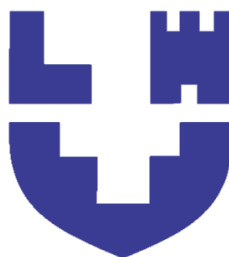


Міністерство освіти і науки України



ТЕРМІЧНА ОБРОБКА

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньо-професійних програм "Матеріалознавство"
"Індустріальний інжиніринг"
галузі знань G "Інженерія, виробництво та будівництво"
спеціальності G8 "Матеріалознавство"
денної та заочної форм навчання

ЛУЦЬК 2025

УДК 621.783(07)
T35

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н.П. Поліщук

Рекомендовано до видання вченою радою факультету митної справи, матеріалів

та технологій ЛНТУ, протокол № ___ від « ___ » _____ 2025 року.

Голова вченої ради факультету ММТ _____ В.В. Ткачук

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри матеріалознавства ЛНТУ, протокол № ___ від « ___ » _____ 2025 року.

Завідувач кафедри матеріалознавства ЛНТУ _____ Н.Ю. Імбірович

Укладачі: _____ Н.П. Зайчук, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

_____ Н.Ю. Імбірович, доктор технічних наук, професор кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

Відповідальний

за випуск: _____ Н.Ю. Імбірович, ,
завідувач кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

Рецензент: _____ В.П. Кашицький, кандидат технічних наук,
професор кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

Відповідальний за випуск: _____ Н. Ю. Імбірович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

Термічна обробка: методичні вказівки до виконання самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук, Н.Ю. Імбірович – Луцьк: ЛНТУ, 2025. – 42 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Термічна обробка». Призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності G8 Матеріалознавство денної та заочної форм навчання. Містить теоретичний матеріал відповідно до тем передбачених робочою програмою, питання до самоконтролю, додаткові самостійні завдання та перелік рекомендованої літератури.

ВСТУП

Дисципліна «Термічна обробка» є однією з базових фахових **складових** підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти технічних спеціальностей у галузі матеріалознавства та інженерії. Вона формує у студентів системне уявлення про взаємозв'язок між хімічним складом, структурним станом і експлуатаційними властивостями металів і сплавів, а також про можливості керування цими властивостями шляхом термічної та термомеханічної обробки.

Самостійна робота є невід'ємною складовою освітнього процесу з даної дисципліни та спрямована на поглиблення теоретичних знань, закріплення лекційного матеріалу й формування навичок інженерного аналізу технологічних процесів термічної обробки. У процесі виконання самостійної роботи здобувачі освіти опановують основні поняття та закономірності фазових і структурних перетворень у сталях і сплавах, вивчають вплив режимів нагрівання, витримки та охолодження на формування мікроструктури й механічних властивостей матеріалів, а також аналізують типові технологічні схеми термічної обробки, що застосовуються в сучасному машинобудуванні, авіаційній і енергетичній галузях.

Методичні вказівки розроблені з метою забезпечення єдиного підходу до організації самостійної роботи студентів і містять перелік тем, рекомендовані джерела літератури, питання для самоконтролю та орієнтовні напрями опрацювання навчального матеріалу. Виконання запропонованих завдань сприятиме розвитку аналітичного мислення, уміння працювати з науково-технічною літературою, а також підготовці студентів до виконання практичних і лабораторних робіт та подальшого вивчення спеціальних дисциплін.

Тема 1. Фазові перетворення в твердому стані при нагріванні та охолодженні. Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту

Фазові перетворення в твердому стані є фундаментальною основою термічної обробки сталей і визначають формування їх мікроструктури та комплексу механічних і експлуатаційних властивостей. На відміну від процесів плавлення та кристалізації, фазові перетворення в твердому стані відбуваються за участю дифузії атомів або шляхом кооперативних бездифузійних механізмів, що зумовлює різну швидкість і характер структурних змін.

Під час нагрівання сталей до температур аустенізації відбувається перетворення ферито-цементитної суміші у фазу γ -заліза (аустеніт). Цей процес супроводжується розчиненням цементиту, перерозподілом вуглецю та легуючих елементів і вирівнюванням хімічного складу. Повнота та однорідність аустеніту істотно впливають на подальші перетворення при охолодженні та кінцеві властивості матеріалу.

При охолодженні аустеніту можливі різні типи фазових перетворень. За повільного охолодження реалізуються дифузійні механізми з утворенням рівноважних або близьких до рівноважних структур – фериту та перліту. За проміжних швидкостей охолодження формується бейніт, який поєднує ознаки дифузійних і бездифузійних перетворень. При швидкому охолодженні (гартуванні) відбувається бездифузійне мартенситне перетворення, що супроводжується значним зростанням твердості та внутрішніх напружень.

Кінетика ізотермічного розпаду аустеніту описується С-подібною діаграмою, яка відображає залежність часу початку та завершення фазових перетворень від температури. Форма цієї діаграми зумовлена конкуренцією між термодинамічною рушійною силою перетворення та дифузійною рухливістю атомів. Мінімум часу перетворення відповідає області найбільш інтенсивного зародження і росту нових фаз.

С-діаграми є базовим інструментом для аналізу прогартуваності сталей, вибору режимів ізотермічної обробки та пояснення впливу легування на стабільність аустеніту. Легуючі елементи, як правило, зміщують криві перетворення вправо, уповільнюючи дифузійні процеси та розширюючи область існування аустеніту.

Фазові перетворення в твердому стані визначають структурний стан і властивості сталей після термічної обробки. Нагрівання забезпечує формування аустеніту як вихідної фази для подальших перетворень. Охолодження може відбуватися за дифузійним або бездифузійним механізмом залежно від швидкості. «С»-діаграма є графічним відображенням кінетики ізотермічного розпаду аустеніту та основою для аналізу технологічних режимів. Легування та хімічний склад істотно впливають на положення і форму кривих перетворення.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає принципова відмінність фазових перетворень у твердому та рідкому станах?

2. Які структурні зміни відбуваються під час аустенізації сталі?
3. Чим відрізняються дифузійні та бездифузійні перетворення аустеніту?
4. Яку інформацію дозволяє отримати «С»-діаграма та як вона використовується при виборі режимів термічної обробки?
5. Які типи фазових перетворень можливі в сталях при охолодженні з аустенітного стану?
6. Як формується «С»-діаграма і які фактори впливають на її форму?
7. У чому відмінність між дифузійними та бездифузійними перетвореннями?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

На основі літературних даних побудувати схематичну «С»-діаграму для доевтектоїдної вуглецевої сталі та пояснити можливі структурні стани при різних температурах ізотермічної витримки.

Тема 2. Номограма для визначення температури гартування

Діаграма Блантера є одним із різновидів кінетичних діаграм, що застосовуються для аналізу фазових перетворень у сталях за умов безперервного охолодження. На відміну від ізотермічних «С»-діаграм, які будуються за сталої температури витримки, діаграма Блантера відображає реальні умови термічної обробки, коли температура металу безперервно знижується з певною швидкістю. Саме тому такі діаграми мають важливе практичне значення для вибору режимів гартування та оцінки прогартуваності сталей.

В основі побудови діаграми Блантера лежить експериментальне визначення структурних перетворень аустеніту при різних швидкостях охолодження. Для кожної швидкості фіксується характер утворених фаз, що дозволяє встановити критичні швидкості охолодження, за яких пригнічується дифузійний розпад аустеніту та забезпечується формування мартенситної структури. Таким чином, діаграма Блантера поєднує температурний і часовий фактори в умовах безперервного теплообміну.

Важливою особливістю діаграми Блантера є можливість визначення повної та часткової прогартуваності сталі. Повна прогартуваність досягається за таких швидкостей охолодження, при яких у всьому об'ємі зразка формується мартенсит, тоді як часткова прогартуваність характеризується співіснуванням мартенситу з продуктами дифузійного перетворення. Ці дані безпосередньо використовуються при виборі охолоджувального середовища – води, масла або полімерних розчинів.

Хімічний склад сталі істотно впливає на вигляд діаграми Блантера. Зі збільшенням вмісту вуглецю та легуючих елементів критична швидкість гартування зменшується, а область стабільності аустеніту розширюється. Це пояснюється уповільненням дифузійних процесів і зростанням термодинамічної стабільності переохолодженого аустеніту. У зв'язку з цим

діаграми Блантера широко застосовують для порівняльної оцінки прогартовуваності вуглецевих і легованих сталей.

Діаграма Блантера описує фазові перетворення аустеніту за умов безперервного охолодження. Вона дозволяє визначати критичні швидкості гартування та оцінювати прогартовуваність сталей. На відміну від ізотермічних діаграм, діаграма Блантера більш точно відображає промислові режими термічної обробки. Хімічний склад і легування суттєво впливають на положення меж фазових перетворень.

Питання для самоконтролю

1. Чим принципово відрізняється діаграма Блантера від «С»-діаграми ізотермічного розпаду аустеніту?
2. Які експериментальні дані використовують для її побудови?
3. Як за допомогою діаграми Блантера визначають критичну швидкість гартування?
4. Яким чином легування впливає на прогартовуваність сталі?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

За довідковими даними порівняти діаграми Блантера для вуглецевої та легованої сталі та пояснити різницю у виборі охолоджувального середовища для їх гартування.

Тема 3. Поняття про термокінетичні діаграми

Термокінетичні діаграми є одним із ключових інструментів металознавства та термічної обробки сталей, оскільки дозволяють описати перебіг фазових перетворень у часі залежно від температури. Вони відображають не лише термодинамічну можливість утворення певних фаз, але й реальну швидкість їх формування, що має вирішальне значення для практики термічної обробки.

Термокінетичні діаграми – це спеціальні графічні залежності, за допомогою яких показують, як змінюється фазовий стан матеріалу (передусім сталі) у процесі охолодження або витримки при різних температурах, і скільки часу потрібно для перетворення однієї мікроструктури на іншу. Інакше кажучи, це діаграми, які описують не рівноважний стан, а динаміку фазових перетворень у часі.

У сталях такі діаграми дозволяють відслідковувати появу перліту, бейніту, мартенситу тощо залежно від того, наскільки швидко і до якої температури сталь охолоджується.

На практиці структурні перетворення під час термічної обробки не відбуваються миттєво. Сам факт охолодження ще не гарантує формування потрібної фази — важливо, чи є достатній час для зародження і росту нової структури.

Термокінетичні діаграми дають можливість відповісти на кілька ключових питань:

- ✓ Коли починається фазове перетворення?
- ✓ Коли воно закінчується?
- ✓ Які структури утворюються при заданому режимі охолодження?
- ✓ Які механічні властивості буде мати матеріал?

Для термічної обробки це критично, тому що від мікроструктури залежать твердість, ударна в'язкість, зносостійкість і міцність сталі.

Важливим елементом термокінетичних діаграм є лінії початку і завершення перетворень, а також температури мартенситного перетворення M_n і M_k . Положення цих ліній визначається хімічним складом сталі, розміром зерна аустеніту та наявністю легуючих елементів. Легування, як правило, уповільнює дифузійні процеси, зміщує криві перетворень у бік більших часів і сприяє утворенню мартенситу за нижчих швидкостей охолодження.

Подібно до діаграм ізотермічного розпаду аустеніту, положення і форма термокінетичних діаграм залежить від температури аустенізації, розміру зерна (чим вища температура і більше зерно, тим більше криві зміщуються вниз і праворуч), вмісту легуючих елементів.

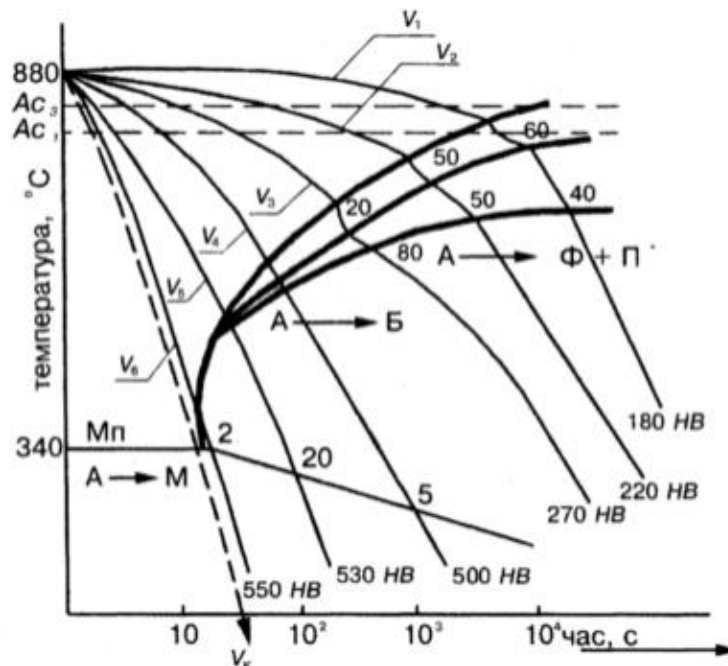


Рисунок 1 – Схема побудови термокінетичної діаграми для сталі з 0,4 % C

Термокінетичні діаграми є одними з найважливіших інструментів при:

- ✓ розробці режимів гартування
- ✓ підборі швидкостей охолодження
- ✓ прогнозуванні твердості та мікроструктури
- ✓ виборі охолоджуючих середовищ (вода, масло, солі, полімери)
- ✓ оцінюванні прогартуваності

Без них неможливо коректно встановити, чи утвориться мартенсит, чи перліт, чи бейніт при конкретних умовах.

Фазові діаграми показують стан рівноваги (що буде при нескінченній витримці). Термокінетичні діаграми показують процес у часі (що буде при

реальному охолодженні). Це принципово різні інструменти і одне інше не замінює.

Термокінетичні діаграми широко застосовуються для аналізу можливості формування бейнітних структур, вибору режимів ізотермічного гартування, а також для пояснення причин виникнення структурної неоднорідності та залишкових напружень. Вони є сполучною ланкою між теоретичними основами фазових перетворень і практичними технологіями термічної обробки.

Термокінетичні діаграми відображають кінетику фазових перетворень у сталях. ТТТ-діаграми характеризують ізотермічний розпад аустеніту, тоді як ССТ-діаграми описують перетворення за безперервного охолодження. Саме ССТ-діаграми мають найбільше практичне значення для промислових режимів термічної обробки. Хімічний склад і легування істотно впливають на положення кривих перетворень і прогартуваність сталі.

Леговані сталі мають інші термокінетичні діаграми, тому що легуючі елементи зміщують “С-криву” вправо, збільшуючи час утворення перліту та бейніту.

Питання для самоконтролю

1. Що називають термокінетичними діаграмами і яке їх призначення?
2. У чому полягає відмінність між ТТТ та ССТ-діаграмами?
3. Яку інформацію дають лінії $M_{\text{п}}$ і $M_{\text{к}}$?
4. Як впливають легуючі елементи на форму термокінетичних діаграм?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Порівняти термокінетичні діаграми для доевтектоїдної та евтектоїдної сталі й пояснити можливі відмінності у структурі після гартування та нормалізації.

Тема 4. Перетворення ферито-цементитної суміші в аустеніт при нагріві. Низький і високий відпуск загартованих сталей

Перетворення ферито-цементитної суміші в аустеніт при нагріванні є одним із ключових етапів термічної обробки сталей, оскільки саме на цій стадії формується вихідний структурний стан, від якого залежать подальші фазові перетворення та експлуатаційні властивості матеріалу. Аустенізація передбачає нагрівання сталі до температур, що перевищують критичні точки фазових перетворень, які позначаються як $A_{\text{с1}}$, $A_{\text{с3}}$ або $A_{\text{сm}}$ залежно від вмісту вуглецю.

У доевтектоїдних сталях нагрівання вище температури $A_{\text{с1}}$ призводить до зародження аустеніту на межах фериту й цементиту та в колоніях перліту. Подальше підвищення температури до $A_{\text{с3}}$ забезпечує повне перетворення ферито-цементитної суміші в однорідний аустеніт. У заевтектоїдних сталях аустенізація відбувається в інтервалі між $A_{\text{с1}}$ та $A_{\text{сm}}$, при цьому частина цементиту може зберігатися для запобігання росту зерна аустеніту.

Процес формування аустеніту супроводжується розчиненням цементиту та дифузійним перерозподілом вуглецю. Ступінь розчинення карбідів і рівномірність розподілу вуглецю істотно впливають на прогартовуваність сталі, стабільність аустеніту та кінетику мартенситного перетворення. Надмірно високі температури аустенізації можуть призводити до укрупнення зерна аустеніту, що негативно позначається на ударній в'язкості загартованої сталі.

Після гартування структура сталі представлена переважно мартенситом, який є метастабільною фазою з високою твердістю, значною щільністю дислокацій і підвищеними внутрішніми напруженнями. Такий структурний стан забезпечує високі показники твердості та міцності, але супроводжується крихкістю. Для зниження напружень і регулювання комплексу механічних властивостей застосовують відпуск.

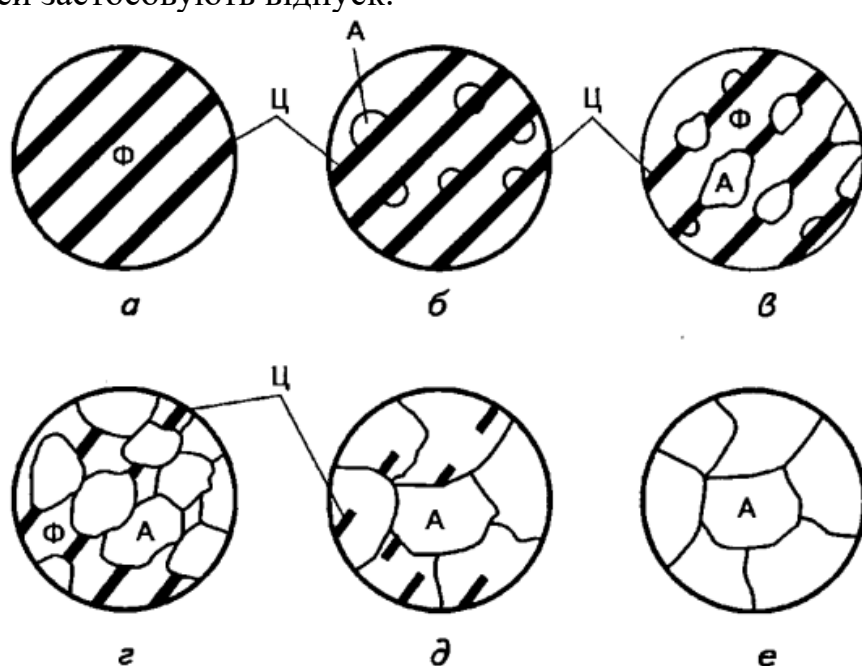


Рисунок 1 – Схема утворення зерен аустеніту під час перетворення перліту при нагріванні

Відпуск загартованих сталей полягає в нагріванні до температур, нижчих за A_{c1} , з наступним охолодженням. Залежно від температури розрізняють низький, середній і високий відпуск. Низький відпуск, що проводиться в інтервалі 150...250 °С, спрямований на зменшення внутрішніх напружень при збереженні високої твердості. У структурі формується відпущений мартенсит з виділенням дрібнодисперсних карбідів, що характерно для інструментальних сталей та зносостійких деталей. Із мартенситу виділяється частина надлишкового вуглецю з утворенням дрібних карбідних частинок. Але оскільки швидкість дифузії тут ще мала, деяка частина вуглецю в мартенситі залишається. Утворюється маловуглецевий мартенсит і дуже дрібні карбідні частинки. Структуру називають відпущений мартенсит.

В результаті низького відпуску зменшуються внутрішні напруження, дещо збільшуються в'язкість і пластичність, твердість майже не знижується.

Деталі можуть працювати в умовах, де необхідна висока твердість і зносостійкість.

Низький відпуск використовують для різального інструменту, деталі підшипників кочення.

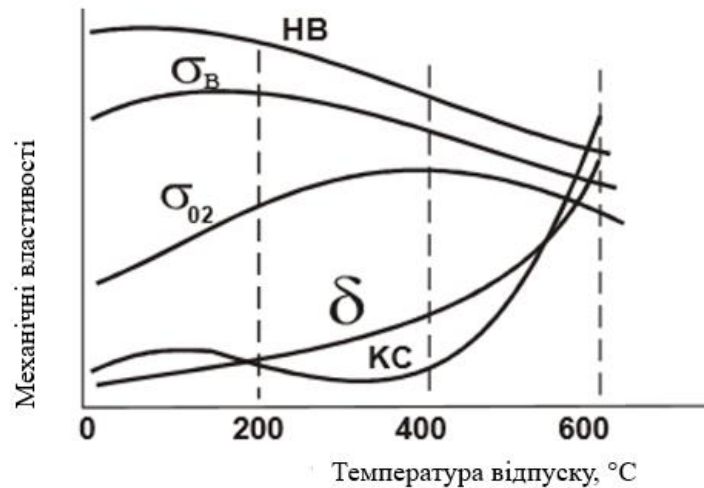


Рисунок 2 – зміна властивостей після відпуску

В інтервалі температур 500-650 °C швидкість дифузійних процесів дещо зростає, що при розпаді мартенситу утворюється ферито-цементитна суміш з більш крупними, сферичними формами, зернами цементиту. Такий відпуск називають високим; структура, що отримується – сорбіт відпуску.

Високий відпуск супроводжується глибокою перебудовою мартенситної структури у результаті значно зростає пластичність і ударна в'язкість, зменшуються залишкові напруження, а внутрішні знімаються майже повністю. Твердість і міцність знижуються, але все ж залишаються достатньо високими, а структура стає більш стабільною. Такий режим широко застосовується для конструкційних сталей, деталей машин і відповідальних елементів, що працюють під дією змінних і ударних навантажень.

Гартування з високим відпуском називається термічним покращенням сталі. Такій обробці піддають деталі машин, що працюють в умовах знакозмінних і ударних навантажень: вали, важелі, шестерні, тощо.

Час витримки при низькому відпуску складає від 1 до 12...15 годин, оскільки при таких низьких температурах дифузія вуглецю відбувається повільно. Для середнього і високого зазвичай достатньо 1...2 години.

Відпуск є обов'язковою стадією після гартування і використовується для регулювання співвідношення між твердістю, міцністю та в'язкістю. Низький відпуск зберігає високу твердість, тоді як високий відпуск забезпечує підвищення пластичності й ударної в'язкості.

Питання для самоконтролю

1. Які структурні процеси відбуваються під час аустенізації доєвтектоїдних і заєвтектоїдних сталей?

2. Яке фізичне значення критичних температур A_{c1} , A_{c3} та A_{cm} ?
3. Чому надмірне підвищення температури аустенізації є небажаним?
4. У чому полягає принципова різниця між низьким і високим відпуском загартованих сталей?
5. Як змінюються механічні властивості сталі залежно від температури відпуску?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Обґрунтувати вибір температури аустенізації та режиму відпуску для середньовуглецевої конструкційної сталі, що експлуатується в умовах змінних механічних навантажень. Пояснити очікувані зміни структури та властивостей.

Тема 5. Графітизація чавунів

Графітизація є одним із визначальних процесів формування структури та властивостей чавунів і полягає у виділенні вуглецю з твердого розчину або карбідної фази у вигляді вільного графіту. На відміну від сталей, у яких вуглець переважно перебуває у зв'язаному стані у формі цементиту, в чавунах можливе утворення різних морфологічних форм графіту, що істотно впливає на механічні, трибологічні та експлуатаційні характеристики матеріалу.

Процес графітизації може відбуватися як під час кристалізації з рідкого стану, так і в твердому стані під час термічної обробки. У першому випадку формується первинний графіт, у другому – вторинний, який утворюється внаслідок розпаду цементиту. Саме вторинна графітизація має ключове значення для отримання ковкого та високоміцного чавуну.

З термодинамічної точки зору графітизація є рівноважним процесом для системи залізо-вуглець, однак її реалізація суттєво залежить від кінетичних факторів. За швидкого охолодження переважає утворення метастабільної фази цементиту, тоді як за повільного охолодження або тривалої витримки створюються умови для виділення графіту. Таким чином, швидкість охолодження є одним із основних технологічних чинників, що визначають тип чавуну.

Істотний вплив на процес графітизації має хімічний склад. Кремній є основним графітизуючим елементом, який сприяє розпаду цементиту та стабілізації графіту. Навпаки, елементи, такі як марганець, хром і молібден, є карбідоутворювачами та гальмують графітизацію. Співвідношення між цими елементами дозволяє цілеспрямовано керувати структурою чавуну.

Морфологія графіту визначає механічні властивості матеріалу. Пластинчастий графіт, характерний для сірого чавуну, зумовлює низьку міцність на розтяг, але забезпечує добрі антифрикційні властивості та оброблюваність різанням. Кулястий графіт у високоміцному чавуні знижує концентрацію напружень і забезпечує поєднання високої міцності, пластичності та в'язкості. Пластинчастий (розетковий) графіт є характерним

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Пояснити, яким чином зміна режиму графітизаційного відпалу впливає на форму графіту та механічні властивості ковкого чавуну. Навести приклад деталей, для яких доцільне застосування такого матеріалу.

Тема 6. Види термічної обробки. Нагрівання металу. Контрольовані середовища

Термічна обробка металів і сплавів являє собою сукупність технологічних операцій нагрівання, витримки та охолодження, метою яких є зміна мікроструктури матеріалу і, відповідно, регулювання його механічних, фізичних та експлуатаційних властивостей без зміни хімічного складу. Види термічної обробки класифікують за призначенням, температурним рівнем, характером фазових перетворень і кінцевим структурним станом.

ТО піддають зливки, відливки, напівфабрикати, зварні з'єднання, деталі машин, інструменти – від найдрібніших деталей до крупних елементів металургійного, тракторного та енергетичного обладнання. ТО піддають до 10 % від загальної виплавки сталі в країні, а в машинобудуванні ТО піддають до 50 % сталених виробів і заготовок.

Розрізняють попередню ТО і остаточну ТО. Попередня ТО застосовується для підготовки структури і властивостей матеріалів для наступних технологічних операцій обробки тиском, різанням і т.п. Остаточна ТО формує властивості готового виробу в залежності від умов його експлуатації.

Основні види ТО в залежності від режимів, призначення і одержуваної структури такі: відпал, загартування, відпускання і старіння. Кожний з цих видів має кілька різновидів.

Відпал – ТО, в результаті якої метали чи сплави набувають структуру, близьку до рівноважної, при цьому знижується міцність, підвищується пластичність і знімаються залишкові напруження.

Гартування – ТО, в результаті якої в сплавах утворюється нерівноважна структура, що можливо тільки тоді, коли для сплавів у твердому стані має місце: змінна розчинність, поліморфні перетворення твердих розчинів, розпад твердих розчинів за евтектоїдною реакцією та інше.

Відпуск і старіння – ТО, в результаті якої в попередньо загартованих сплавах відбуваються фазові перетворення, що наближають їх структуру до рівноважної.

Відпал застосовується для зниження твердості, усунення наклепу та внутрішніх напружень, а також для формування рівноважної або близької до рівноважної структури. Нормалізація передбачає нагрівання сталі до аустенітного стану з подальшим охолодженням на повітрі і забезпечує дрібнозернисту перліто-феритну структуру з підвищеною міцністю порівняно з відпалом. Гартування спрямоване на отримання мартенситної структури шляхом швидкого охолодження з аустенітного стану, а відпуск

використовується для стабілізації структури та регулювання комплексу властивостей після гартування.

Процес нагрівання є критично важливим етапом термічної обробки, оскільки визначає рівномірність температурного поля, повноту фазових перетворень і величину термічних напружень. Швидкість нагрівання повинна забезпечувати достатній час для протікання дифузійних процесів без виникнення значних температурних градієнтів, які можуть призводити до короблення або утворення тріщин. Для масивних або складнопрофільних деталей застосовують ступінчасте або попереднє нагрівання.



Рисунок 1 – способи нагрівання металу під термічну обробку

Тип нагрівального пристрою впливає на коефіцієнт тепловіддачі, який визначає швидкість нагрівання.

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від:

- ✓ нагрівального середовища;
- ✓ розмірів деталі;
- ✓ кінцевої температури.

Швидкість нагрівання залежить від:

- ✓ хімічного складу;
- ✓ структури сталі;
- ✓ форми деталей;
- ✓ температурного режиму нагрівання.

Чим менше легована сталь, більш однорідна її структура, менш складна форма деталі та більш рівномірне підведення тепла до неї тим швидше відбувається нагрівання. Швидкість нагрівання сталей під гартування в електричних повітряних печах дорівнює приблизно 1 хв. на 1 мм перерізу.

Вибір температури нагрівання визначається хімічним складом сталі та видом термічної обробки. Перевищення оптимальної температури може призвести до росту зерна аустеніту, окиснення поверхні та зниження ударної

в'язкості, тоді як недостатній нагрів викликає неповноту фазових перетворень і структурну неоднорідність.

Час витримки за температури нагрівання потрібен для завершення структурних перетворень по всьому об'єму нагрівного металу. Час витримки становить близько $1/5$ від часу нагрівання. За цей час серцевина деталі нагрівається до потрібної температури.

Суттєвий вплив на якість термічної обробки має газове середовище печі. Під час нагрівання в повітряній атмосфері можливі окиснення та знеуглецювання поверхневих шарів сталі, що погіршує зносостійкість і втомну міцність виробів. Для запобігання цим явищам застосовують контрольовані атмосфери, склад яких дозволяє підтримувати заданий вуглецевий потенціал та обмежувати взаємодію металу з киснем.

Контрольовані середовища можуть бути нейтральними, відновними або активними. Нейтральні атмосфери зменшують окиснення, відновні – запобігають утворенню окалини, а активні використовують у процесах хіміко-термічної обробки. У промисловій практиці також широко застосовують вакуумні печі, які забезпечують найвищу чистоту поверхні та точність термічної обробки, особливо для легованих і інструментальних сталей.

У процесі нагрівання сталі й особливо в електричних та полумєневих печах, відбувається окиснення або знеуглецювання, які зменшують зносостійкість, твердість та інші механічні властивості сталей. Для запобігання цього недоліку в робоче середовище печі вводять захисну (контрольну) атмосферу:

✓ ендотермічна атмосфера, утворена частковим спаленням природного газу з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 0,25$ за наявності каталізатора, яка усуває окиснення та знеуглецювання в сталях з різним вмістом вуглецю;

✓ екзотермічна атмосфера, яку отримують під час часткового спалення природного газу, якщо $\alpha = 0,6$, без очищення та сушіння або навпаки з очищенням та сушінням;

✓ екзотермічна атмосфера, що утворена за тих же умов, але коли $\alpha = 0,9$.

Цю атмосферу використовують при відпалі сталі.

Правильний вибір виду термічної обробки, режиму нагрівання та контрольованого середовища є необхідною умовою отримання стабільних властивостей і високої якості металевих виробів. Нагрівання визначає повноту фазових перетворень і рівень термічних напружень. Контрольовані атмосфери використовують для запобігання окисненню та знеуглецювання поверхні і забезпечення стабільної якості термічної обробки.

Питання для самоконтролю

1. Які основні види термічної обробки сталей і яке їх призначення?
2. Чому процес нагрівання є критичним етапом термічної обробки?
3. Як швидкість і температура нагрівання впливають на структуру сталі?
4. Які недоліки має нагрівання в повітряній атмосфері?
5. У чому полягає роль контрольованих середовищ у термічній обробці?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Обґрунтувати вибір виду термічної обробки, температури нагрівання та газового середовища для сталеві деталі машинобудівного призначення з підвищеними вимогами до зносостійкості поверхні.

Тема 7. Захисні середовища. Вуглецевий потенціал

Застосування захисних середовищ під час термічної та хіміко-термічної обробки металів і сплавів є необхідною умовою забезпечення стабільної якості поверхні виробів і відтворюваності їх експлуатаційних властивостей. У процесах нагрівання сталей до аустенітного стану в атмосфері повітря відбувається інтенсивне окиснення та знеуглецювання поверхні, що призводить до формування окалини, зміни хімічного складу приповерхневих шарів і, як наслідок, погіршення механічних та трибологічних характеристик деталей. На практиці широко застосовують спеціальні захисні атмосфери, які дозволяють мінімізувати або повністю усунути небажані фізико-хімічні взаємодії між металом і газовим середовищем печі.

Захисним середовищем називають газу або газоподібну атмосферу, склад якої підбрано таким чином, щоб запобігти окисненню, знеуглецюванню або, за необхідності, забезпечити контрольоване насичення поверхні металу вуглецем чи іншими елементами. До найпоширеніших захисних середовищ належать ендотермічні та екзотермічні гази, азот, водень, суміші на основі азоту з контрольованим вмістом активних компонентів, а також вакуум. Вибір конкретного середовища визначається маркою сталі, температурою обробки, тривалістю процесу та вимогами до стану поверхні готового виробу.

Особливе місце серед захисних атмосфер займають газові середовища з регульованим вуглецевим потенціалом. Вуглецевий потенціал газового середовища є термодинамічною характеристикою, що визначає здатність атмосфери віддавати або поглинати вуглець у взаємодії зі сталлю за заданих температурних умов. Іншими словами, вуглецевий потенціал показує, до якої масової частки вуглецю в аустеніті прагне система «сталь – газове середовище» за умов рівноваги.

Якщо вуглецевий потенціал атмосфери нижчий за вміст вуглецю в сталі, відбувається знеуглецювання поверхні, що супроводжується зменшенням твердості та зносостійкості приповерхневого шару після термічної обробки. У протилежному випадку, коли вуглецевий потенціал середовища перевищує вміст вуглецю в сталі, має місце науглецювання поверхні. Цей принцип покладено в основу процесів цементації, нітроцементації та інших різновидів хіміко-термічної обробки.

Формування та підтримання заданого вуглецевого потенціалу здійснюється шляхом контролю складу газової атмосфери, зокрема співвідношення таких компонентів, як оксид вуглецю, діоксид вуглецю, водень, метан та водяна пара. Основними хімічними реакціями, що визначають

вуглецевий потенціал, є реакції розкладу оксиду вуглецю та взаємодії вуглеводнів з поверхнею металу. Термодинамічна рівновага цих реакцій суттєво залежить від температури, тому контроль вуглецевого потенціалу завжди здійснюється з урахуванням температурного режиму печі.

У промислових умовах для оцінювання та регулювання вуглецевого потенціалу використовують різні методи контролю, серед яких найбільш поширеними є кисневі зонди, інфрачервоні газоаналізатори та методи розрахунку на основі відомого складу газової суміші. Сучасні автоматизовані системи керування термічними печами дозволяють у реальному часі підтримувати заданий вуглецевий потенціал, що є особливо важливим для серійного та масового виробництва відповідальних деталей машин.

Застосування захисних середовищ із контрольованим вуглецевим потенціалом має вирішальне значення під час термічної обробки конструкційних, інструментальних і легованих сталей. Для конструкційних сталей це дозволяє зберегти номінальний хімічний склад поверхні та забезпечити рівномірність механічних властивостей по перерізу деталі. Для інструментальних сталей контроль вуглецевого потенціалу є критичним з огляду на їх підвищений вміст вуглецю та чутливість до зневуглецювання, яке може різко знизити твердість і зносостійкість ріжучих кромки. У випадку легованих сталей додатково враховують вплив легувальних елементів на кінетику дифузії вуглецю та стабільність карбідних фаз.

Таким чином, захисні середовища та вуглецевий потенціал є ключовими поняттями сучасної теорії та практики термічної обробки. Їх правильний вибір і контроль забезпечують не лише збереження якості поверхні виробів, але й можливість цілеспрямованого формування заданої мікроструктури та комплексу експлуатаційних властивостей.

Питання для самоконтролю

1. Яке призначення захисних середовищ у процесах термічної та хіміко-термічної обробки сталей?
2. Які основні негативні явища відбуваються під час нагрівання сталі в повітряній атмосфері?
3. Що розуміють під захисним газовим середовищем і які вимоги до нього висуваються під час термічної обробки?
4. Назвіть основні види захисних атмосфер, що застосовуються в термічних печах, та охарактеризуйте їх особливості.
5. Яким чином співвідношення між вуглецевим потенціалом атмосфери та вмістом вуглецю в сталі впливає на процеси зневуглецювання і навуглецювання?
6. Чому контроль вуглецевого потенціалу є особливо важливим під час термічної обробки інструментальних та легованих сталей?
7. Які можливі наслідки порушення режиму захисної атмосфери для експлуатаційних властивостей деталей?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Проаналізувати вплив вуглецевого потенціалу захисної атмосфери на стан поверхні сталеві деталі під час нагрівання під загартування.

Для виконання завдання необхідно:

- обрати марку конструкційної або інструментальної сталі;
- визначити, які структурні зміни та зміни властивостей можуть відбуватися в приповерхневому шарі за умов заниженого та завищеного вуглецевого потенціалу;
- пояснити, як контроль складу газової атмосфери дозволяє запобігти знеуглецюванню або забезпечити кероване науглецювання;
- зробити короткий висновок щодо ролі захисних середовищ у забезпеченні якості термічної обробки вибраної сталі.

Обсяг виконаного завдання – 1...2 сторінки формату А4 з використанням навчальної та науково-технічної літератури.

Тема 8. Параметри термічної обробки. Охолоджувальні середовища

Термічна обробка металів і сплавів є сукупністю технологічних процесів, що включають нагрівання, витримку та охолодження з метою формування заданої мікроструктури й комплексу механічних та експлуатаційних властивостей. Кінцевий результат термічної обробки визначається не лише хімічним складом матеріалу, але й сукупністю параметрів процесу, кожен з яких відіграє важливу роль у перебігу фазових і структурних перетворень.

До основних параметрів термічної обробки належать температура нагрівання, тривалість витримки та режим охолодження. Температура нагрівання визначає фазовий стан металу, розчинність карбідних і інтерметалідних фаз, а також інтенсивність дифузійних процесів. Для сталей температура нагрівання зазвичай вибирається з урахуванням критичних точок, що відповідають переходу структури у аустенітний стан. Перевищення оптимальної температури може призводити до надмірного росту зерна аустеніту, що негативно позначається на ударній в'язкості та пластичності, тоді як недостатній нагрів не забезпечує повноти фазових перетворень.

Тривалість витримки при заданій температурі повинна бути достатньою для вирівнювання температури по перерізу деталі та завершення необхідних структурних змін. Занадто коротка витримка може спричинити неоднорідність структури, тоді як надмірна витримка сприяє росту зерна та підвищенню енергетичних витрат без покращення властивостей матеріалу. Таким чином, вибір температури та часу витримки завжди є компромісом між досягненням необхідного структурного стану та запобіганням небажаним ефектам.

Вирішальним параметром термічної обробки, особливо під час загартування, є режим охолодження, який визначає швидкість проходження фазових перетворень і тип сформованої мікроструктури. Швидкість охолодження повинна перевищувати критичну швидкість для даної марки сталі, щоб запобігти дифузійному розпаду аустеніту та забезпечити утворення

мартенситу. Критична швидкість охолодження залежить від вмісту вуглецю, наявності легувальних елементів і розміру зерна аустеніту.

Охолоджувальні середовища є технологічним інструментом керування швидкістю відведення теплоти від загартовуваної деталі.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика охолоджувальних середовищ у термічній обробці сталей

Охолоджувальне середовище	Характерна швидкість охолодження	Типова сформована структура	Основні властивості та особливості
Вода (20...25 °С)	Дуже висока	Мартенсит, можливий залишковий аустеніт	Максимальна твердість і зносостійкість; високий рівень внутрішніх напружень; підвищений ризик утворення тріщин і деформацій
Солоні розчини	Надзвичайно висока	Мартенсит	Забезпечує більш інтенсивне охолодження порівняно з водою; застосовується обмежено через значні напруження та корозійну активність
Масло (мінеральне)	Середня	Мартенсит або мартенсито-бейнітна	Знижений ризик тріщиноутворення; стабільні механічні властивості; дещо менша твердість порівняно з водняним гартуванням
Водно-полімерні розчини	Регульована (від середньої до високої)	Мартенсит або мартенсито-трооститна	Керована інтенсивність охолодження; хороша відтворюваність результатів; зменшені деформації
Повітря (спокійне)	Низька	Перліт або сорбіт	Помірна міцність і пластичність; відсутність різких термічних напружень; застосовується для нормалізації
Повітря (з циркуляцією)	Низька-середня	Сорбіт, бейніт	Збалансовані механічні властивості; зменшені напруження; використовується для легованих сталей
Газові середовища	Низька	Перлітна або бейнітна	Висока однорідність структури; мінімальні деформації; контроль атмосфери
Соляні ванни	Середня (ізотермічна)	Бейніт або троостит	Рівномірна структура; знижені напруження; можливість керування фазовими перетвореннями

Найбільш інтенсивним охолоджувальним середовищем є вода, яка забезпечує високу швидкість охолодження, але водночас створює значні термічні напруження та підвищує ризик утворення тріщин і деформацій. Тому

охолодження у воді застосовують переважно для вуглецевих сталей простої форми або у випадках, коли необхідно досягти максимальної твердості.

Масло як охолоджувальне середовище характеризується меншою інтенсивністю тепловідведення порівняно з водою, що дозволяє знизити рівень внутрішніх напружень і ймовірність утворення тріщин. Масляне гартування широко застосовується для легованих сталей, які мають нижчу критичну швидкість охолодження і більш стабільний аустеніт. Температура масла та його склад істотно впливають на кінетику охолодження і повинні контролюватися в процесі термічної обробки.

Окрім традиційних середовищ, у сучасній практиці широко використовують водно-полімерні розчини, які дозволяють регулювати інтенсивність охолодження в широких межах шляхом зміни концентрації полімеру. Такі середовища поєднують переваги води та масла й забезпечують більш стабільні та відтворювані результати. Охолодження на повітрі або в газових середовищах застосовується для сталей з високою прогартовуваністю, а також у процесах нормалізації та ізотермічної обробки.

Вибір охолоджувального середовища залежить не лише від марки сталі, але й від геометрії деталі, її маси та вимог до експлуатаційних властивостей. Деталі складної форми або з різною товщиною перерізів є особливо чутливими до нерівномірного охолодження, що може призводити до викривлень і появи залишкових напружень. У таких випадках застосовують ступінчасте або ізотермічне охолодження, а також комбіновані режими загартування.

Таким чином, параметри термічної обробки та охолоджувальні середовища утворюють єдину керовану систему, від оптимального налаштування якої залежить якість і надійність металевих виробів. Розуміння взаємозв'язку між температурним режимом, тривалістю витримки та умовами охолодження є необхідною передумовою для раціонального вибору режимів термічної обробки в інженерній практиці та подальшого вдосконалення технологічних процесів.

Питання для самоконтролю

1. Які основні параметри термічної обробки визначають перебіг структурних перетворень у сталях і сплавах?

2. Як температура нагрівання впливає на фазовий склад і розмір зерна металу?

3. Яке значення має тривалість витримки при заданій температурі термічної обробки?

4. Яким чином швидкість охолодження впливає на формування структури та механічних властивостей сталі?

5. Що розуміють під критичною швидкістю охолодження та від чого вона залежить?

6. Які основні охолоджувальні середовища застосовуються в процесах загартування та охарактеризуйте їх особливості.

7. У чому полягають відмінності охолодження у воді, маслі, водно-полімерних розчинах і на повітрі?

8. Як вибір охолоджувального середовища впливає на рівень внутрішніх напружень і схильність деталей до утворення тріщин?

9. Чому для легованих сталей часто застосовують менш інтенсивні охолоджувальні середовища?

10. Яку роль відіграє температура охолоджувального середовища у формуванні кінцевої мікроструктури?

11. Які фактори необхідно враховувати під час вибору режиму охолодження для деталей складної форми або великого перерізу?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Розглянути вплив параметрів термічної обробки та вибору охолоджувального середовища на властивості сталеві деталі після загартування.

Для виконання завдання необхідно:

- обрати конкретну марку сталі (вуглецеву або леговану);
- запропонувати раціональні параметри термічної обробки, включаючи температуру нагрівання, тривалість витримки та спосіб охолодження;
- обґрунтувати вибір охолоджувального середовища з урахуванням хімічного складу сталі та вимог до її механічних властивостей;
- описати можливі наслідки зміни швидкості охолодження для структури, твердості та рівня внутрішніх напружень;
- сформулювати короткий висновок щодо оптимізації режиму термічної обробки для обраного випадку.

Тема 9. Рекристалізаційний відпал

Рекристалізаційний відпал є одним із різновидів термічної обробки металів і сплавів, який застосовується з метою усунення наслідків холодної пластичної деформації та відновлення пластичності матеріалу. У процесі механічної обробки тиском, зокрема прокатки, волочіння, штампування або холодного кування, у металі накопичується значна кількість дефектів кристалічної ґратки, що призводить до наклепу. Наклеп супроводжується зростанням міцності й твердості та одночасним різким зниженням пластичності й ударної в'язкості, що обмежує подальшу деформацію матеріалу без руйнування.

Рекристалізаційний відпал полягає у нагріванні деформованого металу до температури, за якої відбувається утворення та ріст нових, рівноважних зерен з низькою густиною дислокацій. Ці зерна замінюють деформовану волокнисту структуру, що сформувалася внаслідок холодної деформації. У результаті рекристалізації матеріал відновлює вихідну або близьку до неї пластичність, зменшуються внутрішні напруження, а структура набуває більш однорідного характеру.

Процес рекристалізаційного відпалу умовно поділяють на три послідовні стадії: відновлення, рекристалізацію та ріст зерна. На стадії

відновлення відбувається часткове зниження внутрішніх напружень і перегрупування дислокацій без істотної зміни зернистої структури. Основна стадія – рекристалізація – характеризується зародженням нових бездефектних зерен, які швидко зростають за рахунок деформованої матриці. Подальше підвищення температури або збільшення тривалості витримки може призводити до росту зерна, що зазвичай є небажаним явищем, оскільки надмірно крупне зерно погіршує механічні властивості, зокрема ударну в'язкість.

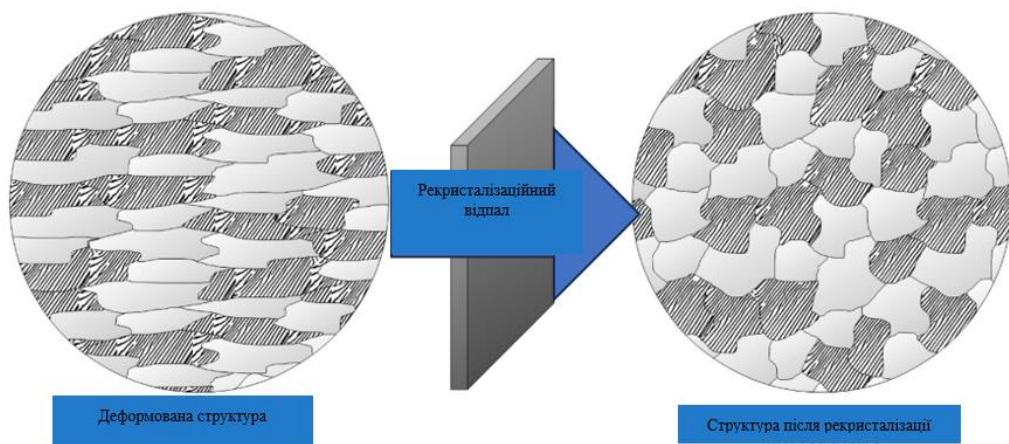


Рисунок 1 – Схема зміни структури після рекристалізаційного відпалу

Температура рекристалізаційного відпалу залежить від хімічного складу металу, ступеня попередньої деформації та початкового розміру зерна. Для низьковуглецевих сталей температура рекристалізації зазвичай становить приблизно 0,3...0,5 від температури плавлення в абсолютних одиницях. Зі збільшенням ступеня холодної деформації температура рекристалізації знижується, оскільки зростає запас накопиченої деформаційної енергії. Легувальні елементи, навпаки, можуть підвищувати температуру рекристалізації за рахунок гальмування руху меж зерен і дислокацій.

Тривалість витримки при температурі рекристалізаційного відпалу повинна забезпечувати повноту процесу рекристалізації по всьому об'єму деталі. Недостатня витримка призводить до часткової рекристалізації та збереження неоднорідної структури, тоді як надмірна витримка сприяє росту зерна і погіршенню механічних характеристик. Тому вибір режиму рекристалізаційного відпалу повинен здійснюватися з урахуванням конкретних умов деформації та вимог до властивостей готового виробу.

Рекристалізаційний відпал широко застосовується у виробництві напівфабрикатів і виробів з листового та дротяного прокату, труб, стрічок і профілів. Він є обов'язковою операцією між послідовними етапами холодної деформації, оскільки дозволяє відновити пластичність матеріалу і забезпечити можливість подальшої обробки без утворення тріщин. Особливо важливу роль рекристалізаційний відпал відіграє під час виготовлення тонколистових виробів, де висувуються підвищені вимоги до однорідності структури та стабільності механічних властивостей.

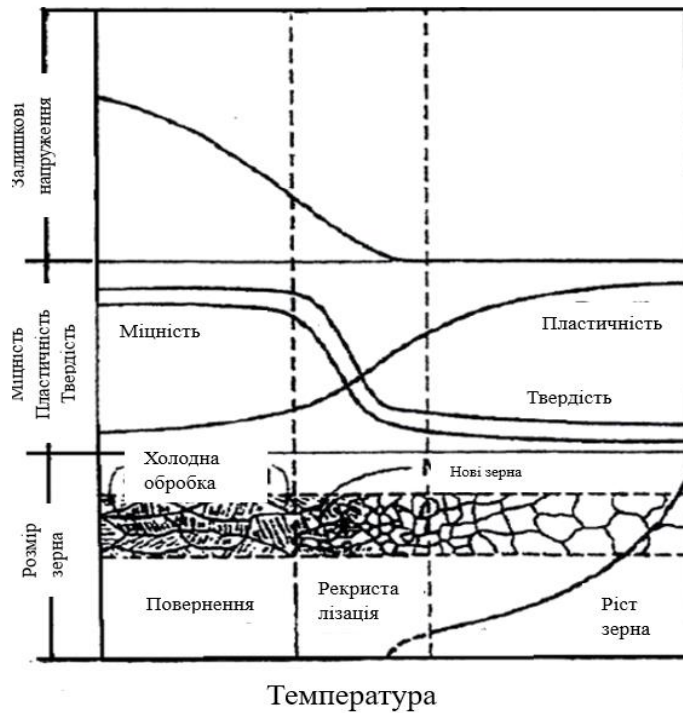


Рисунок 2 – Зміна властивостей та структури на етапах рекристалізації

Рекристалізаційний відпал є ефективним методом керування структурним станом деформованих металів і сплавів. Розуміння закономірностей рекристалізації, впливу температури, часу витримки та ступеня попередньої деформації дозволяє цілеспрямовано формувати мікроструктуру матеріалу й забезпечувати оптимальне поєднання міцності та пластичності, що має важливе значення для сучасного машинобудування та металургійної промисловості.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає сутність рекристалізаційного відпалу та яке його основне призначення?
2. Які структурні зміни відбуваються в металі внаслідок холодної пластичної деформації?
3. Що розуміють під наклепом і як він впливає на механічні властивості металів і сплавів?
4. Назвіть основні стадії процесу рекристалізації та охарактеризуйте кожен з них.
5. Яким чином температура рекристалізаційного відпалу впливає на швидкість і повноту рекристалізації?
6. Від яких факторів залежить температура рекристалізації металів і сталей?
7. Як ступінь попередньої холодної деформації впливає на умови рекристалізаційного відпалу?
8. Яку роль відіграють легувальні елементи в процесах рекристалізації?
9. Чим небезпечний надмірний ріст зерна після завершення рекристалізації?

10. Які відмінності між відновленням, рекристалізацією та ростом зерна?

11. У яких галузях промисловості та для яких виробів найчастіше застосовують рекристалізаційний відпал?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Проаналізувати вплив рекристалізаційного відпалу на структуру та властивості деформованої сталі або кольорового металу.

Для виконання завдання необхідно:

- обрати матеріал (низьковуглецеву сталь або кольоровий метал);
- описати характер структурних змін, що виникають у матеріалі після холодної деформації;
- обґрунтувати вибір температури та тривалості рекристалізаційного відпалу;
- пояснити, які зміни механічних властивостей очікуються після проведення відпалу;
- зробити короткий висновок щодо доцільності застосування рекристалізаційного відпалу для обраного матеріалу та умов обробки.

Тема 10. Відпал зварювальних швів

Зварювання є одним із найпоширеніших технологічних процесів з'єднання металевих конструкцій, який супроводжується локальним нагріванням матеріалу до високих температур і подальшим нерівномірним охолодженням. Унаслідок цього в зоні зварного шва та прилеглий зоні термічного впливу формується складний структурно-напружений стан, що характеризується значними залишковими напруженнями, структурною неоднорідністю та зміною механічних властивостей металу. Для зменшення негативного впливу цих факторів і забезпечення надійності зварних конструкцій застосовують відпал зварювальних швів.

Відпал зварювальних швів належить до пост термічної обробки і полягає в нагріванні зварного з'єднання або всієї конструкції до заданої температури з наступною витримкою та контрольованим охолодженням. Основною метою цього виду відпалу є зниження рівня залишкових напружень, стабілізація структури металу шва та зони термічного впливу, а також покращення пластичності й тривалої міцності зварного з'єднання.

Під час зварювання у металі виникають високі температурні градієнти, що призводять до утворення неоднорідної мікроструктури. У металі шва зазвичай формується лита структура з орієнтованими кристалами, тоді як у зоні термічного впливу можуть співіснувати ділянки з перегрітою, нормалізованою або загартованою структурою. Особливо небезпечним є утворення твердих і крихких структур, таких як мартенсит, у сталях з підвищеним вмістом вуглецю або легувальних елементів. Такі структурні особливості значно підвищують схильність зварних з'єднань до холодних тріщин і крихкого руйнування.

Відпал зварювальних швів сприяє перебігу дифузійних процесів, що забезпечують часткове або повне зняття залишкових напружень і структурну стабілізацію металу. Залежно від температурного режиму розрізняють відпал для зняття напружень, рекристалізаційний відпал і повний відпал зварних з'єднань. Найбільш поширеним у промисловій практиці є відпал для зняття напружень, який проводять за температур, нижчих за критичні точки сталі, що дозволяє зменшити напруження без істотної зміни фазового складу.

Температура відпалу зварювальних швів визначається маркою матеріалу, товщиною зварюваних елементів і умовами експлуатації конструкції. Для вуглецевих і низьколегованих сталей температура відпалу для зняття напружень зазвичай становить 500...650 °С, тоді як для легованих і теплостійких сталей вона може бути вищою. Тривалість витримки підбирають таким чином, щоб забезпечити вирівнювання температури по всьому об'єму з'єднання та ефективно зниження напружень. Охолодження після відпалу здійснюють повільно, зазвичай разом із піччю, щоб уникнути повторного виникнення термічних напружень.

Особливу увагу під час відпалу зварювальних швів приділяють великим і відповідальним конструкціям, таким як резервуари, трубопроводи, елементи енергетичного та авіаційного обладнання. У таких випадках неправильний вибір режиму пост термічної обробки може призвести до зниження довговічності конструкції або її передчасного руйнування. Для виробів значних габаритів застосовують місцевий відпал зварних швів із використанням електронагріву або індукційних установок, що дозволяє обробляти лише зону зварного з'єднання без нагрівання всієї конструкції.

Відпал зварювальних швів є важливою технологічною операцією, що забезпечує надійність і довговічність зварних з'єднань. Розуміння фізико-металургійних процесів, які відбуваються під час зварювання та подальшого відпалу, дозволяє обґрунтовано вибирати режими післязварювальної термічної обробки, зменшувати ймовірність дефектів і забезпечувати стабільні експлуатаційні властивості металевих конструкцій у складних умовах роботи.

Питання для самоконтролю

1. Яке призначення має відпал зварювальних швів і в яких випадках його застосування є обов'язковим?
2. Які основні структурні та напружені стани формуються у металі зварного шва та зоні термічного впливу після зварювання?
3. Що таке залишкові напруження та яким чином вони впливають на працездатність зварних з'єднань?
4. Які види пост термічної обробки застосовують для зварних з'єднань сталей?
5. У чому полягає відмінність між відпалом для зняття напружень і повним відпалом зварних швів?
6. Як вибір температури відпалу впливає на структуру металу шва та зони термічного впливу?
7. Чому швидке охолодження після відпалу є небажаним для зварних конструкцій?

8. Які особливості відпалу після зварювання для легованих і теплостійких сталей?

9. Які можливі дефекти або негативні наслідки можуть виникати за неправильного вибору режиму відпалу зварних з'єднань?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Проаналізувати доцільність і вплив відпалу зварювальних швів на структуру та властивості зварного з'єднання.

Для виконання завдання необхідно:

- обрати тип зварного з'єднання (стик, кутове або таврове) та марку сталі;
- описати структурний стан металу шва і зони термічного впливу після зварювання;
- запропонувати раціональний режим відпалу зварювального шва з обґрунтуванням температури, тривалості витримки та способу охолодження;
- пояснити очікувані зміни в структурі та механічних властивостях зварного з'єднання після відпалу;
- сформулювати короткий висновок щодо ролі післязварювальної термічної обробки у підвищенні надійності зварних конструкцій.

Тема 11. Маятниковий відпал. Сфероїдизація

Маятниковий відпал і сфероїдизація належать до спеціальних різновидів термічної обробки сталей, основною метою яких є зміна морфології карбідної фази та зниження твердості матеріалу з одночасним підвищенням пластичності й оброблюваності різанням. Ці процеси мають особливе значення для середньо- та високовуглецевих сталей, а також інструментальних сталей, у яких після попередніх термічних або деформаційних операцій формується ламельна перлітна або загартована структура з високою твердістю.

Маятниковий відпал полягає у багаторазовому або тривалому нагріванні сталі до температур, близьких до критичної точки A_1 , з наступним охолодженням, причому температурний режим коливається навколо евтектоїдної температури. Такий режим створює сприятливі умови для перебігу дифузійних процесів без повного переходу сталі в аустенітний стан. Унаслідок багаторазового проходження через область фазової нестійкості відбувається поступове руйнування ламельної перлітної структури та перехід цементиту у більш стабільну кулясту форму.

Сфероїдизація є структурним процесом, у результаті якого пластинчастий або сітчастий цементит перетворюється на окремі сфероїдальні (кулясті) частинки, рівномірно розподілені у феритній матриці. Така структура є термодинамічно більш стабільною, оскільки сфероїдальні частинки цементиту мають меншу сумарну поверхню міжфазної взаємодії. Сфероїдизована структура характеризується значно меншою твердістю та підвищеною пластичністю порівняно з перлітною або мартенситною.

Температура маятничого відпалу зазвичай знаходиться в інтервалі 680...750 °С, залежно від вмісту вуглецю та легувальних елементів. Тривалість процесу може бути значною і становити від кількох годин до десятків годин, що зумовлено повільною дифузією вуглецю в твердому розчині. Ефективність сфероїдизації істотно залежить від початкової структури сталі: найкращі результати досягаються у випадку дрібнопластинчастого перліту або структури після неповного загартування.

Маятничий відпал широко застосовується для підготовки заготовок з інструментальних сталей до механічної обробки різанням, холодного штампування або волочіння. Сфероїдизована структура забезпечує зменшення зусиль різання, підвищення стійкості різального інструменту та зниження ймовірності утворення тріщин під час пластичної деформації. Крім того, така структура є оптимальною вихідною для подальшого загартування, оскільки сприяє рівномірному розчиненню карбідів під час нагрівання до аустенітного стану.

Варто зазначити, що сфероїдизація може здійснюватися не лише шляхом маятничого відпалу, але й тривалою витримкою сталі трохи нижче точки A_1 або за допомогою комбінованих термічних і деформаційних режимів. Проте маятничий відпал є одним із найбільш надійних і відтворюваних способів отримання сфероїдизованої структури, особливо для високовуглецевих і легуваних інструментальних сталей.

Таким чином, маятничий відпал і сфероїдизація є важливими технологічними операціями, спрямованими на оптимізацію структури сталей перед подальшою обробкою або експлуатацією. Розуміння механізмів цих процесів дозволяє цілеспрямовано керувати морфологією карбідної фази, забезпечувати необхідний рівень пластичності та створювати сприятливі умови для наступних етапів термічної та механічної обробки.

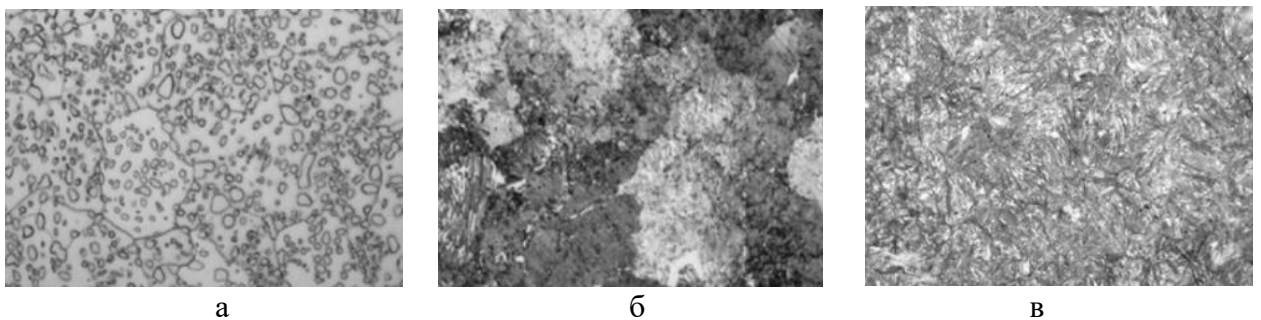


Рисунок 1 – Структура сталі:
а – сфероїдизована; б – перлітоцементитна; в - мартенситна

Питання для самоконтролю

1. Яке призначення маятничого відпалу та для яких сталей його застосовують найчастіше?
2. У чому полягає сутність процесу сфероїдизації цементиту в сталях?
3. Які відмінності між ламельною перлітною та сфероїдизованою структурами?

4. Чому сфероїдизований цементит є більш термодинамічно стабільною формою карбідної фази?
5. Яким чином температура маятникового відпалу впливає на інтенсивність дифузійних процесів?
6. Яку роль відіграє тривалість витримки під час маятникового відпалу?
7. Як початкова мікроструктура сталі впливає на ефективність сфероїдизації?
8. Які зміни механічних властивостей відбуваються у сталях після сфероїдизаційного відпалу?
9. Чому маятниковий відпал є доцільним перед механічною обробкою різанням або холодною деформацією?
10. Які альтернативні методи отримання сфероїдизованої структури існують і в чому їх особливості?
11. Які можливі негативні наслідки порушення режиму маятникового відпалу?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Проаналізувати вплив маятникового відпалу та сфероїдизації на структуру й властивості середньо- або високовуглецевої сталі.

Для виконання завдання необхідно:

- обрати марку сталі (вуглецеву або інструментальну);
- описати початкову мікроструктуру матеріалу до відпалу;
- обґрунтувати вибір температурного режиму та тривалості маятникового відпалу;
- пояснити очікувані структурні зміни, пов'язані зі сфероїдизацією цементиту;
- охарактеризувати зміни механічних властивостей і технологічної оброблюваності сталі після відпалу;
- сформулювати висновок щодо доцільності застосування маятникового відпалу для обраного матеріалу.

Тема 12. Натуральне старіння загартованих алюмінієвих сплавів

Натуральне старіння є одним із різновидів термічної обробки алюмінієвих сплавів, що ґрунтується на керованих дифузійних процесах у твердому розчині при кімнатній температурі. На відміну від сталей, де основні структурні перетворення пов'язані з фазовими переходами, у багатьох алюмінієвих сплавах підвищення міцності досягається за рахунок дисперсійного тверднення, яке реалізується через послідовність операцій розчинного відпалу, гартування та старіння.

Після розчинного відпалу алюмінієвий сплав нагрівають до температури, за якої легувальні елементи повністю або частково розчиняються в алюмінієвій матриці з утворенням пересиченого твердого розчину. Подальше швидке охолодження, зазвичай у воді, фіксує цей метастабільний стан. Загартований сплав характеризується відносно низькою міцністю та твердістю, але високою

пластичністю і значним запасом внутрішньої енергії, що створює передумови для перебігу процесів старіння.

Натуральне старіння відбувається за температури навколишнього середовища без додаткового нагрівання і полягає у поступовому виділенні з пересиченого твердого розчину надзвичайно дрібних зон збагачення легувальними елементами. На початкових стадіях формуються так звані зони Гінье-Престона, які мають когерентний зв'язок з кристалічною ґраткою алюмінію. Їх поява суттєво ускладнює рух дислокацій, що зумовлює зростання міцності та твердості сплаву навіть без зміни температурних умов.

Інтенсивність і тривалість натурального старіння залежать від хімічного складу алюмінієвого сплаву. Найбільш схильними до натурального старіння є сплави систем Al–Cu, Al–Mg–Si та Al–Zn–Mg, у яких дифузійна рухливість легувальних елементів при кімнатній температурі є достатньою для формування зміцнювальних зон. У таких сплавах помітне зростання механічних властивостей може спостерігатися вже через кілька годин або днів після гартування, а повне натуральне старіння триває від кількох днів до кількох тижнів.

Процес натурального старіння супроводжується підвищенням межі міцності та твердості, але водночас зменшенням пластичності та ударної в'язкості. Ці зміни мають важливе практичне значення, оскільки механічні властивості загартованих алюмінієвих сплавів можуть істотно змінюватися вже на етапі зберігання або транспортування напівфабрикатів. Тому в технологічній практиці часто враховують інтервал часу між гартуванням і подальшими операціями механічної обробки або складання виробів.

Натуральне старіння може розглядатися як самодовільний процес, однак у промислових умовах його часто поєднують або замінюють штучним старінням, яке проводять за підвищених температур з метою прискорення та стабілізації структурних перетворень. Водночас натуральне старіння має переваги з точки зору енергоефективності та простоти реалізації, що робить його доцільним для виробів, які не потребують максимально можливого рівня міцності.

Особливістю натурального старіння є також його вплив на подальше штучне старіння. У багатьох алюмінієвих сплавах попереднє натуральне старіння може змінювати кінетику штучного старіння та кінцевий рівень властивостей, що необхідно враховувати під час розроблення режимів термічної обробки. Таким чином, контроль часу і умов витримки після гартування є важливим елементом технології виготовлення виробів з алюмінієвих сплавів.

Натуральне старіння загартованих алюмінієвих сплавів є важливим етапом формування їх механічних властивостей, що базується на дифузійних процесах у пересиченому твердому розчині. Розуміння закономірностей цього процесу дозволяє прогнозувати зміну властивостей у часі, оптимізувати технологічні маршрути та забезпечувати стабільну якість виробів у машинобудуванні, авіаційній та транспортній галузях.

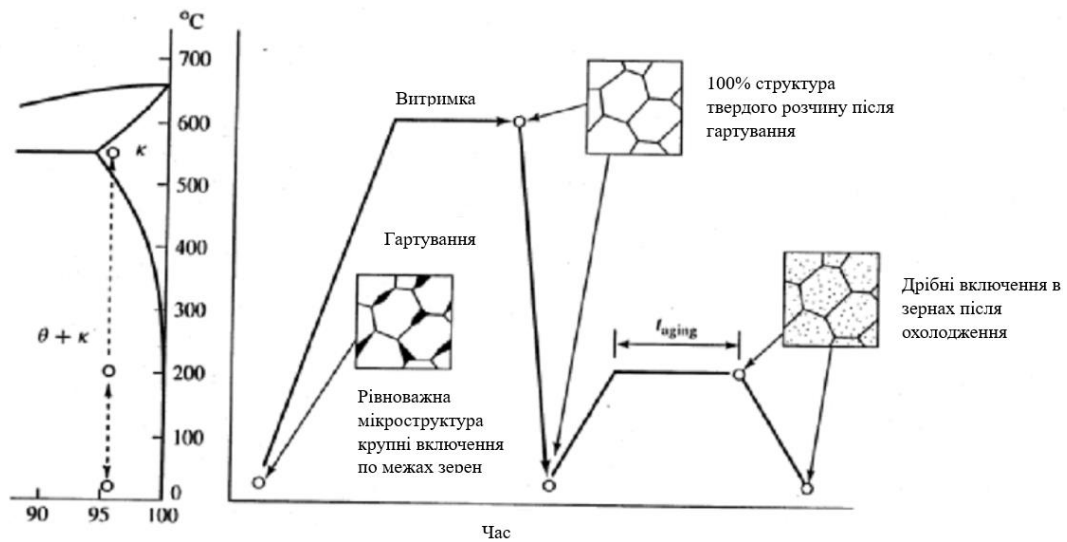


Рисунок 1 – Зміни структури після старіння сплаву на основі Al

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає сутність натурального старіння алюмінієвих сплавів і яке його місце в загальній схемі термічної обробки?
2. Який структурний стан формується в алюмінієвих сплавах після розчинного відпалу та гартування?
3. Що розуміють під пересиченим твердим розчином і чому він є нестабільним?
4. Яку роль відіграють зони Гінье-Престона у процесі натурального старіння?
5. Які системи алюмінієвих сплавів є найбільш схильними до натурального старіння і чому?
6. Як змінюються механічні властивості алюмінієвих сплавів у процесі натурального старіння?
7. Від яких факторів залежить швидкість і тривалість натурального старіння?
8. Чому натуральне старіння необхідно враховувати під час планування подальших технологічних операцій?
9. У чому полягають відмінності між натуральним і штучним старінням алюмінієвих сплавів?
10. Як попереднє натуральне старіння впливає на подальше штучне старіння?
11. Які практичні переваги та обмеження натурального старіння в промисловому виробництві?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Проаналізувати процес натурального старіння загартованого алюмінієвого сплаву та його вплив на структуру і механічні властивості матеріалу.

Для виконання завдання необхідно:

- обрати систему або конкретну марку алюмінієвого сплаву (наприклад, Al-Cu або Al-Mg-Si);
- описати етапи термічної обробки, що передують натуральному старінню;
- охарактеризувати структурні зміни, які відбуваються в сплаві під час витримки при кімнатній температурі;
- проаналізувати зміну механічних властивостей у часі (міцність, твердість, пластичність);
- сформулювати висновок щодо доцільності застосування натурального старіння для обраного сплаву та умов експлуатації виробу.

Тема 13. Поверхнева термічна обробка для підвищення технологічності та покращення властивостей

Поверхнева термічна обробка є важливим напрямом сучасної інженерної металургії, спрямованим на цілеспрямовану зміну властивостей приповерхневих шарів металевих виробів без істотного впливу на структуру та властивості їх серцевини. Такий підхід дозволяє поєднувати високу зносостійкість, твердість і корозійну стійкість поверхні з достатньою пластичністю, в'язкістю та міцністю основного матеріалу, що має вирішальне значення для підвищення технологічності й експлуатаційної надійності деталей машин.

Необхідність застосування поверхневої термічної обробки зумовлена тим, що більшість деталей у процесі експлуатації зазнають інтенсивного зношування, контактних напружень, циклічних навантажень і впливу агресивних середовищ саме на поверхні. Водночас об'ємна термічна обробка всієї деталі часто є економічно недоцільною або технологічно складною, оскільки може призводити до деформацій, утворення тріщин і погіршення оброблюваності. Поверхнева термічна обробка дозволяє локалізувати структурні зміни в зоні, яка безпосередньо бере участь у роботі деталі.

До поверхневої термічної обробки належать процеси, що забезпечують локальний нагрів і швидке охолодження поверхневого шару без нагрівання всієї деталі до температур фазових перетворень. Найпоширенішими є поверхневе гартування струмами високої частоти, лазерне та електронно-променеве гартування, а також полуменеве гартування. У результаті таких процесів у приповерхневому шарі формується дрібнодисперсний мартенсит або інші високоміцні структури, тоді як серцевина зберігає в'язку ферито-перлітну або загартовано-відпущену структуру.

Поверхнева термічна обробка суттєво підвищує технологічність виготовлення деталей. Завдяки локальному характеру нагріву зменшуються теплові деформації, спрощується подальша механічна обробка, знижується ймовірність появи залишкових напружень у всьому об'ємі виробу. Це особливо важливо для деталей складної форми, тонкостінних елементів і

великогабаритних конструкцій, для яких традиційна об'ємна термічна обробка є проблематичною.

З погляду експлуатаційних властивостей поверхнева термічна обробка забезпечує підвищення твердості, зносостійкості та контактної міцності, що є критичним для зубчастих коліс, валів, кулачків, напрямних і інших відповідальних деталей машин. Крім того, формування сприятливого розподілу залишкових напружень у приповерхневому шарі, зокрема стискуючих, підвищує опір втомному руйнуванню та тріщиностійкість виробів.

Важливою перевагою поверхневої термічної обробки є можливість її поєднання з іншими технологічними методами підвищення властивостей, зокрема з хіміко-термічною обробкою, нанесенням покриттів або механічним зміцненням. Такий комплексний підхід дозволяє формувати багатшарові функціональні поверхні з градієнтним розподілом властивостей, що відповідає сучасним вимогам машинобудування, енергетики та транспортної галузі.

поверхнева термічна обробка є ефективним інструментом керування структурою та властивостями металевих виробів. Вона забезпечує раціональне поєднання високих експлуатаційних характеристик і технологічності виготовлення, знижує матеріальні та енергетичні витрати та розширює можливості застосування традиційних конструкційних матеріалів у складних умовах експлуатації.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає сутність поверхневої термічної обробки та які її основні переваги порівняно з об'ємною термічною обробкою?
2. Які експлуатаційні навантаження зумовлюють необхідність зміцнення саме приповерхневих шарів деталей машин?
3. Які основні методи поверхневої термічної обробки застосовуються в сучасному машинобудуванні?
4. Яким чином локальний характер нагрівання впливає на деформації та залишкові напруження в деталях?
5. Які структурні перетворення відбуваються у поверхневому шарі сталі під час поверхневого гартування?
6. Як змінюються механічні та трибологічні властивості деталей після поверхневої термічної обробки?
7. Яку роль відіграють стискуючі залишкові напруження у підвищенні втомної міцності виробів?
8. У яких випадках поверхнева термічна обробка є технологічно та економічно доцільнішою за об'ємну?
9. Як геометрія та розміри деталі впливають на вибір методу поверхневої термічної обробки?
10. Які обмеження та можливі недоліки характерні для методів поверхневої термічної обробки?
11. Яким чином поверхневу термічну обробку поєднують з іншими методами зміцнення поверхні?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Проаналізувати можливості застосування поверхневої термічної обробки для підвищення технологічності та експлуатаційних властивостей конкретної деталі машинобудування.

Для виконання завдання необхідно:

- обрати деталь машинобудівного призначення (вал, зубчасте колесо, кулачок, напрямна тощо);
- визначити основні експлуатаційні навантаження та вимоги до властивостей поверхні й серцевини;
- запропонувати доцільний метод поверхневої термічної обробки з обґрунтуванням його вибору;
- описати очікувані структурні зміни у приповерхневому шарі та серцевині деталі;
- проаналізувати вплив обраного методу на технологічність виготовлення та довговічність виробу;
- сформулювати висновок щодо ефективності поверхневої термічної обробки для даного випадку.

Тема 14. Хіміко-термічна обробка. ТО після ХТО.

Хіміко-термічною називають обробку, яка полягає в поєднанні термічної і хімічної дії з метою зміни складу, структури і властивостей поверхневого шару деталі в необхідному напрямку. При цьому відбувається поверхневе насичення металевого матеріалу відповідними елементами С, N, Al, Cr, Si, Ti та іншими шляхами його дифузії в атомарному стані із зовнішнього середовища (твердого, газового, рідкого та парового) в метал при високій температурі. Залежно від елементів, що дифундують у поверхневий шар сталі, розрізняють такі види її хіміко-термічної обробки: цементацію, азотування, ціанування та дифузійну металізацію (алітування, силіціювання тощо)

До традиційних видів ХТО відносять цементацію, азотування, ціанування, борування, хромування, алітування та силіціювання. Сучасні процеси включають плазмове азотування, плазмове борування, іонно-плазмове та газофазне хромування, а також комбіновані технології типу боро-алітування або азото-борування, які застосовуються для авіаційних сталей, промислових інструментів та високонавантажених деталей.

Механізм формування зміцненого шару під час ХТО контролюється дифузією та кінетикою фазоутворення. Відповідно, структура поверхні залежить від елемента-насичувача, температури, тривалості процесу та складу основного металу. Наприклад, цементація формує вуглецевий градієнт у перехідній зоні між евтектоїдною та доевтектоїдною областю, тоді як азотування сприяє утворенню ϵ -та γ' -нітридних фаз, що зумовлюють високу твердість при відсутності значних деформацій.

Після хіміко-термічної обробки структура поверхневого шару, як правило, потребує додаткової термічної стабілізації або фазової корекції. Тому

у більшості технологічних маршрутів ХТО є лише першим етапом, який доповнюється операціями гартування, відпуску або нормалізації. Мета термічної обробки після ХТО полягає у:

- ✓ усуненні надлишкових внутрішніх напружень;
- ✓ забезпеченні стабілізації фазової структури;
- ✓ формуванні потрібного співвідношення твердості серцевини та градієнта твердості шару;
- ✓ підвищенні пластичності та ударної в'язкості основного металу.

Наприклад, після цементації проводять гартування із температур від 780 до 840 °С з наступним низьким або середнім відпуском. При азотуванні використовують відпуск при 500...600 °С або стабілізацію при температурі азотування без додаткового гарту. У випадку борування через високу твердість боридних фаз зазвичай термічна корекція не застосовується, але обирається шляхом оптимізації температури та швидкості охолодження.

Загальний принцип полягає в тому, що оптимальна система «ХТО + ТО» повинна забезпечити одночасно високі поверхневі властивості та механічну надійність серцевини.

Після цементації та гартування формується мартенситний шар з високою концентрацією вуглецю, який після низького відпуску набуває високої зносостійкості. Після азотування утворюється двофазний нітридний шар типу $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ та $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ з дифузійною підзоною. Комбінована ХТО може давати тришарову структуру, характерну для сучасних авіаційних сплавів та інструментальних сталей.

Таблиця 1 – Типові варіанти технологічних маршрутів ТО після ХТО

Вид ХТО	Подальша термічна обробка	Мета	Можлива твердість
Цементація	Гартування + низький відпуск	Зносостійкість	58...62 HRC на поверхні
Азотування	Відпуск 500...600°C	Корозійна стійкість	900...1200 HV на шарі
Ціанування	Гартування	Зміцнення	55...60 HRC
Борування	Без ТО	Ерозійна стійкість	1800...2200 HV
Хромування	Відпуск	Твердість + корозія	900...1200 HV

Після цементації сталі у твердому карбюризаторі або під час газової цементації в шахтних печах може застосовуватися як швидке, так і повільне охолодження. Використання швидкого охолодження запобігає утворенню карбідної сітки у поверхневому шарі, однак призводить до збільшення викривлення та деформацій деталей. Подальше гартування виконують з температури 760...780 °С або з температур вище критичної точки A_{c1} у випадку необхідності повного загартування серцевини.

Якщо після цементації в шарі зберігається значна кількість залишкового аустеніту, призначають додаткову операцію обробку холодом з метою переведення його в мартенсит. Для відповідальних деталей машин, що мають

забезпечувати підвищені експлуатаційні характеристики, після цементації у твердому карбюризаторі застосовують більш складні схеми термообробки. Зазвичай після цементації деталі охолоджують на повітрі або разом з ящиком, внаслідок чого у цементованому шарі формується небажана карбідна сітка. Для її усунення призначається подвійне гартування.

Перше гартування або нормалізація виконуються при нагріві до 880...900 °С, що сприяє ліквідації карбідної сітки та подрібненню зерна серцевини. Нормалізація забезпечує менші деформації, однак не завжди повністю усуває карбідну сітку.

Друге гартування проводять при температурі 760...830 °С з метою подрібнення зерна у цементованому шарі, зниження його схильності до крихкого руйнування та отримання високої поверхневої твердості.

У деталях відповідального призначення, виготовлених із легованих сталей типу 20Х2Н4А, 18Х2Н4ВА та аналогічних, навіть за умови повільного охолодження після цементації може зберігатися значна кількість залишкового аустеніту. Для його розкладу та утворення легованих карбідів, що збільшують твердість поверхневого шару, перед гартуванням застосовують дворазовий або триразовий високий відпуск при 600...650 °С з тривалою витримкою.

Фінальною операцією термообробки після цементації є низький відпуск при 160...180 °С, що забезпечує формування структури відпущеного мартенситу в дифузійному шарі та часткове зняття внутрішніх напружень.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає сутність хіміко-термічної обробки та яке її основне призначення?
2. Які фізико-хімічні процеси лежать в основі формування дифузійного шару під час ХТО?
3. Назвіть основні види хіміко-термічної обробки сталей та їх характерні особливості.
4. Яким чином хімічний склад сталі впливає на вибір виду ХТО та режимів її проведення?
5. Яка структура формується в дифузійному шарі після цементації та карбонітрування?
6. Чому для більшості видів ХТО необхідна подальша термічна обробка?
7. Яке призначення загартування після цементації та карбонітрування?
8. Яку роль відіграє відпуск після загартування хіміко-термічно оброблених деталей?
9. Чим відрізняється термічна обробка після азотування від ТО після цементації?
10. Які можливі дефекти можуть виникати в разі неправильного вибору режимів ТО після ХТО?
11. Як поєднання ХТО та подальшої ТО впливає на розподіл твердості та напружень у деталі?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Проаналізувати вплив хіміко-термічної обробки та подальшої термічної обробки на структуру і властивості сталевих деталей машинобудівного призначення.

Для виконання завдання необхідно:

- обрати марку конструкційної або легованої сталі та конкретний вид хіміко-термічної обробки;
- охарактеризувати умови та мету проведення обраного процесу ХТО;
- запропонувати доцільний режим термічної обробки після ХТО з обґрунтуванням температури, тривалості та способу охолодження;
- описати очікувані структурні зміни в дифузійному шарі та серцевині деталі;
- проаналізувати зміни механічних і експлуатаційних властивостей після завершення всього комплексу обробки;
- сформулювати висновок щодо ефективності поєднання ХТО та подальшої термічної обробки для підвищення довговічності виробу.

Тема 15. Установки та печі для проведення термічної обробки і відпалу

Проведення термічної обробки та відпалу металів і сплавів неможливе без застосування спеціалізованих теплотехнічних установок, які забезпечують контрольоване нагрівання, витримку та охолодження виробів відповідно до заданого режиму. Тип і конструкція печі значною мірою визначають точність дотримання температурних параметрів, рівномірність прогріву, стан поверхні деталей і відтворюваність результатів термічної обробки. Тому вибір установок для ТО є важливим етапом технологічної підготовки виробництва.

Печі для термічної обробки повинні забезпечувати стабільний температурний режим у робочому просторі, можливість регулювання швидкості нагрівання й охолодження, а також підтримання необхідного газового середовища. Залежно від призначення та умов експлуатації розрізняють печі періодичної та безперервної дії. Печі періодичної дії застосовуються для обробки партій деталей або великогабаритних виробів і характеризуються універсальністю та гнучкістю використання. Безперервні печі, навпаки, орієнтовані на масове та серійне виробництво, де деталі переміщуються через зони нагрівання, витримки та охолодження з постійною швидкістю.

За джерелом теплової енергії печі поділяють на електричні та паливні. Електричні печі широко використовуються у термічній обробці завдяки високій точності регулювання температури, чистоті робочого середовища та можливості створення захисних або вакуумних атмосфер. Вони особливо ефективні для відпалу, загартування та старіння відповідальних деталей. Паливні печі, що працюють на газі або рідкому паливі, відзначаються високою тепловою потужністю і застосовуються переважно для обробки великогабаритних виробів або у випадках, коли вимоги до чистоти атмосфери є менш жорсткими.

За конструктивними особливостями розрізняють камерні, шахтні, ковпакові, конвеєрні та роликові печі. Камерні печі є найбільш універсальними та використовуються для широкого спектра операцій відпалу й термічної обробки. Шахтні печі призначені для обробки довгомірних виробів, зокрема валів і труб, і забезпечують рівномірний прогрів за висотою. Ковпакові печі застосовуються для тривалого відпалу листового прокату або дроту в захисній атмосфері та дозволяють мінімізувати окиснення поверхні.

Особливу групу становлять печі та установки з контрольованою атмосферою або вакуумом. Такі установки використовують для термічної та хіміко-термічної обробки сталей, чутливих до зневуглицювання та окиснення. Вакуумні печі забезпечують високий рівень чистоти поверхні, рівномірність прогріву та можливість поєднання термічної обробки з гартуванням у газовому або масляному середовищі. Вони широко застосовуються у авіаційному, інструментальному та енергетичному машинобудуванні.

Для проведення відпалу, особливо рекристалізаційного та відпалу для зняття напружень, важливим є забезпечення повільного та контрольованого охолодження. З цією метою печі оснащують системами програмного керування температурними режимами, що дозволяє реалізовувати складні температурно-часові цикли. Сучасні установки для ТО оснащуються автоматизованими системами контролю, термопарами та засобами реєстрації параметрів процесу, що підвищує надійність і відтворюваність результатів.

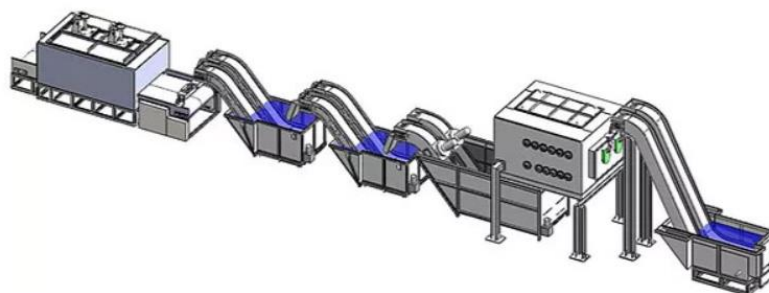


Рисунок 1 – Схема конвеєрної лінії для термічної обробки деталей

Установки та печі для термічної обробки й відпалу є ключовим елементом технологічного забезпечення металургійного та машинобудівного виробництва. Раціональний вибір типу печі, її конструкції та режимів роботи дозволяє забезпечити необхідну якість обробки, підвищити технологічність процесу та ефективно керувати властивостями металевих виробів.

Питання для самоконтролю

1. Яке призначення мають установки та печі для термічної обробки і відпалу металів?
2. Які основні вимоги висуваються до печей для проведення термічної обробки?
3. У чому полягає різниця між печами періодичної та безперервної дії?
4. Які переваги та недоліки електричних і паливних печей?
5. Які конструктивні типи печей застосовуються для термічної обробки і відпалу сталей?

6. Для яких видів деталей доцільно використовувати камерні, шахтні та ковпакові печі?

7. Яке значення має контроль газового середовища під час термічної обробки?

8. У чому полягають особливості вакуумних печей і де їх застосовують?

9. Які засоби контролю та автоматизації використовуються в сучасних термічних установках?

10. Як режим охолодження реалізується в установках для відпалу та які вимоги до нього?

11. Які фактори необхідно враховувати під час вибору печі для конкретного виду термічної обробки?

Індивідуальне завдання для самостійної роботи

Проаналізувати доцільність вибору установки або печі для проведення термічної обробки чи відпалу конкретної металевої деталі.

Для виконання завдання необхідно:

– обрати деталь машинобудівного призначення або напівфабрикат (лист, вал, труба тощо);

– визначити вид термічної обробки або відпалу, який необхідно виконати;

– запропонувати тип печі або термічної установки з обґрунтуванням її вибору;

– охарактеризувати вимоги до температурного режиму, атмосфери та охолодження;

– проаналізувати вплив вибраної установки на якість обробки, продуктивність і технологічність процесу;

– сформулювати висновок щодо ефективності застосування запропонованої термічної установки.

Рекомендована література

1. Totten G. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. CRC Press, 2020. Callister W., Rethwisch D. Materials Science and Engineering. Wiley, 2022.
2. Термічна обробка: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм "Матеріалознавство", "Індустріальний інжиніринг та менеджмент" спеціальності 132 "Матеріалознавство" галузі знань 13 "Механічна інженерія" денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук, Ю.П. Фещук. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – 96 с.
3. Дяченко С. С. Термічна обробка металів і сплавів: навчальний посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2020.
4. Вакуленко І.О. Конспект лекцій. «Термічна обробка металів» – Кам'янське: ДДТУ, 2024. – 121 с.
5. Металознавство : навчальний посібник / І. В. Прокопович. – Одеса : Екологія, 2020. – 308 с.
6. Вакуленко І.О. Конспект лекцій. «Термічна обробка металів» – Кам'янське: ДДТУ, 2024. – 121 с.
7. Матеріалознавство : навч. посіб. / В.І. Бузило, В.П. Сердюк, А.В. Яворський, О.А. Гайдай / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2021. – 243 с.
8. Di Schino A., Testani C. Heat Treatment of Steels // Metals. – 2021. – Vol. 11, № 8. – Article 1168. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/8/1168>.
9. Borgioli F. The Expanded Phases Formed in Stainless Steels by Low-Temperature Thermochemical Treatments: A Review // Metals. – 2024. – Vol. 14, № 12. – Article 1371. – Режим доступу: <https://mdpi.com/2075-4701/14/12/1371>
10. Carpio M., Vázquez L., Blanco A. Heat Treatment Design for a QP Steel: Effect of Partitioning Temperature // Metals. – 2021. – Vol. 11, № 7. – Article 1136. – Режим доступу: <https://mdpi.com/2075-4701/11/7/1136>.

Інформаційні ресурси

1. <https://repository.lntu.edu.ua/home>
2. Методичні матеріали з дисципліни “Теорія і практика термообробки” на інформаційному порталі ДДТУ. - Режим доступу: <http://www.dstu.dp.ua>.
3. <https://www.youtube.com/watch?v=G7Ct0jrrHdU>
4. <https://www.youtube.com/watch?v=1JpIRAyYpXg>
5. <https://www.youtube.com/watch?v=VRBpqM6ESrg>
6. https://mdpi-res.com/bookfiles/book/4644/Heat_Treatment_of_Steels.pdf?v=1751072692
7. <https://metinvest-smc.com/ua/articles/termicna-obrobka-metaliv-i-splaviv/?srsrtid=AfmBOornv0hDzRaRQ2mH6U7-O5pp-Z1zuDX2QKQM-PkuPxDalklqFB9U>

Т35 Термічна обробка: методичні вказівки до виконання самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук, Н.Ю. Імбірович – Луцьк: ЛНТУ, 2025. – 42 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Термічна обробка». Призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності G8 Матеріалознавство денної та заочної форм навчання. Містить теоретичний матеріал відповідно до тем передбачених робочою програмою, питання до самоконтролю, додаткові самостійні завдання та перелік рекомендованої літератури.

Комп'ютерний набір Зайчук Н.П.

Редактор Зайчук Н.П.

Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Таймс.

Ум. друк. арк. 2,6. Обл.-вид. арк. 1,8.

Тираж ___ прим. Зам. 1.

Відділ іміджу та промоції

Луцького національного технічного університету

43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75

ВП ЛНТУ

