міцності відповідно до ДСТУ 179-85. Категорії міцності визначають за межею плинності, тимчасовим опором, відносним подовженням, відносним звуженням і ударною в'язкістю. Вимоги до характеристик поковок також залежать від їхнього діаметра. Окрім того, твердість за Брінелем є важливим показником для оцінки якості матеріалу.

За умов звичайної термічної обробки для деталей діаметром до 200 мм використовуються сталі марок: 35Х, 40Х, 45Х, 30ХГТ, 35ХГМ, 38ХМ. Для деталей із більшим діаметром, понад 200 мм, застосовують сталі марок: 40ХН, 30ХГСА, 38ХГН, 40ХН2МА, 38ХН3МА. Ці сталі забезпечують потрібну глибину гартування і твердість у межах від 512 до 600 одиниці за Брінелем

Для виготовлення литих зубчастих коліс використовуються сталі третьої групи (для особливо відповідального призначення) за ДСТУ 977-75. Найпоширенішими є марки сталей: 35Л, 40Л, 35ХМЛ, 35ХГСЛ [10].

Сталі, що піддаються поверхневому зміцненню струмами високої частоти (СВЧ), є основою для підвищення зносостійкості деталей. Широко застосовується зміцнення ТВЧ зубців і западин зубчастих коліс із конструкційних сталей марок: 35, 40, 50, 40Х, 45Х, 38ХГН, 38ХМ, 38ХНМА.

В таблиці 1.2 наведено хімічний склад, механічні властивості та максимальну товщину зміцнювального шару з використанням нагріву СВЧ для сталей, що можуть бути застосовані для виготовлення шестерень [11].

Така інформація є ключовою для вибору матеріалів, які забезпечують оптимальні експлуатаційні властивості шестерень за умов різних навантажень і режимів роботи.

Таблиця 1.2 – Сталі для шестерень, що піддаються поверхневому гартуванню з нагріванням струмом високої частоти.

Марка сталі	Хімічний склад, мас.%					Твердість загартованого шару після відпуску, HRC	Можлива глибина зміцненого шару, мм
	C	Si	Mn	Cr	Ni		
35	0,32 – 0,4	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	-	-	50 – 55	3
40	0,37 – 0,45	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	-	-	53 – 58	4
50	0,47 – 0,55	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	-	-	57 – 62	4
40X	0,35 – 0,45	-	0,5 – 0,8	0,8 – 1,0	-	54 – 59	6
45X	0,4 – 0,5	-	0,5 – 0,8	0,8 – 1,0	-	56 – 61	6
38ХГН	0,35 – 0,43	0,17 – 0,37	0,8 – 1,1	0,5 – 0,8	0,7 – 1,0	55 – 60	8
38ХМ	0,35 – 0,42	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	0,9 – 1,3	-	56 – 61	8
38ХНМА	0,33 – 0,4	0,17 – 0,37	0,3 – 0,5	0,8 – 1,2	0,7 – 1,0	57 – 62	8

1.9 Формулювання завдання та мета дипломної роботи

Поверхнєве гартування із використанням нагрівання струмом високої частоти (СВЧ) є інноваційним технологічним процесом, який має низку

важливих переваг у порівнянні з традиційними методами, такими як хіміко-термічна обробка (цементация, нітроцементация, азотування), що застосовуються для виготовлення шестерень.

Однією з головних переваг цього методу є його висока швидкість, яка забезпечується завдяки ефективному локальному нагріванню оброблюваної поверхні. Це дозволяє суттєво скоротити час виробничого процесу, підвищуючи продуктивність. Водночас процес гартування СВЧ не потребує попереднього захисту необроблюваних ділянок поверхні, що спрощує та здешевлює технологію.

Ще однією вагомою перевагою є відсутність необхідності використання хімічних реагентів для насичення поверхневого шару атомами зміцнювальних елементів. Це робить процес більш екологічно безпечним, зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище та покращуючи умови роботи на виробництві.

Точний контроль температури під час нагрівання СВЧ дозволяє досягати необхідних характеристик матеріалу з високою точністю. Локальний характер нагрівання сприяє мінімізації термічних деформацій виробів, що часто є проблемою у традиційних хіміко-термічних методах.

Окрім того, процес СВЧ-гартування є енергоефективним, оскільки вся теплова енергія спрямовується безпосередньо у матеріал деталі, знижуючи теплові втрати. Це сприяє оптимізації енергоспоживання та скороченню витрат.

Ще одним значущим аспектом є можливість автоматизації процесу гартування СВЧ, що робить його сучасним та високотехнологічним рішенням.

Використання передових систем контролю та автоматизації забезпечує стабільність процесу та отримання високоякісних виробів.

Таким чином, дослідження та впровадження поверхневого гартування із нагрівом струмом високої частоти є актуальним напрямком для підвищення ефективності виробництва, зменшення екологічного навантаження та забезпечення якості деталей у різних галузях промисловості

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Хімічний склад та властивості матеріалу дослідження

У ході дослідження використовувалися зразки зі сплаву 18ХГТ. Ця сталь використовується для покращених та цементованих деталей, які потребують високої міцності, в'язкої серцевини та високої поверхневої твердості. Хімічний склад сталі 18ХГТ наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплаву 18ХГТ [18]

Хімічний елемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu
Вміст, мас. %	0,15–0,21	0,17–0,37	0,8–1,1	≤0,3	≤0,035	≤0,035	0,8–1,1	0,02–0,05	≤0,3

Таблиця 2.2 – Твердість сплаву 18ХГТ після стандартної технології термічної обробки [4]

Режим термічної обробки	Глибина зміцненого шару	Твердість, HRC
		Поверхні
Цементация (930–940 °С, 9–10 год); гартування (840–850 °С, масло ≤100 °С); відпуск (170–180 °С)."	0,9–1,3 мм	55–61

2.2 Випробування циклічної міцності на згин

Під час роботи шестерні постійно піддаються циклічним навантаженням, які можуть призводити до утворення тріщин у матеріалі. З часом ці тріщини прогресивно збільшуються, що підвищує ризик серйозних

пошкоджень або навіть повного руйнування деталі. Особливу небезпеку становить те, що тріщини можуть виникати навіть за напружень, які є значно нижчими за межу міцності чи плинності матеріалу. Це підступність втомних пошкоджень, адже їх складно виявити на ранніх етапах, проте вони мають критичний вплив на експлуатаційну надійність деталі. Тому аналіз цих процесів і пошук ефективних рішень є вкрай важливими для забезпечення довговічності деталей у реальних умовах експлуатації, особливо для механізмів, які працюють у динамічних і змінних режимах навантаження.

Для кількісного визначення границі витривалості матеріалу потрібно провести випробування на серії зразків, зазвичай не менше 15 одиниць. Кожен зразок піддається навантаженням при певному значенні максимального напруження циклу або його амплітуди, що дозволяє детально оцінити поведінку матеріалу в умовах багаторазових впливів. Основною метою таких випробувань є визначення границі витривалості — ключового параметра, який характеризує стійкість матеріалу до втомних пошкоджень. Ці випробування належать до категорії випробування на довговічність, які дають змогу оцінити здатність матеріалу витримувати повторювані навантаження без втрати цілісності навіть у жорстких експлуатаційних умовах.

2.3 Контактна витривалість

Контактна втома являє собою процес накопичення пошкоджень та поступового руйнування поверхневих шарів металу під впливом змінних контактних напружень. Цей процес супроводжується утворенням мікротріщин і зон викришування, які поступово збільшуються, що може призвести до значного погіршення експлуатаційних характеристик деталі. Для дослідження контактної втоми шестерень обрана схема навантаження "

обкатка зі зсувом ", яка реалізується за допомогою спеціалізованої машини типу СМЦ-2

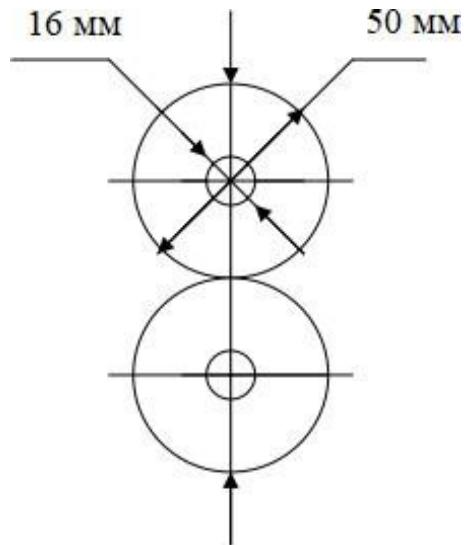


Рисунок 2.1 – Схема взаємного розташування зразка та контртіла для випробувань на контактну витривалість.

Зразки для випробувань виготовляються з матеріалу однієї марки сталі та однієї плавки. Технологічний процес їх виготовлення повинен забезпечувати відповідність макро та мікроструктури, а також твердості, яка має залишатися максимально стабільною в межах партії. Допустиме відхилення твердості зразків однієї партії становить $HRC \pm 0,5$. Поверхня зразків повинна бути очищена від корозії, окалини, ливарних корок, тріщин, кольорових відтінків та інших дефектів, щоб уникнути впливу сторонніх факторів на результати досліджень [4].

Під час визначення границі контактної втоми базова кількість циклів навантаження становить 10^8 . Основним результатом випробувань є виявлення комплексу ознак пошкодження матеріалу, таких як тріщини, відшарування та ділянки поверхневого руйнування. Як критерій контактної витривалості використовуються два основні показники: поява пошкоджень на поверхні диска у вигляді викришування із площею ділянок від 2 до 6 мм^2 або досягнення зношення поверхні до 0,05 мм на зовнішньому шарі.

2.4 Дослідження зносостійкості

Методика дослідження на зношення передбачає моделювання умов експлуатації майбутніх виробів. Основною складністю цих випробувань є неможливість прямого порівняння результатів, отриманих різними методами. Це обумовлено тим, що кожна методика досліджень реалізує різні механізми зношення або використовує різні зовнішні механічні фактори для моделювання умов роботи виробу.

Для дослідження матеріалу, з якого виготовляються шестерні, застосовується схема випробувань, аналогічна до схеми тестування на контактну витривалість (рис. 2.1). Ця схема передбачає кочення з проковзуванням у середовищі мастила.

Зразки для даного дослідження виготовляються з такими розмірами: діаметр $d=16$ мм, зовнішній діаметр $D=50$ мм. Контртіло має аналогічні розміри.

Під час випробувань до зразка та контртіла прикладається навантаження величиною близько 2000 Н, при цьому допустиме відхилення від заданого навантаження становить до 5%. Такий підхід дозволяє отримати реалістичні дані про зносостійкість матеріалів у умовах, максимально наближених до реальних.

2.5 Дослідження мікроструктури

Металографічні дослідження виконувалися за допомогою оптичного мікроскопа KERN OKO-1. Для визначення хімічного складу поверхневих шарів, сформованих у результаті дифузійних процесів, застосовувався енергодисперсійний рентгенівський спектрометр ThermoNoran, який дозволяє

аналізувати характеристичне рентгенівське випромінювання атомів. Фіксація мікроструктур здійснювалася у цифровому форматі за допомогою фотокамери AxioCam MRc5

Для аналізу мікроструктури та вимірювання товщини дифузійних шарів використовувався металографічний мікроскоп. Зразки попередньо заливали акриловою смолою (DuracrylPlus), після чого вони піддавалися шліфуванню за допомогою абразивного паперу з поступовим зменшенням розміру зерна. Полірування здійснювалося із застосуванням алмазної пасти для отримання високоякісної поверхні.

Завершальний етап підготовки шліфів включав хімічне травлення, яке проводилося у 4-відсотковому розчині азотної кислоти, розведеному в аліловому спирті. Цей процес дозволив отримати чітке відображення мікроструктури поверхневих шарів, що забезпечило якісний аналіз отриманих результатів.

З ДОСЛІДЖЕНО КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СВЧ-НАГРІВУ ТА ПОДАЛЬШОГО ГАРТУВАННЯ

Використання технологій нагріву струмами високої частоти значно спрощує процес виготовлення шестерень. Проте основним обмеженням цієї технології, зокрема для застосування у зміцненні поверхні методами поверхневого гартування, є порівняно нижчий рівень механічних властивостей у порівнянні з сучасними методами хіміко-термічної обробки, такими як цементация чи нітроцементация.

Однак такі переваги, як суттєве скорочення тривалості термічної обробки, зменшення відсотка відбракованих деталей завдяки мінімізації деформацій і короблення під час обробки, роблять технологію нагріву СВЧ перспективною для подальшого розвитку.

З огляду на це було запропоновано комбінований метод хіміко-термічної обробки, що поєднує традиційні технології обробки поверхні з використанням технології поверхневого гартування із нагрівом струмами високої частоти. Такий підхід дозволяє оптимально поєднати переваги обох технологій для забезпечення високих експлуатаційних характеристик шестерень.

3.1 Теоретичні основи перспективного застосування нагріву струмами високої частоти для обробки цементациєю

Температурний режим цементациї складається з кількох етапів, які забезпечують ефективність цього процесу. На першому етапі здійснюється нагрівання деталей до заданої робочої температури. У виробничих умовах, наприклад, у шахтних печах, температура на початку знижується на 100–

200 °C через завантаження холодних деталей, оскільки піч певний час залишається відкритою. Після цього температура підвищується до необхідного рівня.

Другий етап характеризується витримкою при робочій температурі, яка залишається стабільною протягом усього процесу цементації. Якщо передбачено безпосереднє гартування деталей, після витримки настає третій етап – охолодження до температури гартування.

Основним параметром температурного режиму цементації є робоча температура, яка в сучасних технологіях встановлюється в межах 900–1000 °C.

З підвищенням температури швидкість процесу значно зростає, що робить цей підхід ефективнішим. Наприклад, для досягнення глибини цементованого шару 0,5–3 мм підвищення температури від 900 °C до 1000 °C може більш ніж удвічі прискорити процес. Проте високі температури створюють низку труднощів. Вони можуть призводити до погіршення механічних властивостей металу через зростання зерна, зниження стійкості обладнання та пристосувань, а також підвищення деформацій деталей під дією теплових впливів.

Ці особливості підкреслюють важливість вибору оптимальних температурних параметрів для забезпечення якості та ефективності процесу цементації. У разі застосування технології цементації з нагріванням СВЧ температура процесу може досягати 1100 °C, що дозволяє класифікувати її як високотемпературну термічну обробку. Підвищення температури сприяє збільшенню межі розчинності вуглецю в аустеніті, що позитивно впливає на процес формування цементованого шару. Швидкість дифузії вуглецю при такій температурі зростає значно швидше, ніж швидкість його поверхневої адсорбції, що виключає перенасичення поверхневого шару.

Результатом високотемпературної термічної обробки є утворення сприятливого розподілу вуглецю: помірна концентрація на поверхні та плавний перехід до серцевини, що покращує механічні властивості виробів.

Раніше вважалося, що підвищення температури термічної обробки викликає небажане зростання зерна сталі, що знижує її міцність. Однак сучасні технології нагрівання СВЧ і розвиток виробництва легованих сталей, стійких до росту зерна, значно розширили межі застосування високотемпературних методів.

Для досягнення високої стійкості до росту зерна використовуються сталі з легувальними елементами, які формують важкорозчинні карбіди, наприклад, титан, ванадій, цирконій, вольфрам і молібден. Особливо важливу роль відіграє алюміній, який ефективно контролює розмір зерна аустеніту.

Однак слід враховувати, що затримуючий ефект легувальних елементів має обмеження за температурою, вище якої механічні властивості матеріалу можуть погіршитися (табл. 3.1). Врахування цих факторів дозволяє досягти оптимального балансу між швидкістю процесу та якістю кінцевого виробу під час термічної обробки з використанням нагрівання СВЧ.

Таблиця 3.1 – Температури, за яких відбувається зростання зерна [6]

Марка сталі	Температура	
	Початку росту зерна	Інтенсивного росту зерна
20	900	950 – 1000
12X2H4A	950	1000 – 1050
18XГТ	1000	1050 – 1100

У вуглецевих сталях зростання зерна аустеніту починається одразу після його утворення, тому укрупнення зерна спостерігається як після високотемпературної, так і після звичайної цементації. Через це високотемпературну цементацію для вуглецевих сталей слід застосовувати з обережністю, оскільки наслідки перегріву можуть проявлятися в складних умовах експлуатації, особливо за низьких температур. Крім того, це може позначитися під час жорсткіших методів випробувань, наприклад, при тестах на розрив зразків із надрізами або визначенні ударної в'язкості при низьких температурах.

Найменш схильними до зростання зерна і найбільш придатними для комбінованої цементації із використанням нагрівання струмом високої частоти є леговані сталі, такі як 18ХГТ, 30ХГТ, 15ХГНТА, 12ХН3А та інші. Ці сталі мають стабільну структуру навіть за високих температур і забезпечують високі механічні властивості виробів. Термічну обробку цих сплавів із застосуванням запропонованої технології можна проводити при температурах 1000 °С і вище, що дозволяє досягти оптимальної якості зміцненого шару без значних ризиків перегріву та втрати міцності.

3.2. Розробка маршрутної технології для впровадження нового методу зміцнення поверхонь шестерень

Під час високотемпературної цементації спадково дрібнозернистих сталей відбувається незначне збільшення розміру зерна. Однак завдяки подальшій правильній проведеній термічній обробці механічні властивості цих сталей залишаються на рівні, порівнянному з цементацією за звичайних температур. Наприклад, у випадку високотемпературної цементації сталі 30ХГТ перед загартуванням проводиться рівномірне підстуджування до температури 820–850 °С для забезпечення оптимальних властивостей матеріалу. Для сталі 12ХН3А після високотемпературної цементації обов'язковим є загартування з повторним нагрівом, оскільки без цього неможливо досягти необхідної дрібнозернистості [13].

Нова технологія цементації з використанням нагрівання СВЧ може призводити до підвищеного короблення деталей з таких причин:

Підвищення температури зменшує опір металу до деформації, і деталі можуть викривлятися під власною вагою або вагою інших деталей. Це залежить від системи укладання або підвішування деталей у печі.

Нагрівання та охолодження з високих температур створюють значні внутрішні напруження в деталях, що стає причиною деформацій.

Повторне нагрівання також підсилює викривлення деталей. У зв'язку з цим рекомендується проводити гартування безпосередньо після цементаційного нагріву з попереднім підстуджуванням. Крім того, зменшення інтенсивності охолодження у гартівній рідині, наприклад, використання гарячого масла, сприяє мінімізації деформацій.

У випадку цементації великих деталей нерівномірність розподілу температур у печі під час нагрівання є важливим фактором. У шахтних печах різниця температур між центром і краями садки може досягати 50–100 °С [14], а у випадку високотемпературної цементації ця нерівномірність ще більша. Тому нагрівання деталей для цементації із використанням струмів високої частоти необхідно проводити у заневоленому стані.

Враховуючи зазначені особливості, запропонована маршрутна технологія виготовлення шестерень зі сталі 18ХГТ з використанням комбінованого методу цементації та технології поверхневого гартування із нагрівом СВЧ (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Маршрутна схема технології виробництва шестерень зі сталі 18ХГТ із застосуванням комбінованого методу цементації та технології поверхневого гартування з нагрівом СВЧ

№ п/п	Назва операції	Ділянка, на якій виконується операція	Призначення операції
1	Вхідний контроль	Заготівельний цех	Контроль хімічного складу, розмірів, макроструктури, відсутності дефектів матеріалу
2	Вирізання заготовок	Заготівельна дільниця ковальською цеху	Отримання заготовки
3	Гаряче штампування	Ковальський цех	Надання необхідної форми

Кінець таблиці 3.2

1	2	3	4
4	Попередня термічна обробка	Термічне відділення механічного	Надання матеріалу необхідних механічних властивостей для подальшої механічної обробки
5	Механічна обробка	Механічний цех	Надання необхідної форми розмірів виробів заданих робочим кресленням
6	Захист ділянок заготовки, які не потребують цементації	Термічного цеху	Нанесення захисних паст на поверхні, що не піддаються цементації
7	Цементация з нагріванням в СВЧ індукторі	Хіміко-термічна дільниця термічного цеху	Насичення поверхні виробів вуглецем та азотом
8	Гартування з температури цементації	Термічний цех	Термічна обробка, метою якої є отримання структури мартенсит
9	Остаточна механічна обробка	Механічний цех	Надання виробу кінцевих розмірів та чистоти поверхні за робочими кресленнями
11	Низьки відпуск	Термічний цех	Термічна обробка виробів з метою зменшення напружень
12	Контроль	Лабораторія якості	Перевірка відповідності деталей технічним вимогам, аналіз мікроструктури, твердості та розмірів для підтвердження якості термічної обробки.

3.3. Розробка режимів термічної обробки

Технологія термічної обробки охоплює сукупність процесів, спрямованих на зміну мікроструктури та властивостей матеріалів шляхом контрольованого нагрівання та охолодження. Ці процеси широко

застосовуються для покращення твердості, міцності, зносостійкості та інших експлуатаційних характеристик матеріалів.

Розробка технології термічної обробки базується на системному інженерному підході, що дозволяє створити ефективний і оптимальний процес. Основні етапи розробки такої технології включають:

Аналіз та визначення ключових і допоміжних етапів процесу

Основні стадії термічної обробки ретельно оптимізуються для досягнення максимальної продуктивності, мінімізації витрат енергії та матеріалів, а також забезпечення високої якості кінцевого продукту.

Розробка оптимальних режимів проведення операцій

Вибір температур, часу витримки та швидкості охолодження є критичними для отримання необхідних властивостей матеріалу.

Підбір обладнання та засобів механізації

Для забезпечення точності та ефективності технологічних операцій використовуються сучасні індукційні установки, печі з контрольованим середовищем, охолоджувальні системи тощо.

Створення засобів для технологічних операцій

Спеціальні пристрої, інструменти та механізми розробляються для досягнення високої якості оброблюваних виробів.

Розробка систем контролю якості

Створюються процедури перевірки якості виробів на кожному етапі термічної обробки для забезпечення відповідності виробів заданим стандартам.

3.4 Розробка температурних режимів

За стандартною технологією цементація сталі 18ХГТ проводиться в температурному інтервалі існування γ -заліза (аустеніту), що зумовлено його

підвищеною розчинністю вуглецю порівняно з α -залізом (феритом). Традиційно температура цементації становить 940 °С, а для отримання шару товщиною 1 мм потрібен час близько 10 годин. Підвищення температури до 1000 °С може скоротити час технологічного процесу майже вдвічі. Проте використання стандартного обладнання при таких температурах супроводжується ризиком збільшення розміру зерна через високу інерційність нагрівання та охолодження [15].

Застосування технології індукційного нагріву СВЧ дозволяє точно контролювати температуру поверхні деталі, що нагрівається. У запропонованому варіанті цементацію виконували при температурі 1000 °С. Завдяки точному контролю глибини нагріву за допомогою частоти струму, нагрівання серцевини обмежується лише теплопровідністю матеріалу.

Після завершення цементації доцільно виконувати гартування безпосередньо з температури цементації після попереднього підстуджування до 850 °С. Охолоджувальним середовищем служить підігріте до 100 °С масло, що зменшує ймовірність деформацій. Остаточна термічна обробка передбачає низький відпуск при температурі близько 180 °С. Ця операція спрямована на зниження залишкових напружень і переведення мартенситу гартування в мартенсит відпуску. У результаті поверхня деталі набуває структури, що складається з мартенситу відпуску, карбідів і залишкового аустеніту.

На рисунку 3.1 наведено графік нової технології термічної обробки, яка передбачає цементацію в СВЧ-індукторі при температурі 1000 °С протягом 4 годин, підстуджування до 850 °С, гартування в маслі та подальший низький відпуск.

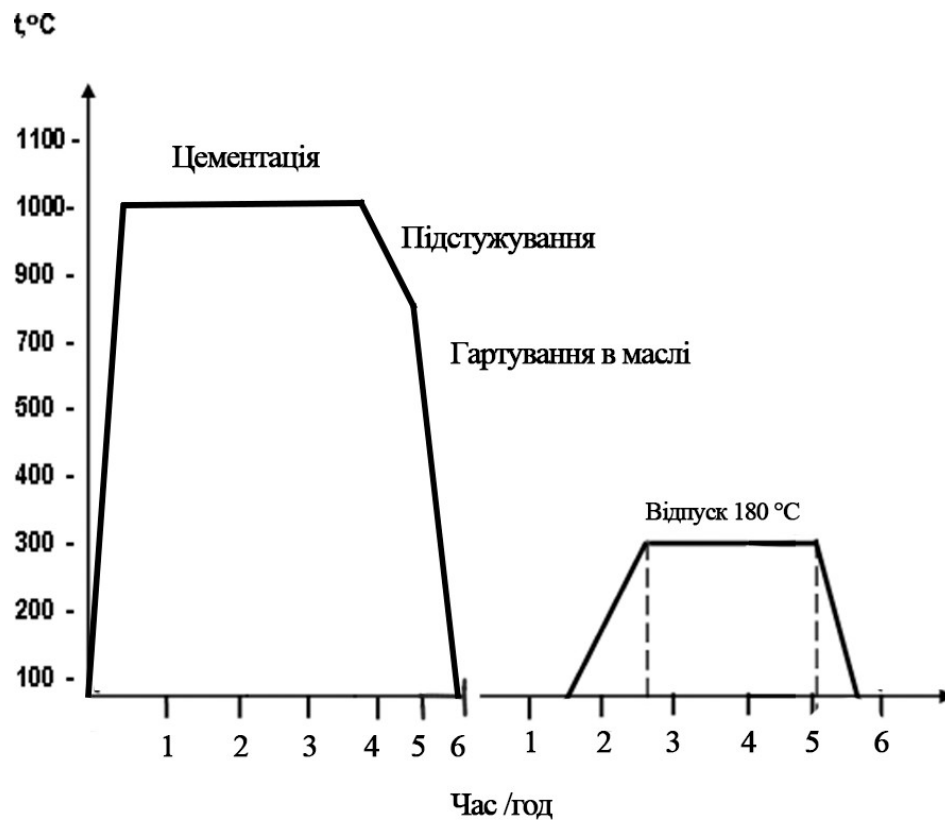


Рисунок 3.1 – Графік нової технології термічної обробки з використанням СВЧ нагріву шестерень зі сталі 18ХГТ

3.5 Розрахунок часу термічної обробки

Час термічної обробки визначається як сума тривалості всіх операцій технології.

Розрахунок часу нагрівання під цементацію в СВЧ індукторі за пропонованої технології розраховується згідно форми 1.1 наступним чином:

$$\tau_{\text{нагр}} = Q / (I^2 \cdot R), \text{ с} \quad (3.1)$$

$$\tau_{\text{нагр}} = 1453 / (7000^2 \cdot 15 \cdot 10^{-3}) = 20 \text{ с}$$

Час витримки згідно графіку на рис. 3.1 складає 4 години. Тривалість розвантаження та завантаження тзр складає 30 хв.

Час підстуження $\tau_{\text{підс}}$ з температури цементациї до температури гартування визначаємо:

$$\tau_{\text{підс}} = (t_{\text{п}} - t_{\text{к}}) / V_{\text{ох}}, \text{ с} \quad (3.1)$$

де $t_{\text{п}}$ – температура, від якої розпочинається охолодження виробів, $t_{\text{п}} = 1000^{\circ}\text{C}$;
 $t_{\text{к}}$ – кінцева температура охолодження, $t_{\text{к}} = 850^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{ох}}$ – швидкість охолодження з піччю $60^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

$$\tau_{\text{підс}} = (1000 - 850) / 60 = 2 \text{ год } 30 \text{ хв}$$

Після підстужування виконують операцію гартування:

$$\tau_{\text{ох}} = (t_{\text{п}} - t_{\text{к}}) / V_{\text{ох}}, \quad (3.2)$$

де $t_{\text{п}}$ – температура, від якої розпочинається охолодження виробів, $t_{\text{п}} = 850^{\circ}\text{C}$;
 $t_{\text{к}}$ – кінцева температура охолодження, $t_{\text{к}} = 20^{\circ}\text{C}$;
 $V_{\text{ох}}$ – швидкість охолодження в підігрітому маслі $35^{\circ}\text{C}/\text{хв}$.

$$\tau_{\text{ох}} = (850 - 20) / 35 = 24 \text{ хв}$$

Тоді загальний час цементациї в СВЧ індукторі і гартування визначається за формулою:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{підс}} + \tau_{\text{витр}} + \tau_{\text{ох}} + \tau_{\text{зв}} \quad (3.4)$$

Тоді сумарний час цементациї в СВЧ індукторі і гартування:

$$\tau_{\text{заг}} = 20 + 7230 + 14400 + 1440 + 1800 = 24890 \text{ с} \approx 7 \text{ год}$$

Низький відпуск (температура $180 \pm 10^\circ\text{C}$). Тривалість нагрівання розраховується по формулі:

$$\tau_{\text{H}} = S \cdot k \cdot f \cdot L_{\text{спл}}, \quad (3.5)$$

де S — характеристичний розмір виробу, який дорівнює напівтовщини шестерні $22/2 = 11$ мм;

k - коефіцієнт форми, $k=2$;

f – коефіцієнт розташування виробів в нагрівальному пристрої, що впливає на час нагрівання, $f=1,4$;

$L_{\text{спл}}$ - коефіцієнт легування сталі $L_{\text{спл}} = 2,15$ хв/мм [16].

$$\tau_{\text{H}} = 11 \cdot 2 \cdot 1,4 \cdot 2,15 = 66,22 \text{ хв} = 3733 \text{ с}$$

Час витримки при низькому відпуску згідно довідника складає 3 години.

Тривалість розвантаження та завантаження тскл складає 30 хв.

Розрахунок тривалості охолодження $\tau_{\text{ох}}$ при низькому відпуску:

$$\tau_{\text{ох}} = (\tau_{\text{п}} - \tau_{\text{к}}) / V_{\text{ох}}, \quad (3.6)$$

де $\tau_{\text{п}}$ – температура, від якої розпочинається охолодження виробів, $\tau_{\text{п}} = 300^\circ\text{C}$;

$\tau_{\text{к}}$ – кінцева температура охолодження, $\tau_{\text{к}} = 20^\circ\text{C}$;

$V_{\text{ох}}$ – рекомендована для виробу швидкість охолодження на повітрі $5^\circ\text{C}/\text{с}$.

$$\tau_{\text{ох}} = (180 - 20) / 5 = 32 \text{ с}$$

Загальний час низького відпускання становить:

$$t_{\text{заг}} = 3733 + 10800 + 180 + 32 = 14745 \text{ с} = 4,1 \text{ год.}$$

3.6 Контроль якості, усунення дефектів і запобігання браку

Кожен етап термічної обробки має значний вплив на якість готових виробів. Контроль якості вхідних матеріалів, виконання технологічних процесів термічної обробки та готової продукції є важливою складовою для забезпечення високого рівня продуктивності та надійності продукції.

Вхідний контроль виконується для:

Перевірки відповідності матеріалів встановленим технічним вимогам;

Виявлення дефектів у матеріалах, аналізу їх причин і оцінки їх впливу на властивості виробу;

Запобігання використанню невідповідних або дефектних матеріалів у процесі виготовлення.

Основні види вхідного контролю:

Візуальний огляд, що може включати використання приладів із невеликим збільшенням;

Аналіз хімічного складу матеріалу для перевірки його відповідності стандартам;

Перевірка механічних властивостей, таких як міцність, твердість та пластичність;

Дослідження мікро- та макроструктури, які дозволяють виявити внутрішні дефекти матеріалу.

У разі, якщо вхідний контроль виявляє невідповідність сировини технічним вимогам за одним чи кількома параметрами, така сировина повертається постачальнику. При цьому до постачальника можуть бути застосовані штрафні санкції відповідно до договірних умов.

Брак, що виникає під час термічної обробки, може бути спричинений наявністю дефектів металургійного походження, таких як ліквация чи усадкові раковини. Окрім цього, дефекти можуть виникати через гарячу або холодну пластичну деформацію, а також унаслідок порушень технологічного процесу термічної обробки.

Оцінка якості термічної обробки ґрунтується на аналізі мікроструктури матеріалу, його механічних, фізичних і технологічних властивостей, а також інших спеціалізованих характеристик. Вона є ключовим етапом, що дозволяє оцінити ефективність проведених процесів та виявити можливі відхилення.

Технічний контроль під час термічної обробки охоплює не лише перевірку якості отриманих результатів, а й постійний моніторинг технологічних параметрів на всіх етапах обробки. Це включає вимірювання тривалості та температури окремих операцій за допомогою термопар, розташованих у різних точках печі. Такий підхід дозволяє контролювати зміни у роботі нагрівального обладнання, а також здійснювати контроль складу робочої атмосфери.

Під час моніторингу температурних режимів за допомогою спеціалізованих приладів важливо фіксувати часові інтервали, протягом яких реєструються параметри процесу. Це дає змогу вчасно виявляти відхилення, попереджати утворення дефектів і забезпечувати високу якість кінцевої продукції.

Періодичному контролю підлягають ключові аспекти термічної обробки, такі як правильність розташування виробів під час завантаження, рівномірність прогрівання садки, а також температура рідини для гартування. Відповідність мікроструктури та розміру зерна встановленим технічним вимогам визначається за допомогою металографічного аналізу, який базується на державних стандартах, еталонах та шкалах.

Перевірка лінійних розмірів виконується за допомогою точного вимірювального обладнання, такого як штангенциркулі та лінійки. Для

виявлення невидимих дефектів, які неможливо виявити під час візуального огляду, ефективно застосовуються методи магнітної дефектоскопії.

Оскільки термічна обробка може викликати різноманітні види браку, надзвичайно важливими є профілактичні заходи для мінімізації ризику дефектів. У разі їх виявлення вживаються відповідні заходи для виправлення, якщо це технічно можливо.

Під час цементації виробів особливу увагу приділяють контролю вуглецевого потенціалу атмосфери. Для цього використовується датчик у вигляді тонкого сталевого дроту, який піддається науглецюванню в газовому середовищі печі. Зміни електроопору дроту свідчать про процес науглецювання, і ці дані передаються на контрольно-регулюючий прилад, який автоматично активує дозатор для коригування витрати карбюратора. Такий контроль газового середовища здійснюється на всіх етапах термічної обробки, забезпечуючи якість кінцевого виробу та відповідність технічним вимогам.

Таблиця 3.3 – Види дефектів шестерень

№ п/п	Дефект	Можливі причини виникнення	Заходи по запобіганню	Заходи по усуненню
1	Занижена (завищена) глибина дифузійного шару	Низький (перевищений) вуглецевий потенціал робочого середовища	Контроль та регулювання температури, вуглецевого потенціалу і часу витримки на технологічному рівні	Повторна ХТО; при завищеному шарі цей дефект не може бути виправленим

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5
2	Неоднорідна товщина науглецьованого шару	Наявність забруднених поверхонь; порушення роботи циркуляційного вентилятора; невідповідна швидкість руху	Ретельне очищення поверхні виробів до ХТО; контроль роботи вентилятора; регулювання режиму роботи	У випадках, коли не досягнута необхідна глибина шару, здійснюється повторна ХТО
4	Високий рівень крихкості дифузійного шару	Наявність зайвих фаз; знижена твердість серцевини	Регулювання активності робочого середовища для досягнення оптимального вмісту елемента, що дифундує	Знеуглецювання
5	Занижена твердість	Невірно обране охолоджувальне середовище; низька температура гартування	Раціональний вибір гартівного середовища; використання раціональних температурних режимів гартування	Повторне гартування в раціональному середовищі
6	Гартівні тріщини	Нагрівання з підвищеними швидкостями; різке охолодження із завищеною швидкістю	Використання технології ступінчатого нагрівання; використання раціональних гартівних середовищ	Невиправний дефект
7	Деформація виробів	Нераціональне розміщення виробів в садці; завищені температурні режими гартування; невідповідна	Розробка раціональної схеми садки; використання гартівних машин, пресів	Рихтування, термічна обробка виробів; відпал і повторне гартування

Кінець таблиці 3.3

1	2	3	4	5
8	Завищений розмір аустенітного зерна	Перевищена температура гартування; завищений час витримки	Термічна обробка за оптимальним режимом	Повторна термічна обробка
9	Завищена твердість після відпуску	Занижений температурний режим; занижений час відпуску	Виконання обробки за оптимальним режимом	Повторне відпускання при підвищених температурах
10	Занижена твердість після відпуску	Занижений температурний режим; завищена кількість залишкового аустеніту	Виконання обробки за оптимальним режимом; використання обробки холодом	Відпал з наступним гартуванням і відпуск при раціональних температурах та витримках

3.7 Отримані результати

Дослідження мікроструктури підтвердили, що якість процесу цементації за використанням нагрівання СВЧ, виконаного за запропонованою технологією, відповідає високому рівню та не поступається традиційним методам. Завдяки покращеному контролю параметрів технологічного процесу досягається значно вищий рівень відтворюваності результатів. Це забезпечує стабільність і якість зміцненого шару, отриманого за допомогою комбінованого методу цементації. Мікроструктура зміцненого шару, сформованого за даною технологією, представлена на рисунку 3.3.

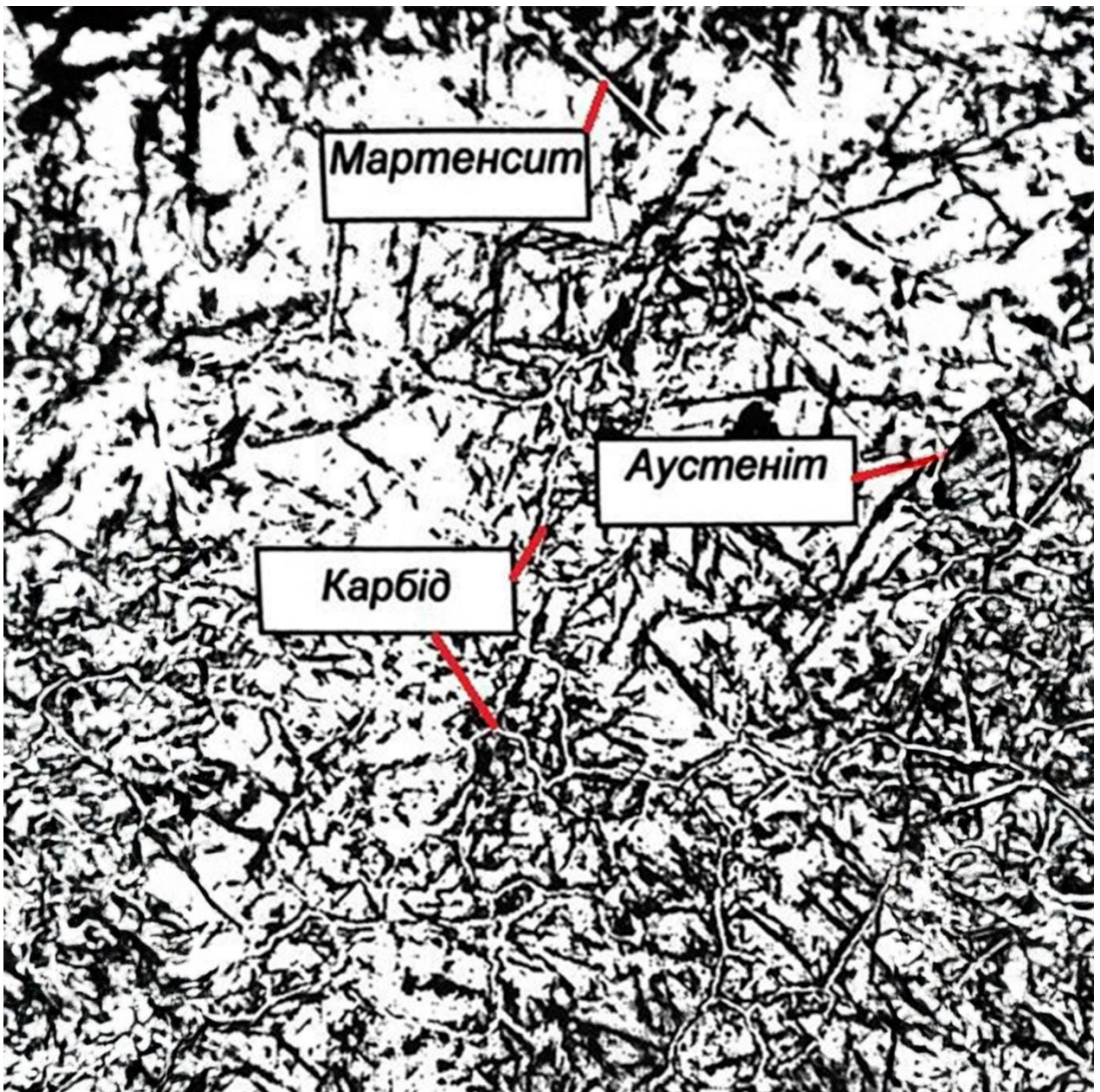


Рисунок 3.3 Структура зміцненого зубця шестерні, отримана за запропонованою технологією, зі сплаву 18ХГТ

Порівняння механічних характеристики зміцненого шару після цементації за класичною та запропонованою технологіями не виявило суттєвих відмінностей. Водночас, при застосуванні нової методики спостерігалось незначне підвищення твердості поверхні до 58–63 НРС порівняно з 57–62 НРС у випадку класичної технології.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Можливість ураження електричним струмом через недотримання правил електробезпеки, несправності обладнання або відсутність заземлення, що може призвести до електротравм чи навіть летального випадку.

Можливість отримання механічних травм, опіків, ушкоджень органів зору внаслідок відсутності або невикористання засобів індивідуального захисту.

Ризик термічних або хімічних опіків під час процесу термообробки деталей у СВЧ-печі через нехтування або відсутність засобів індивідуального захисту.

Порушення цілісності обладнання або виникнення розгерметизації робочого середовища СВЧ-печі, що може призвести до витоку небезпечних речовин чи перевищення допустимих рівнів випромінювання, створюючи ризик для здоров'я працівників.

Небезпека термічного пошкодження або деформації деталей, яка виникає через перевищення температурних режимів або несправність системи контролю, що може призвести до низької якості обробки та аварійних ситуацій.

Погіршення параметрів повітряного середовища у робочій зоні через недостатньо ефективну вентиляцію, що може спричинити загальні захворювання органів дихання або алергічні реакції.

Можливість загоряння, спричинена порушенням правил безпеки чи виходом з ладу обладнання, що може призвести до пожежі.

Ризики, пов'язані з надзвичайними ситуаціями, які виникають через специфічні умови праці, потребують належних заходів реагування та контролю.

4.2 Заходи забезпечення безпеки

Для виключення можливості ураження електричним струмом згідно з ПУЕ – 2019 «Правила влаштування електроустановок» передбачається:

Всі робітники повинні мати 2-3 групу з електробезпеки. Періодично один раз на рік необхідно перевіряти опір заземлення, який не повинен перевищувати 4 Ом. Якість заземлення перевіряється щорічно з оформленням акту відповідно нормативних вимог ГОСТ 12.1.019-79 «Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту» [45].

Періодично, не рідше ніж два рази на рік, передбачається перевіряти справність контактів електроз'єднань, штепсельних вилок з'єднувальних провідників. В тому випадку, якщо при дотику до не струмопровідних частин електроприводу відчувається електричний струм, передбачається вимикання приладу від електромережі. Ремонт електричного обладнання проводять особи, котрі мають кваліфікаційну групу (не менше III групи) з електробезпеки.

Усі ремонтно-монтажні роботи або огляд високовольтних частин мікроскопу проводити не менш, ніж двома особами.

З метою забезпечення електробезпеки, необхідним є знання основних заходів, для попередження уражень електричним струмом.

Організаційні заходи - до виконання робіт допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання, та перевірку знань з електробезпеки. Основним нормативним актом є ПУЕ (правовий устрій з електроустанов). Ремонт обладнання повинен здійснювати тільки спеціальний підготовлений персонал. Для кожного електроспоживного обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи.

Технічні заходи - розташування струмоведучих частин на недоступній висоті (до 1000 В), не менше 3,5 м (більше 1000 В - 6 м). Всі не ізольовані струмопровідні лінії повинні бути надійно огороженні суцільними

огорожами. Відкриття яких можливі тільки за допомогою спеціальних пристроїв. Опір ізоляції електричних дротів повинен бути не менше 0,5 Ом. Обов'язковим є захисне заземлення або занурення. Обов'язковим є використання індивідуальних засобів захисту, зокрема гумовий діелектричний килимок, опір якого слід періодично перевіряти. Обов'язковим є встановлення автоматичних блокуючих пристроїв, які запобігають небезпечним діям людини. Блокуючі пристрої розподіляють на механічні, електричні, та електромеханічні.

У відповідності до вимог «Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту», яке затверджене наказом Держгірпромнагляду 24.03.2008 № 53 та зареєстровано в Міністерстві юстиції України 21 травня 2008 р. за № 446/15137 лаборант металографічної лабораторії при роботі з лабораторними муфельними печами повинен мати: халат бавовняний, берет бавовняний, фартух брезентовий з нагрудником з вогнезахисним просоченням, туфлі шкіряні на гумовій підшві, рукавиці брезентові із вогнезахисним просоченням, окуляри захисні закриті.

Для попередження термічних та хімічних опіків передбачено виконання роботи в спецодязі (халат, рукавиці) відповідно до ДСТУ 3962-2000 та ГОСТ 12.4.137-2001 [46].

У випадку потрапляння луги в очі або ротову порожнину, нейтралізацію після попереднього промивання водою проводять:

- при попаданні кислоти – 5% розчином бікарбонату натрію;
- при попаданні лугу – 2% розчином борної кислоти або 3% розчином оцтової кислоти.

4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Розглянемо комплекс заходів щодо забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов праці в лабораторії.

Вимоги санітарії до параметрів повітряного середовища виробничих приміщень наводяться ГОСТ 12.1.005-88 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони»[49]. Для нормальної роботи в лабораторії запроєктовано підтримання оптимальних норм температури, відносної вологості і швидкості переміщення повітря, значення яких наведені в табл. 4.1. Для підтримування температури повітря на належному рівні пропонується використовувати кондиціонування повітря, вентиляція - природна (провітрювання) та механічна – загально обмінна у відповідності з вимогами СНиП 2.04.85-86 «Опалення, вентиляція, кондиціонування. Норми проектування» [49]. Поряд з використанням вентиляції. У шафі для зберігання реактивів передбачено встановлення витяжної вентиляції.

Таблиця 4.1 - Оптимальні норми температури, відносної вологості і швидкості переміщення повітря у робочій зоні виробничих приміщень

Сезон року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість переміщення повітря, м/с
Холодний і перехідний період року	Легка, I	20-23	60-40	0,2
Теплий період року		22-25		

Об'єм повітря, що видаляється за допомогою витяжної вентиляції розраховується за формулою :

$$L = F \cdot V \cdot 3600 \text{ м}^3/\text{Год.}$$

Та дорівнює : $L = 5,9 \cdot 0,5 \cdot 3600 = 10620 \text{ м}^3/\text{Год.}$

Також передбачається проведення вологого прибирання в приміщенні. Персонал, що працює на комп'ютері зобов'язаний дотримуватися вимог інструкції, розробленої на підставі Санітарних норм і правил СанПіН 2.2.2.542-96 «Гігієнічні вимоги для відео дисплейних терміналах, персональними електротехнічними машинами і організації робіт» [50], а також нести особисту відповідальність за дотримання вимог безпеки своєї праці і за створення небезпечного чи шкідливого виробничого фактору для інших працюючих і поломку комп'ютера.

При роботі з комп'ютером шкідливими і небезпечними чинниками є :

- електростатичні поля;
- електромагнітне випромінювання;
- локальне стомлення, загальна втома.

Режими праці та відпочинку при роботі з комп'ютером повинні організовуватися в залежності від виду та категорії трудової діяльності.

Види трудової діяльності поділяються на 3 групи:

Група А - робота із зчитуванням інформації з екрану комп'ютера з попереднім запитом;

- група Б - робота з введенням інформації;
- група В - творча робота в режимі діалогу.

За основну роботу з комп'ютером слід приймати таку, яка займає не менше 50 % роботи протягом часу роботи комп'ютера.

Для видів трудової діяльності встановлюється 3 категорії тяжкості і напруженості роботи з комп'ютером, які визначаються:

- для групи А - по сумарному числу опрацьованих знаків за час роботи з комп'ютером, але не більше 60 000 знаків;
- для групи Б - по сумарному числу зчитуються або вводяться знаків за час роботи з комп'ютером, але не більше 40 000 знаків;

- для групи В - по сумарному часу безпосередньої роботи з комп'ютером, але не більше 6 годин за час роботи з комп'ютером.

Для забезпечення оптимальної працездатності і збереження здоров'я протягом часу роботи необхідно переконатися, що монітори комп'ютера мають невідбивне покриття (окрім групи А) з коефіцієнтом відбиття не більше 0,5. Покриття повинне також забезпечувати зняття електростатичного заряду з поверхні екрана, іскріння і накопичення пилу. Корпус монітора повинен забезпечувати захист від іонізуючих та неіонізуючих випромінювання. Необхідно перевірити робоче положення комп'ютера від стань між стіною з віконними прорізами і столом має бути не менше 0,8 м. При невеликій кількості робочих місць бажано розташувати столи біля протилежної стіни щодо віконних прорізів. Відстань між робочими столами повинно бути не менше 1,2м. Не допускається знаходження другого робочого місця з боку задньої стінки комп'ютера. Оптимальними параметрами температури в кабінеті є 19-21°C, допустимі 18-22°C, відносна вологість повітря 62-55%. Тривалість безперервної роботи з комп'ютером без регламентованої перерви не повинна перевищувати 2 години. Під час регламентованої перерви з метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, усунення впливу гіподинамії, запобігання розвитку втоми доцільно виконувати комплекси вправ. Рівень шуму в приміщенні під час роботи комп'ютерів не повинен перевищувати 50 дБ. Конструкція відео монітора повинна передбачати заходи, що забезпечують хорошу розбірливість зображення, незалежну від зовнішнього освітлення.

4.4 Заходи з пожежної безпеки

До заходів щодо пожежної профілактики відносяться організаційні (правильна експлуатація машин, утримання будівель, організація дружин,

пожежно-технічних комісій, видання наказів з питань посилення пожежної безпеки, тощо); технічні (дотримування протипожежних правил, норм при проектуванні будівель, при улаштуванні електроустановок, опалення, вентиляції та ін.); експлуатаційні заходи (своєчасні профілактичні огляди, ремонт та випробування обладнання); заходи режимного характеру - це заборона палити в невстановлених місцях, виконання зварювальних робіт.

Приміщення лабораторії електронної мікроскопії у відповідності до СНиП 2.09.02-85 «Виробничі будинки промислових підприємств. Норми проектування» є пожежонебезпечним і відноситься до категорії Д (виробництва, що переробляють негорючі матеріали в холодному стані). Для даної категорії у випадку, якщо допустима кількість поверхів не обмежується, ступінь вогнестійкості будівель - I і II, площа поверху між протипожежними стінами будівель не обмежується.

У відповідності з вимогами СНиП 2.01.02-85 «Протипожежні норми проектування будівель та споруд» [51], передбачаються шляхи евакуації працівників у випадку пожежі (евакуаційні виходи). Для категорії виробництва Д, незалежно від об'єму приміщення, для I і II ступеню вогнестійкості будівель, відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не обмежується. Запроектовано використовувати обладнання, силові і освітлювальні мережі, котрі відповідають вимогам пожежної безпеки.

Оточуюче середовище в лабораторії - невибухонебезпечне (не містить значної кількості струмопровідного пилу, водяної пари, агресивних газів та парів в концентраціях, які негативно впливають на обладнання, матеріали та ізоляцію).

Застосування автоматичних засобів пожежної сигналізації дозволяє сповістити персонал про пожежу і місце її виникнення. Пожежні сповіщувачі перетворюють неелектричні фізичні величини (випромінювання теплової і світлової енергії, рух частинок диму) в електричні, що у вигляді сигналу визначеної форми спрямовуються до прийомної станції.

Передбачено наявність в лабораторії одного порошкового вогнегасника типу ОП-5 (клас пожежі Д - пожежі металів та їх сплавів). Розташовується вогнегасник при вході у дослідницьку лабораторію. Відстань від можливого осередку пожежі до місця розташування вогнегасника не повинна перевищувати 70 м .

При виникненні пожежі в дослідницькій лабораторії необхідно: негайно викликати пожежну частину за телефоном (9-101), прийняти міри до евакуації співробітників, вимкнути обладнання від електромережі, вжити заходи щодо обмеження розповсюдження пожежі, сповістити адміністрацію та керівника лабораторії, покинути небезпечну зону і приступити до ліквідації пожежі первинними засобами пожежогасіння (вогнегасником, що розташовується при вході в лабораторію).

4.5 Заходи забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій

Керівники об'єктів повинні передбачити управління надзвичайними ситуаціями. Для задачі забезпечення безпеки людини в НС стратегія управління повинна включати здійснення трьох цілей:

- запобігання причин виникнення;
- попередження надзвичайних ситуацій
- пом'якшення, максимальне послаблення наслідків надзвичайних ситуацій.

Стратегія запобігання причин виникнення надзвичайних ситуацій передбачає недопущення таких дій або процесів, які несуть загрозу населенню. Дана стратегія здійснюється або відмовою від будівництва небезпечних об'єктів, або знищенням чи перепрофілюванням виробництв - джерел підвищеної небезпеки.

Друга стратегія - запобігання самої НС - передбачає недопущення виходу небезпечного процесу з-під контролю шляхом використання надійних аварійних систем, сигналізації, автоматики та інших заходів з підвищення надійності і стійкості роботи підприємств, а також шляхом заходів превентивної евакуації.

Третя стратегія - пом'якшення наслідків - передбачає орієнтацію на ослаблення, локалізацію наслідків НС. Ця стратегія має пріоритет в управлінні стихійними лихами і ситуаціями «комбінованого» типу.

У практиці управління найбільший ефект дає спільне використання всіх трьох стратегій, особливо при аваріях техногенного характеру. Для реалізації кожної із стратегій управління необхідно розробляти і приймати комплекс превентивних та оперативних заходів.

Превентивні:

- аналіз і встановлення зовнішніх і внутрішніх причин, що ведуть до катастрофи;
- прогнозування вогнищ ураження, втрат і збитків на підприємстві;
- заходи з підвищення стійкості;
- обґрунтування сил і засобів для проведення дій з локалізації вогнищ ураження та пошуково-рятувальних робіт;
- навчання формувань і громадян способам захисту;
- підготовка надійного КП управління.

Оперативні:

- оповіщення про НС;
- проведення всіх видів розвідки та оцінка обстановки;
- проведення екстрених захисних заходів (укриття в ЗС, евакуація, використання ЗІЗ);
- використання сил постійної готовності для локалізації катастрофи;
- надання першої медичної та першої лікарняної допомоги;
- нарощування сил і засобів в ОП за рахунок залучення формувань підвищеної готовності;

- термінове постачання постраждалих продовольством та іншими необхідними засобами;

- введення аварійно-відновлювальних робіт.

При виникненні НС організовується надзвичайне управління, яке складається з чотирьох стадій ліквідації наслідків.

Стадія прийняття екстрених заходів. Мета - задіяти механізм надзвичайного управління і вчасно зреагувати на НС. Основні завдання початкової стадії: встановлення факту НС, попередня оцінка обстановки в зоні лиха і масштабів наслідків, мобілізація і встановлення оперативних завдань органам надзвичайного управління, віддача розпоряджень на залучення мобільних сил пожежної охорони, швидкої медичної допомоги, охорони громадського порядку та інших служб для допомоги постраждалим, сприяння місцевим органам влади в організації рятувальних робіт і локалізації зони лиха власними силами; інформування населення та органів управління про НС та вжиті заходи. Тривалість початкової стадії - 1-10 годин.

Стадія оволодіння ситуацією та організації механізму надзвичайного управління в зоні лиха, у плануванні та проведенні рятувальної операції відповідного масштабу. Задача: детально оцінити обстановку, терміново прийняти обґрунтоване рішення і уточнити план ліквідації наслідків НС; розрахувати необхідні сили і засоби, ресурси для всього комплексу робіт в зоні лиха, організувати чітку взаємодію всіх залучених сил і аварійних служб. Тривалість другої стадії - від кількох годин до кількох діб.

Основна і визначальна стадія. Мета - перебороти надзвичайний характер ситуації: відновити безпеку населення в зоні лиха, ліквідувати загрозу життю і здоров'ю всім постраждалим, створити мінімально необхідні умови для життєдіяльності населення, що залишилося. Задача: розгортання в найкоротші терміни рятувальних робіт на всіх постраждалих об'єктах зони лиха, надання допомоги потерпілим для захисту їх життя, здоров'я і підтримання життєздатності в екстремальних умовах; евакуація постраждалих із зони лиха та їх життєзабезпечення; терміновому проведенні аварійно-відновлювальних

робіт на системах водо, тепло-, газо-, електричних системах і зв'язку в зоні лиха. Тривалість - кілька діб - кілька тижнів.

Стадія відновлення, тобто економічна, соціальна, культурна та екологічна реабілітація зони лиха. Органи надзвичайного управління вичерпали свою роль і передають функції постійної дії місцевим органам управління. Розробляється спеціальна програма з черговістю комплексу заходів з реабілітації зони лиха.

Таким чином, основними заходами безпеки при дослідженні є:

- комплекс заходів для забезпечення безпеки при виконанні робіт всі співробітники лабораторії повинні мати 2-3 групу з електробезпеки;

- використання паралельного заземлення електричного обладнання, яке передбачається перевіряти не рідше ніж два рази на рік;

- використовувати ізоляцію проводів;

- перед початком роботи перевіряти справність приладів; до роботи приступати лише після усунення недоліків;

- тримати робоче місце в чистоті та порядку задля попередження травмування.

- при роботі з реактивами використовувати захисний спецодяг (халат, рукавиці).

- заходи з санітарно-гігієнічних умов праці

- запроектовано підтримання оптимальних норм температури, відносної вологості і швидкості переміщення повітря в приміщенні лабораторії;

- запропоновано використовувати кондиціонування повітря, вентиляція - природна (провітрювання) та механічна – встановлення витяжної вентиляції. Об'єм повітря, що видаляється за допомогою витяжної складає 10620 м³/год.

- заходи з протипожежної безпеки (відповідно до СНиП 2.09.02-85, СНиП 2.01.02-85):

- спроєктовано наявність в лабораторії одного порошкового вогнегасника типу ОП-5. Розташовується вогнегасник при вході у дослідницьку лабораторію.

Під час проведення досліджень для збереження життя та здоров'я працівників лабораторії та наявного у приміщенні майна слід дотримуватися заходів безпеки і тим самим підвищити культуру виробництва, виключити отримання травм при роботі і зберегти життя та здоров'я робітників. Крім того позбавити від небажаних економічних втрат.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Напрямки еволюції глобального технологічного ринку.

У сучасній промисловості постійно зростає потреба в оптимізації виробничих процесів. Шестерні, які використовуються в багатьох механізмах, повинні відповідати підвищеним вимогам до міцності та зносостійкості. Досягнення цих характеристик можливе завдяки використанню методів, таких як газова цементація, обробка в твердих і рідких середовищах, нітроцементація, а також сучасне гартування поверхневих шарів за допомогою струмів високої частоти.

Важливим фактором підвищення прибутків є зменшення витрат на виготовлення продукції. Методи хіміко-термічної обробки зазвичай пов'язані з додатковими витратами на матеріали, які є носіями насичувальних елементів. Використання технології поверхневого гартування СВЧ дозволяє суттєво скоротити час обробки, зменшуючи витрати вдвічі. Тому розробка нової комбінованої технології гартування шестерень із застосуванням нагрівання СВЧ є вкрай актуальною. Це не лише дасть змогу раціональніше використовувати ресурси та зменшити потребу в ручній праці, а й значно підвищить ефективність роботи обладнання.

Лідерами у впровадженні процесів гартування з використанням нагрівання СВЧ у виробничих технологіях є такі країни, як Китай, Японія, Німеччина, Італія, Франція та Україна. Ці держави активно розвивають та вдосконалюють технології для підвищення якості продукції та ефективності виробництва, зокрема в галузі обробки матеріалів. Серед країн, що розвиваються, значного прогресу в застосуванні таких процесів досягли Індія, Бразилія, Мексика, Південна Корея та інші. Вони також працюють над впровадженням сучасних підходів для оптимізації виробництва, скорочення витрат і покращення характеристик кінцевої продукції. Цей напрям є

важливим кроком для посилення їхньої конкурентоспроможності на світовому ринку.

У таблиці 5.1 представлено опис суті ідеї та потенційних ринків, у рамках яких можливо виявити майбутніх клієнтів.

Таблиця 5.1 – Опис основної ідеї дипломного проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувачів
Головна ідея проекту полягає в розробці нової технології гартування шестерень із застосуванням нагрівання СВЧ	Виробництво шестерень, скорочення витрат на виготовлення та підвищення ефективності виробничих процесів.	скорочення витрат на виробництво.
		збільшення ефективності виробничих процесів
		Автоматизація виробничих процесів

У таблиці 5.2 наведено результати початкового аналізу характеристик потенційного ринку.

Таблиця 5.2 – Первинний аналіз характеристик потенційного ринку.

	Показники стану ринку	Характеристика
1	Головні конкуренти	Основними конкурентами нової технології є існуючі методи в рідкому чи твердому карбюризаторі, а також сучасні розробки, зокрема іонна та плазмове гартування.
2	Динаміка ринку	Щорічне зростання обсягів продукції з використанням деталей, оброблених методом поверхневого гартування, свідчить про позитивну динаміку ринку.
3	Наявність обмежень для входу	Основними факторами, що обмежують вихід на ринок, є: - фінансові – потреба у значних інвестиціях для модернізації обладнання та покриття інших витрат; - матеріальні – необхідність у високоякісній сировині для забезпечення належної якості продукції;

Кінець таблиці 5.2

1	2	3
		- кадрові – потреба у кваліфікованих спеціалістах, здатних підтримувати виробничий процес на високому рівні.
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Устаткування, що використовується у виробництві, повинно пройти обов'язкову сертифікацію. Також робочі місця мають відповідати стандартам техніки безпеки та охорони праці. Вироби повинні відповідати встановленим вимогам якості.

Карта стейкхолдерів є інструментом, який дозволяє визначити, як лідер компанії чи проєкту може взаємодіяти із зацікавленими сторонами. Ключовим аспектом у складанні цієї карти є врахування всіх відносин, через які компанія може впливати на людей чи інші організації, або, навпаки, як ці сторони можуть впливати на діяльність підприємства.



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

5.2 Техніко-економічні розрахунки

У цьому розділі розглядається економічне обґрунтування впровадження сучасної технології гартування шестерень із застосуванням нагрівання за допомогою СВЧ. Такий підхід дозволяє суттєво оптимізувати виробничий процес, знизити витрати на обробку деталей та підвищити їх експлуатаційні характеристики. Особлива увага приділяється техніко-економічним показникам, які демонструють ефективність впровадження цієї технології у виробництво. У таблиці 5.3 наведено ключові параметри, що підтверджують переваги використання технології гартування СВЧ порівняно з традиційними методами обробки.

Розрахунок вартості сировини та основних матеріалів здійснюється на підставі технічно обґрунтованих норм їх витрати на виготовлення одиниці продукції, а також актуальних цін на відповідні матеріальні ресурси. Додатково враховуються транспортно-заготівельні витрати, пов'язані з доставкою матеріалів. Загальна сума витрат коригується з урахуванням вартості зворотних відходів, які утворюються під час виробничого процесу.

Таблиця 5.3 – Техніко-економічні показники виробів

	Найменування виробу	Базова технологія	Іновація
1.	Шестерні з легованої конструкційної сталі марки 18ХГТ.	Традиційне газове гартування.	Технологія гартування шестерень із використанням нагріву СВЧ.
2.	Програма випуску, шт	20000	40000

До витрат на виконання науково-дослідної роботи входить вартість усіх ресурсів, необхідних для виконання повного обсягу робіт. Визначення

витрат на оплату праці здійснюється з урахуванням робочого часу одного працівника (див. таблиці 5.4, 5.5), а також обчислюється сума ЄСВ.

Під час виготовлення деталей із низьколегованих конструкційних сталей використовуються потужності плавильної дільниці, токарної обробки, поверхневої обробки, хіміко-термічної дільниці та травлення. Собівартість деталей формується на етапі їх підготовки до передачі в складальний цех, де здійснюється складання вузлів.

Таблиця 5.4 – 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	48	80	200	480000	30	144000	624000	137280
Допоміжні працівники	20	28	65	205	266500	30	79950	346450	76219
Черговий та ремонтний персонал	15	22	43	210	173250	30	51975	225225	49550
Разом виробничих працівників	65	98		Всього	919750			1195675	263049

Таблиця 5.5 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу

Посада	Кількість осіб	Загальний посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премій, грн	Загальний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Начальник цеху	1	19000	25	4750	23750	5225
Заступник начальника	2	16 000 (кожен)	25	8000	40000	8800
Керівник груп	5	11 000 (кожен)	25	11250	56250	15125
Майстри дільниць	5	9 000 (кожен)	25	11250	56250	12375
Керівник ПДБ	1	12500	25	3125	15625	3437,5
Керівник ТБ	1	13200	25	3300	16500	3630
Керівник ФЕУ	1	11500	25	2875	14375	3162,5
Керівник БВ	1	12500	25	3125	15625	3437,5

Річний фонд заробітної плати адміністративного персоналу становитиме 1 195 675 грн, включаючи преміальні виплати, що еквівалентно 59,78 грн на одиницю продукції. Щорічні відрахування ЄСВ для адміністративного персоналу складуть 263 049 грн, або 13,15 грн на одну деталь. Загальна сума ЄСВ становить 26,30 грн на одиницю виробу, що в загальному дорівнює 526 098 грн.

Матеріальні витрати на річну виробничу програму виготовлення шестерень розраховуються наступним чином.

Річний випуск деталей за стандартною технологією становить 200 000 шт, а за новою технологією — удвічі більше (400 000 шт). Відповідно до даних у публічному доступі, вартість одного кілограма сталі 18ХГТ становить приблизно 45 гривень. Середня маса кожної деталі дорівнює близько 1 кілограма. Таким чином, витрати на сировину для виробництва складають 9 000 000 гривень.

Загальні витрати на сировину та матеріали становлять 9 000 000 грн, що відповідає 45,00 грн за одну шестерню.

Тариф на купівлю електроенергії від ПАТ «Запоріжжяобленерго» у 2025 році становить 8,650 грн за кВт·год. Тариф на розподіл електроенергії для підприємств другого класу дорівнює 2,02 грн за кВт·год. Таким чином, загальна вартість одного кВт·год складає 10,67 грн.

Загальна витрата електроенергії на одну садку становить 650 кВт·год, що відповідає 6 935,50 грн. Це означає, що витрати на електроенергію для однієї шестерні складають 34,68 грн.

Витрати на освітлення на годину дорівнюють 30,50 грн.

Вартість електроенергії для першої дільниці становить 22,43 грн на одну деталь.

Вартість електроенергії для токарної обробки складає 5,27 грн на одну деталь.

Вартість всієї поверхневої обробки дорівнює 2,92 грн на одну деталь.

Вартість хіміко-термічної обробки складає 4,93 грн на одну деталь.

Вартість електроенергії для травлення становить 2,17 грн на одну деталь.

Загальні витрати на електроенергію становлять 72,40 грн на одну деталь.

Тариф на водопостачання та водовідведення у 2025 році складає 70,00 грн за 12 м³.

Вартість тепла в зимовий період дорівнює 45,00 грн за 1 м³.

Вартість газу розраховується, враховуючи його використання під час термічної обробки та подачі кисню в охолоджувачі.

Таблиця 5.6 – Розрахунок вартості споживчих послуг для стандартної та оптимізованої технології

Послуга	Норматив, грн/од.	Програма, шт	Тариф, грн	Сума, грн (стандартна)	Сума, грн (оптимізована)
Електропостачання	35,72	200000 / 400000	10,67	6936000	14288400
Водопостачання	3,50		70,00	70000	140000,0
Теплопостачання	6,50		45,00	1300000	2600000
Газопостачання	8,10			1620000	3240000
Разом	57,01			9926000	19852000

Розрахунок амортизації обладнання:

Амортизація обладнання розраховується за формулою:

$$A = \frac{\text{Первісна вартість обладнання} - \text{Залишкова вартість}}{\text{Термін корисного використання}} \quad (5.1)$$

Де: А — річна сума амортизації, тис. грн;

Первісна вартість обладнання — 162 650 тис. грн;

Залишкова вартість — 0 тис. грн;

Термін корисного використання — 10 років.

$$A = \frac{162650 - 0}{10} = 16265 \text{ грн/рік.}$$

Для розподілу амортизації на одну деталь враховуємо річний обсяг виробництва:

$$A_{\text{на деталь}} = \frac{16265}{200000} = 0,08132 \text{ або } 81,32 \text{ грн на одну деталь}$$

Таблиця 5.7 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Первісна вартість, тис. грн	Термін корисного використання, років	Річна сума амортизації, тис. грн	Амортизація на одну деталь, грн
Машини та обладнання	162 650	10	16 265	81,32

Загальна сума амортизації становить 16265 тис. грн, з яких 10% відносяться до виробництва деталей — 1626,5 тис. грн, або 81,32 грн на одну деталь для стандартної технології і 40,66 грн для нової технології.

Таблиця 5.8 – Калькуляція собівартості

Калькуляційні статті	Стандартна технологія, грн	Оптимізована технологія, грн
Сировина та матеріали	45,00	45,00
Електропостачання	68,36	34,18
Водопостачання	3,50	3,50
Теплопостачання	6,50	6,50
Газопостачання	8,10	4,05
Заробітна плата	59,78	59,78
ЄСВ	26,30	26,30
Амортизація	51,48	25,74
Інші витрати	3,50	195,74

Економічний ефект розраховано за формулою:

$$E = (C_b - C_o) \cdot N \quad (5.2)$$

де: C_b — собівартість за стандартною технологією

C_o — собівартість за оптимізованою технологією;

N — обсяг випуску.

$$E = (302,36 - 215,97) \cdot 400000 = 34556000 \text{ грн.}$$

Отже, впровадження технології гартування шестерень із нагріванням СВЧ забезпечує економію в 34556000 грн. Це підтверджує доцільність переходу на нову технологію.

Запропонована технологія дозволяє не лише знизити витрати на виробництво, але й оптимізувати процеси обробки деталей. Завдяки скороченню часу виробництва та підвищенню продуктивності, нова технологія сприяє ефективнішому використанню виробничих ресурсів. До того ж, вона забезпечує зменшення собівартості одиниці продукції, що є важливим фактором для підвищення конкурентоспроможності підприємства.

Економічні розрахунки свідчать, що перехід на цю технологію є виправданим як у короткостроковій, так і у довгостроковій перспективі. Менша собівартість продукції забезпечує додаткову перевагу на ринку та створює умови для збільшення прибутковості підприємства. Таким чином, впровадження технології гартування СВЧ є не лише доцільним, а й стратегічно вигідним рішенням для подальшого розвитку виробництва.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено аналіз умов експлуатації шестерень та визначено основні види навантажень, які виникають у зубчастих колесах під час їхньої роботи. Встановлено напруження, що діють у матеріалі зубів, а також охарактеризовано принципи нагрівання за допомогою струмів високої частоти, які є основою сучасних методів поверхневої обробки.

Здійснено детальний порівняльний аналіз традиційних методів хіміко-термічної обробки зубців шестерень із сучасним підходом до поверхневого гартування, що використовує нагрівання струмами високої частоти (СВЧ). Визначено ключові переваги поверхневого гартування СВЧ: підвищена продуктивність, значне скорочення технологічного маршруту, швидкість виконання обробки, а також спрощення організації та контролю технологічного процесу.

Серед переваг поверхневого гартування СВЧ відзначено легке впровадження в автоматизовані лінії та точний контроль температур, що забезпечує стабільну якість виробів. Локальний нагрів мінімізує деформації та знижує рівень браку.

Запропонований комбінований підхід, який поєднує хіміко-термічну обробку з поверхневим гартуванням СВЧ, продемонстрував ефективність. Отримані зміцнені шари показали підвищену твердість і кращі механічні властивості порівняно з традиційними методами. Крім того, нова технологія дозволила значно скоротити час виконання операцій у порівнянні зі стандартними методами. Завдяки цьому зниження тривалості виробничого циклу забезпечує підвищення продуктивності підприємства, зменшення енергетичних витрат та спрощення технологічного процесу.

Таким чином, запропонована методика поєднує в собі високу ефективність, оптимізацію ресурсів і покращення якості продукції, що робить її перспективною для широкого застосування у виробництві шестерень.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hjelmstad K. D. Fundamentals of Structural Mechanics. Springer, 2004. 480 p.
2. Rajan T. V. S., Sharma A. K., Sharma C. P. Heat Treatment: Principles and Techniques. Prentice Hall India Pvt., Limited, 2011.
3. Callister Jr W. D. Materials Science and Engineering - An Introduction (5th ed.). Anti-Corrosion Methods and Materials. 2000. Vol. 47, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1108/acmm.2000.12847aae.001> (date of access: 14.12.2024).
4. Verdeja González J. I., Fernández-González D., Verdeja González L. F. Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steel. Cham : Springer International Publishing, 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05702-1> (date of access: 14.12.2024).
5. Edenhofer B., Joritz D., Rink M., Voges K. Carburizing of steels / in “Thermochemical Surface Engineering of Steels”. — Elsevier Ltd., 2015. P. 485–553.
6. George K. Steels: Heat treatment and processing principles. Materials Park, Ohio : ASM International, 1989. 497 p.
7. Bryson W. E. Making Metal. Heat Treatment. München, 2015. P. 24–25. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569904862.006> (date of access: 14.12.2024).
8. Steel heat treatment handbook / ed. by T. G. E, H. M. A. H. New York : Marcel Dekker, 1997. 1192 p.
9. 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.
10. Sisson R. D. Heat Treatment. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. 2001. P. 3736–3741. URL: <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/00666-5> (date of access: 14.12.2024).

11. Lee S.-J., Matlock D. K., Van Tyne C. J. An Empirical Model for Carbon Diffusion in Austenite Incorporating Alloying Element Effects // ISIJ International. 2011. Vol. 51. P. 1903–1911.
12. American Society for Metals. Principles of heat treatment. Cleveland : The Society, 1953. 303 p.
13. 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: 05.12.2024).
- 14 Gulkov Y. V., Turysheva A. V., Vinogradova I. V. Producing Steels with Special Properties Using a Jet Heat Treatment System. Key Engineering Materials. 2020. Vol. 854. P. 30–36. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.854.30> (date of access: 14.12.2024).
15. Astm. 1993 Annual Book of Astm Standards: Section 1 : Iron and Steel Products : Volume 01.06 : Coated Steel Products/Pcn No. : 01-010693-02. American Society for Testing & Materials, 1993. 590 p.
16. ASM materials engineering dictionary / ed. by J. R. Davis & Associates. ASM International, 1992. 555 p.
17. ДБН В.2.5-28-2006. Природнє та штучне освітлення. [Дійсн. від 15.05.06]. К.: Мінбуд, 1977. 96 с.
18. REZA ABBASCHIAN & ROBERT E. REED-HILL. Physical Metallurgy Principles [International Edition]. CENGAGE INDIA, 2008.
19. Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics / F. P. Beer et al. 8th ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2006. 1326 p.
20. Kraige L. G., Meriam J. L. Engineering Mechanics: Dynamics (Engineering Mechanics, Dynamics). Wiley, 2003. 736 p.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Хімічний склад сплаву 18ХГТ [18]

Хімічний елемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu
Вміст, мас. %	0,15–0,21	0,17–0,37	0,8–1,1	≤0,3	≤0,035	≤0,035	0,8–1,1	0,02–0,05	≤0,3

Таблиця А.2 – Твердість сплаву 18ХГТ

Режим термічної обробки	Глибина зміцненого шару	Твердість, HRC
		Поверхні
Цементация (930–940 °С, 9–10 год); гартування (840–850 °С, масло ≤100 °С); відпуск (170–180 °С)."	0,9–1,3 мм	55–61

ДОДАТОК Б

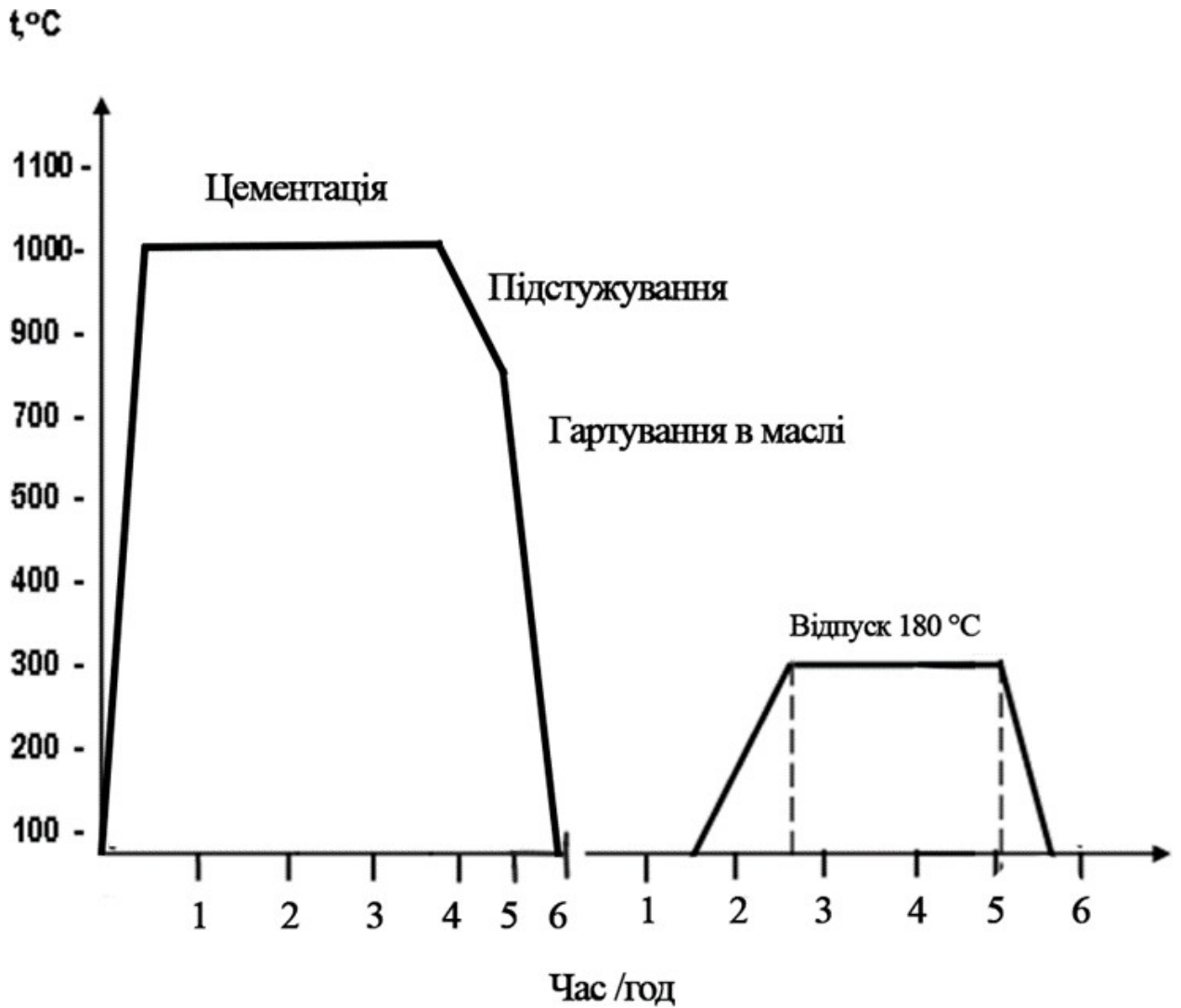


Рисунок Б.1 – Графік нової технології термічної обробки з використанням СВЧ нагріву шестерень зі сталі 18ХГТ