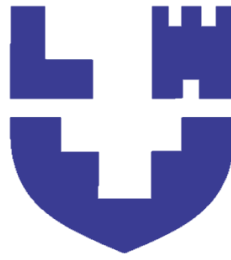


Міністерство освіти і науки України



ТЕРМІЧНА ОБРОБКА

Методичні вказівки до практичних занять
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 2026

УДК 621.783(07)

T35

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозиторій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н.П. Поліщук

Рекомендовано до видання вченою радою факультету митної справи, матеріалів та технологій ЛНТУ, протокол № 5 від « 14 » січня 2026 року.

Голова вченої ради факультету ММТ _____ В.В. Ткачук

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри матеріалознавства ЛНТУ, протокол № 7 від «13» січня 2026 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: _____ Д.А. Гусачук, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

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

Термічна обробка: методичні вказівки до практичних занять 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, 2026. – 77 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Термічна обробка». Видання призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності G8 Матеріалознавство денної форми навчання, містить вказівки до виконання практичних робіт, теоретичні відомості, завдання, перелік літератури, питання для самоконтролю.

© Н. Зайчук, Н. Імбірович, 2026

ВСТУП

Термічна обробка є одним із ключових технологічних процесів сучасного машинобудування, інструментального виробництва та матеріалознавства. Основним призначенням термічної обробки є цілеспрямована зміна структури і властивостей металів та сплавів шляхом їх нагрівання, витримання і охолодження за визначеними режимами. Вибір методу термічної обробки, температурних параметрів, середовищ нагріву й охолодження визначає експлуатаційні характеристики конструктивних елементів та виробів, їх зносостійкість, міцність, корозійну стійкість та надійність у роботі.

Вивчення курсу «Термічна обробка» має на меті формування у студентів системного розуміння основ фазових перетворень у сталях і сплавах, а також набуття практичних навичок у виборі та обґрунтуванні технологічних режимів термічної обробки. Практичні заняття курсу спрямовані на опанування методів аналізу структурного стану матеріалів після різних видів обробки, вміння читати технологічну документацію, користуватися нормативними довідниками та засобами контролю якості.

Методичні вказівки до практичних робіт містять теоретичні відомості, необхідні для виконання практичних завдань, таблиці та графічний матеріал, що сприяє глибшому розумінню процесів. Для кожної роботи наведено мету, коротке теоретичне обґрунтування, практичні завдання, контрольні запитання.

Практичні роботи спрямовані на закріплення теоретичних знань, формування інженерного мислення та здатності приймати обґрунтовані технологічні рішення при проєктуванні та експлуатації деталей машин і механізмів.

Результати практичних робіт можуть використовуватись у розділах курсової роботи «Термічна обробка» як обґрунтування вибору основних параметрів термічної обробки, призначення режимів термічної обробки для виданих викладачем варіантів сталей або сплавів, розробки технологічного процесу термічної обробки визначеної деталі.

Практична робота №1

Визначення температури нагріву під гартування

Мета роботи – дослідити вплив розмірів зразка (виробу), його форми (пластина, циліндр, куля), охолоджуючого середовища, що використовується для загартування (вода, масло, розплави солей, металів) на характер фазових і структурних перетворень при охолодженні; оцінити можливість застосування для обраних зразків (деталей) з конкретними розмірами виконання загартування на мартенсит, можливість отримання мартенситної структури для визначеної марки сталі.

Теоретичні відомості

Гартування сталей є основним видом термічної обробки, спрямованим на отримання високоміцної структури мартенситу шляхом нагрівання сталі до аустенітного стану з наступним швидким охолодженням. Ключовим параметром цього процесу є температура нагріву, яка визначає фазовий стан металу перед охолодженням та істотно впливає на структуру і властивості після гартування.

Температура нагріву під гартування залежить від положення критичних точок для кожної конкретної сталі. Для вуглецевих сталей вона може бути обрана безпосередньо за діаграмою залізо-вуглець (рисунок 1).

Температура фазових перетворень при термічній обробці сталі або критичні точки визначаються лініями на діаграмі: PSK (A_1), GS (A_3), SE (A_{cm})

Критична точка A_1 відповідає евтектоїдному перетворенню аустеніту, тобто при цій температурі, за умов охолодження, аустеніт перетворюється на перліт (суміш фериту і цементиту пластинчастої будови). Критична точка A_3 відповідає початку виділення із аустеніту фериту при охолодженні або кінця розчину фериту в аустеніті при нагріванні в доевтектоїдній сталі. Температура цієї критичної точки змінюється від 727°C до 911°C , в залежності від вмісту в сталі вуглецю. Критична точка A_{cm} відповідає виділенню цементиту вторинного із аустеніту при охолодженні або повній розчинності цементиту в аустеніті при нагріванні в заевтектоїдній сталі. Температура цієї критичної точки знаходиться в межах від 727°C до 1147°C в залежності від вмісту вуглецю в сталі.

Таким чином, температура гартування, для більшості марок сталі, визначається положенням критичних точок A_{c1} та A_{c3} . Доевтектоїдні сталі, при цьому, нагрівають на $30\dots50^\circ\text{C}$ вище A_{c3} , а заевтектоїдні сталі на $30\dots50^\circ\text{C}$ вище A_{c1} .

Найбільш висока температура може бути призначена при термічній обробці легованих, особливо природно дрібнозернистих сталей або в разі застосування високошвидкісного нагрівання під гартування, наприклад, при гартування струмами високої частоти (СВЧ) або інших методах поверхневого гартування.

Використання температур нагрівання, що перевищують оптимальні значення, призводить до надмірного, часто неприпустимого зростання аустенітного зерна і отримання крупногочастого мартенситу після гартування і зниження міцності і пластичних характеристик сталі.

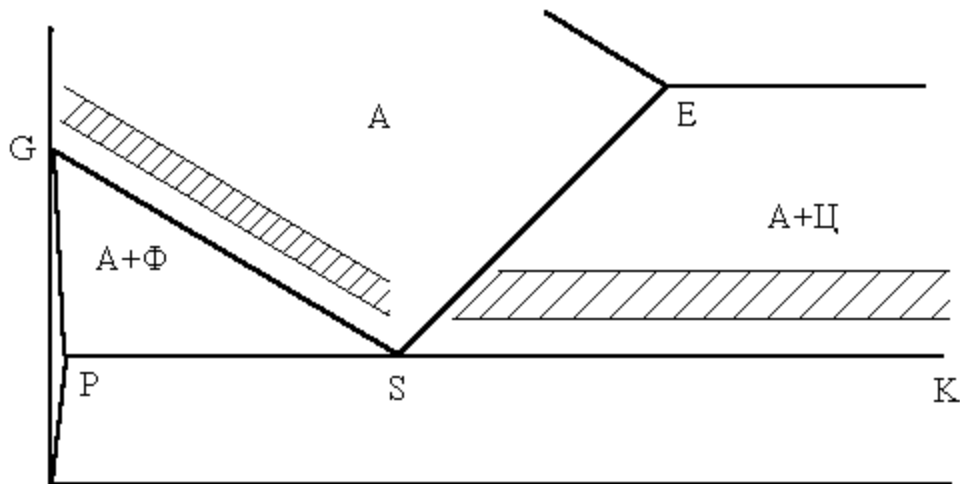


Рисунок 1 – Схема вибору температури нагріву під гартування за діаграмою залізо-вуглець (заштриховані області)

Заевтектоїдні сталі нагрівають під гартування до температур на $35...60\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище точки A_{c1} , але нижче точки A_{cm} . При цьому зберігаються після гартування частинки вторинного цементиту (карбідів – в легованих сталях), що не знижує міцності, а навпаки, збільшує твердість і зносостійкість сталі, зменшує ступінь зростання зерна в цих сталях.

У високолегованих сталях, наприклад, швидкорізальних, що містять дуже велику кількість карбідоутворюючих елементів (вольфраму, молібдену, ванадію, хрому) кількість надлишкових карбідів і їх стійкість виявляється настільки високими, що вони зберігаються не розчинившись майже до температури плавлення ($1200...1300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Це запобігає зростанню аустенітного зерна в сталі аж до температур близьких до температур плавлення, що дозволяє використовувати такі температурні параметри гартування як оптимальних для швидкорізальних сталей, які необхідні для найбільш повного розчинення високолегованих карбідів. Це забезпечує підвищення міцності, червоностійкості сталі, підвищення ріжучої стійкості інструментів.

В залежності від обраної температури гартування змінюється структура і властивості сталі. Нагрів сталі нижче A_{c1} та подальше охолодження у воді не змінює структуру вихідної сталі (рис. 2, а, б).

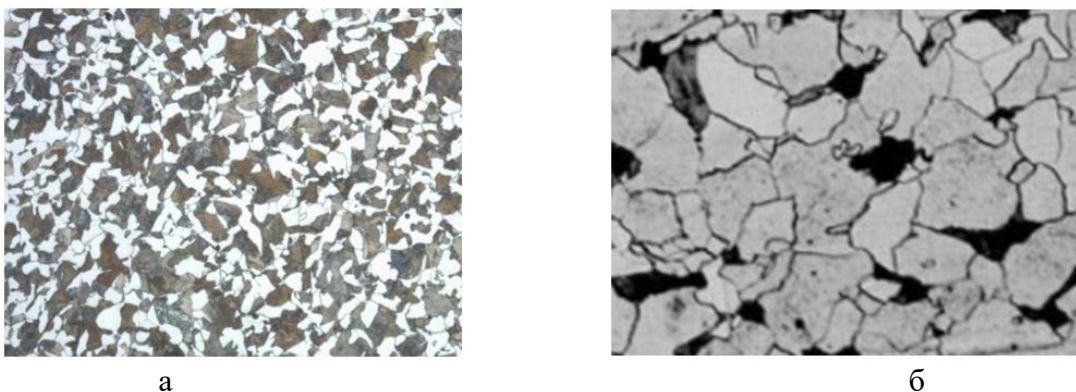


Рисунок 2 – Ферито-перлітна структура доевтектоїдної сталі (а – $0,5\% \text{ C}$; б – $0,3\% \text{ C}$)

Нагрів сталі вище критичної точки A_{c3} на $30\dots 50^{\circ}\text{C}$ (рис. 3, а) призводить до повної перекристалізації і утворення дрібнозернистого аустеніту, після охолодження у воді, перетворюється на мартенсит з дрібноголчастою структурою (рис. 3, б).

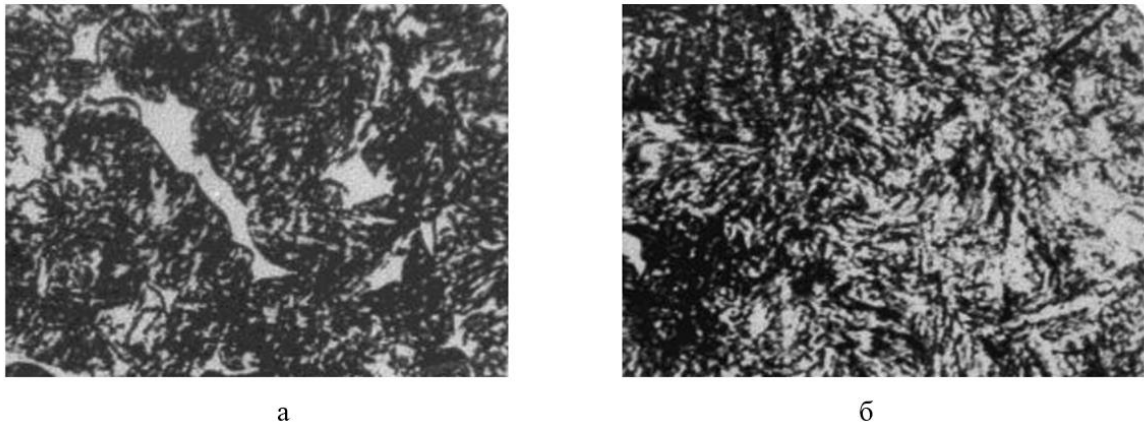


Рисунок 3 – Структура доевтектоїдної сталі після гартування від 750°C (а) та 850°C (б)

Температура гартування, що значно перевершує A_{c3} , призводить до формування структури крупноголчастого мартенситу та збільшення кількості залишкового аустеніту (рис. 4). Механічні властивості такої сталі погіршуються, зменшується в'язкість, твердість, збільшуються внутрішні напруження. Зниження твердості перегрітої сталі відбувається через збільшенню кількості залишкового аустеніту.



Рисунок 4 – Структура доевтектоїдної сталі після гартування за завищених температур

Швидкість охолодження при термічній обробці встановлюють відповідно до стійкості переохолодженого аустеніту і значення критичної швидкості гартування. Практично багато легованих сталей гартуються на мартенсит в маслі, тобто при меншій швидкості охолодження, ніж вуглецева сталь, яка загартовується у воді.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. Отримати завдання: марку сталі та розмір деталі, для якої визначити температуру під гартування.
2. За довідковими матеріалами визначити хімічний склад заданої сталі.
3. Встановити належність сталі до доевтектоїдної або заевтектоїдної групи.
4. Визначити критичні температури A_{c1} та A_{c3} (або A_{cm}).
5. Розрахувати температуру нагріву під гартування.

6. Обґрунтувати вибір температури з урахуванням структури та умов експлуатації деталі.

7. Сформулювати висновки щодо впливу термообробки і вмісту вуглецю на структуру і механічні властивості сталі. Результати розрахунків і виконаного аналізу порівняти з даними відомими з науково-технічної та довідкової літератури.

Питання для самоконтролю

1. Назвіть головні параметри термообробки.
2. Який вплив на структуру загартованої сталі має температура попереднього нагріву?
3. Що таке мартенсит?
4. Від чого залежить кількість залишкового аустеніту?
5. Яка оптимальна температура гартування доевтектоїдних сталей?
6. Яка оптимальна температура гартування заевтектоїдних сталей?
7. Чому надмірне збільшення температури гартування призводить до зменшення твердості?
8. Чим відрізняється вибір температури нагріву для доевтектоїдних і заевтектоїдних сталей?
9. Які негативні наслідки можливі при перегріві сталі перед гартуванням?
10. Як легувальні елементи впливають на критичні температури?

Практична робота №2

Контрольовані середовища для нагріву. Охолоджуючі середовища для гартування

Мета роботи – ознайомитись із основними властивостями контрольованих середовищ для нагріву та гартівних середовищ; отримати навички у виборі технології нагріву і охолодження та гартівного середовища при розробці технології термічної обробки.

Теоретичні відомості

Нагрів та охолодження – це одні з ключових параметрів технологічного процесу усіх видів термічної обробки. В тому числі гартування. Важливе значення має точність і правильність дотримання режимів обробки, що відповідає за якість обробки і надійність виробів в цілому.

Контрольовані середовища для нагріву

Для проведення операцій термічної обробки таких як гартування, відпуск, штучне старіння, відпал деталей із сталей і чавунів використовують захисні середовища. Печі для термічної обробки зазвичай обладнані системою управління процесом, аналізу, огляду, обслуговування і газовою системою.

Термічна обробка може бути як проміжною, так і заключною операцією. Перша застосовується для покращення технологічних властивостей матеріалу (оброблюваності різанням, тощо), а друга – для формування властивостей готових виробів.

Існують спеціальні термічні печі, у яких камера герметично закрита і заповнюється захисним газом (наприклад, нейтральна, відновна чи інертна

атмосфера). У таких печах подача газів здійснюється через вхідні газові патрубки й розподільні системи, що забезпечують рівномірну атмосферу навколо деталей. Такі печі широко застосовують для нейтрального нагріву сталі (без окиснення), а також як камера для цементації/нітроцементації зі спрямованим введенням активних газів.

З метою захисту поверхонь при термообробці деталей від окиснення, знеуглецювання і науглецювання застосовують контрольовані атмосфери.

Контрольована атмосфера – це штучно сформоване газове середовище в печі, склад якого підтримується на заданому рівні для забезпечення необхідних хімічних та структурних результатів під час нагріву металу.

Окиснення і знеуглецювання деталей спричинює зміни чистоти обробки поверхонь і погіршення фізико-механічних властивостей верхніх шарів деталей. Якщо під час термообробки поверхня деталей зберігається світлою, то надалі відпадає необхідність очищення деталей від окалини, що значно зменшує загальну вартість термообробки. Для створення контрольованих атмосфер існує багато установок, які широко застосовують у промисловості.

За характером середовища в робочому просторі розрізняють нагрівальні печі й установки з окисною (повітряною) атмосферою, контрольованими атмосферами (нейтральними, відновлювальними, науглецювальними й ін.), печі-ванни (масляні, з розплавом солей, лугів, металів), вакуумні печі. Для захисту поверхні, виробів, що нагріваються, від окиснення та знеуглецювання в нагрівальних печах у робочий простір печі вводять захисне газове середовище, тобто створюють так звані контрольовані атмосфери. В якості таких атмосфер застосовують висушені газоподібні продукти неповного згорання палива (СО), очищений азот, водень, аргон, гелій. В останній час широко застосовують нагрівання деталей в вакуумі $10^2 \dots 10^{-3}$ мм. рт. ст. (1,33...0,13 Па). Для нагрівальних ванн використовують розплави хлористих солей (70 % ВаСІ та 30 % NaС1) та інші.

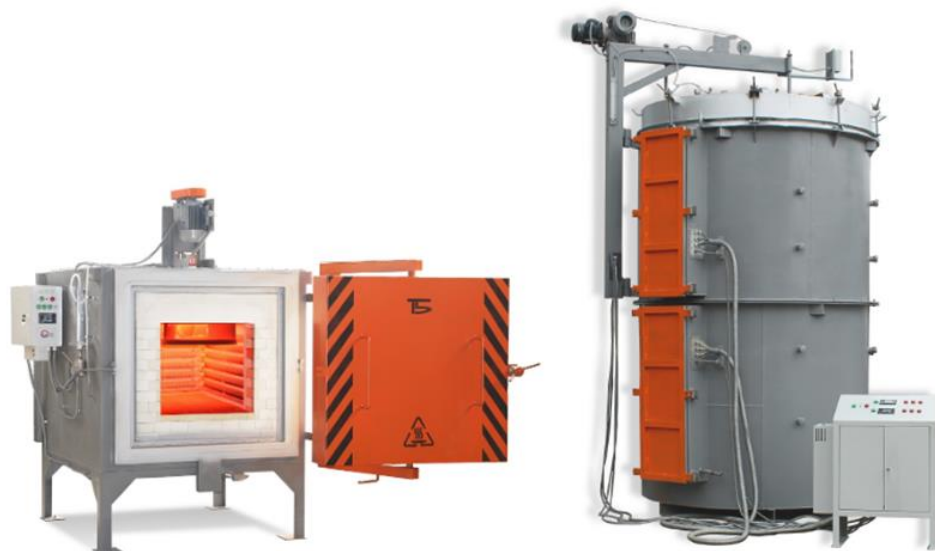


Рисунок 5 – Загальний вигляд печей (камерна (а), шахтна (б))

Основні функції контрольованих атмосфер – це захист поверхні або її модифікація.

Захисна атмосфера запобігає:

- ✓ утворенню окалини (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4)

- ✓ зневуглецюванню поверхні (втрата вуглецю → зниження твердості)
- ✓ окисленню легувальних елементів (Cr, Si, Mn)
- ✓ нагару та шлаковим дефектам.

Це особливо важливо при нагріванні інструментальних сталей, високолегованих сталей, деталей з вимогами до розмірної точності.

Контрольовані атмосфери можуть бути активними, коли поверхню насичують іншими елементами:

- ✓ збагачують вуглецем → цементація / карбонітрування;
- ✓ збагачують азотом → азотування / нітроцементація;
- ✓ збагачують бором, алюмінієм та ін. → борування, алітування тощо.

Наприклад: цементація зубчастих коліс → підвищена поверхнева твердість та зносостійкість при збереженні в'язкої серцевини.

Таблиця 1 – Види контрольованих атмосфер

Тип атмосфери	Основний склад	Призначення	Типові процеси	Особливості
Захисна (нейтральна)	N ₂ , Ar, He	Захист від окислення	Відпал, нагрів під гартування	Хімічно інертна
Відновна	CO, H ₂ , CH ₄	Видалення оксидів, зменшення окалини	Нагрів під гартування, ХТО	Поглинає O ₂ з поверхні
Карбюризуюча	CO, CH ₄ , C _n H _m	Збагачення С	Цементація, нітроцементація	Формує карбонітридні шари
Азотуюча	NH ₃ , N ₂	Збагачення N	Азотування, нітроцементація	Формує ε- та γ'-нітриди
Окислювальна	O ₂ , CO ₂ , H ₂ O	Окислення поверхні	Декальцинація	У термічній обробці не застосовується
Вакуум	~1,32·10 ⁻³ ...1,32·10 ⁻⁵ атм	Чистий нагрів без реакцій	Гартування, пайка	Відсутність окалини та деформацій

Контрольовані атмосфери дають можливість покращення рівномірності структури, що дозволяє:

- ✓ отримати однорідну структуру аустеніту
- ✓ уникнути структурних градієнтів
- ✓ стабілізувати розмір і форму деталей
- ✓ мінімізувати напруження та деформації

Наприклад: при вакуумному гартуванні відсутність окислення зменшує деформації після охолодження.

Охолоджуючі середовища для гартування сталей

Охолоджувальні середовища відіграють ключову роль у процесі гартування сталей, оскільки визначають швидкість охолодження та характер структурних перетворень, що відбуваються у матеріалі під час фазового переходу аустеніту. Від швидкості охолодження залежить здатність сталі до формування мартенситу, рівень внутрішніх напружень та ймовірність утворення деформацій і дефектів. Правильний вибір середовища охолодження забезпечує отримання необхідних механічних властивостей загартованих

деталей, таких як твердість, зносостійкість та ударна в'язкість, а також мінімізує ймовірність руйнування.

Охолоджуючі середовища класифікують за інтенсивністю охолодження на дуже інтенсивні, інтенсивні, помірні, регульовані, слабкі та спеціальні. Інтенсивність охолодження визначається фізико-хімічними властивостями середовища, температурним діапазоном його застосування, тепловіддачею та наявністю фазових переходів під час контакту з поверхнею нагрітого металу.

Вода та водні розчини. Вода є одним із найпоширеніших середовищ для гартування сталей завдяки високій теплоємності та теплопровідності. Вона забезпечує інтенсивне охолодження, що сприяє практично повному формуванню мартенситної структури для мало- та середньовуглецевих сталей.

Вода характеризується надзвичайно високою охолоджувальною здатністю, обумовленою великими питомою теплоємністю (4,18 кДж/(кг·К) при 15 °С) та питомою теплотою випаровування (2235 кДж/кг при 100 °С). В той же час за теплопровідністю вода значно поступається металам.

Наприклад, теплопровідність вуглецевої сталі становить 35...45 Вт/(м·К), води 0,68 Вт/(м·К) при 20 °С.

Разом з тим у воді можливе значне термічне напруження матеріалу, що обумовлює появу тріщин і деформацій. Характерним явищем при охолодженні у воді є формування парової плівки, яка на початковій стадії уповільнює теплообмін.

До важливих переваг води, як гартівної речовини, відносяться: мала вартість, нешкідливість для здоров'я та довкілля, руйнівна дія на окалину у випадку нагрівання виробів у окисному середовищі; стабільність (відсутність дисоціації) при контакті із нагрітими до температур 800...900 °С виробами, легкість розчинення неорганічних (солей, лугів, кислот), органічних сполук та газів. Водночас вода має низку вад: корозійна дія на поверхню виробів зі сталі; низька температура кипіння порівняно із мінеральними маслами (100 °С та 220...270 °С відповідно); велика залежність охолоджувальної здатності води від її температури; залежність швидкості охолодження виробів від їх температури; співпадіння максимальної швидкості охолодження із інтервалом температур мартенситного перетворення 380...100°С, що викликає великі структурні напруження, деформацію і небезпеку виникнення тріщин.

Таблиця 2 – Відносна охолоджувальна здатність газів порівняно із водою

Гартівне середовище	Швидкість руху, м/с	Відносна швидкість охолодження зразка при 100 °С
Вода	-	1,0
Повітря	-	0,043
	6	0,112
	44	0,350
	91	0,47
Азот	6	0,08
	44	0,31

Водні розчини. Навіть невеликі домішки названих речовин приводить до суттєвих змін в кінетиці охолодження порівняно із чистою водою. Як домішки використовують NaCl, CaCl₂, Na₂CO₃, HCl, H₂SO₄ із концентрацією 2,5...20 % масових часток.

Розчинені у воді солі, кислоти, луги, підвищують її охолоджувальну здатність за рахунок зменшення стійкості парової сорочки, а при концентраціях, наприклад, 10...15 % NaCl до повного запобігання виникнення сорочки.

Для підвищення інтенсивності тепловідведення застосовують солоні розчини (NaCl, CaCl₂), які руйнують парову плівку і забезпечують більш рівномірне охолодження. Солоні розчини використовують обмежено, оскільки вони характеризуються високою корозійною активністю та максимально високим рівнем термічних напружень у матеріалі.

Мінеральні масла. Мінеральні масла на нафтовій основі забезпечують середню інтенсивність охолодження та дозволяють знижувати деформації і внутрішні напруження при гартуванні. Масла застосовують для легованих, інструментальних та високолегованих сталей, яким не потрібна надмірно висока швидкість охолодження. Значною перевагою масел є стабільність охолодження протягом процесу. Їхнім недоліком є пожежонебезпечність, а також потреба контролювати температуру масла, оскільки її підвищення зменшує охолоджувальну здатність середовища.

Таблиця 3 – Порівняльна характеристика охолоджувальних середовищ

Середовище	Швидкість охолодження	Ризик утворення тріщин	Деформації
Солоня вода	дуже висока	дуже великий	великий
Вода	висока	великий	великий
Масло	середня	середній	середній
Полімерні розчини	керована	низький/середній	низький
Повітря/газ	низька	мінімальний	мінімальні
Соляні ванни	рівномірна	мінімальний	мінімальні

Масло менш трудомістке при контролі та спостереженні і за цими показниками поступається лише воді. Але поряд із цими позитивними даними є низка суттєвих недоліків гартівних масел:

- ✓ недостатня швидкість охолодження в інтервалі температур мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту (727...550°C) вуглецевих та малолегованих сталей;
- ✓ займистість, пожежонебезпечність, виділення шкідливих для здоров'я персоналу газів та пари;
- ✓ необхідність улаштування потужної системи вентиляції та охолодження олій, вживання конструктивних заходів з пожежобезпечності;
- ✓ підвищені витрати внаслідок винесення із виробами та випаровування;
- ✓ необхідність промивання виробів у лужних розчинах і, як наслідок, зв'язана із цим нейтралізація стоків.

Мінеральне масло має наступні властивості густина – 880...900 кг/м³, теплоємність – 2,0...2,1 кДж/(кг·К), теплопровідність близько 0,127 Вт/(м·К), теплота випарування – 170...250 кДж/кг.

Властивості масла залежать від хімічного складу, ступеня чистоти, температури та терміну експлуатації. Одним із забрудників масла є вода, яка потрапляє внаслідок нещільностей у системах охолодження олії, конденсації водяної пари, зберігання олії у негерметичній тарі. Уже при вмісті води 0,2 % парова оболонка зберігається до досить низьких температур, охолодження протікає нерівномірно і це сприяє підвищенню деформації, утворенню м'яких плям, тріщин.

Полімерні розчини. Водні розчини поліалкіленгліколів (PAG) характеризуються можливістю регулювання інтенсивності охолодження за рахунок зміни концентрації полімеру, швидкості перемішування та температури розчину. Полімерні середовища застосовують у випадках, коли необхідно забезпечити контрольований тепловідвід і мінімізувати ризик тріщиноутворення та деформацій. Вони знаходять використання в сучасних технологіях поверхневого зміцнення та термозміцнення відповідальних деталей у машинобудуванні та авіабудуванні.

Використовуючи різні полімери для створення гартівних середовищ, розроблено розчини як замітники олії, так і ті, що заповнили нішу в охолоджувальній здатності між водою та олією. До складу 5...30 % розчинів входять полівініловий спирт, полігліколь оксиалкіловий, натрієвий полікрилан, поліакрилоамід, поліакрилова сіль заліза тощо. Механізм впливу, наприклад, полівінілового спирту на кінетику охолодження полягає у протіканні на поверхні виробів процесу полімеризації. Утворений при високих температурах шар полімерних сполук знижує при температурах нижче 400°C швидкість охолодження. До недоліків цих середовищ необхідно віднести:

- ✓ підвищена швидкість охолодження при низьких температурах;
- ✓ важке усунення із поверхні виробів, стінок гартівних баків, труб системи охолодження полімерних резиноподібних сполук;
- ✓ термічна дисоціація сполук приводить до утворення оцтової кислоти і, як наслідок, до корозії обладнання;
- ✓ неконтрольовані зміни охолоджувальної здатності в процесі експлуатації.

Газові середовища. До газових середовищ належать повітря, азот, аргон та гелій. Газове охолодження забезпечує низьку інтенсивність тепловідведення і застосовується для високолегованих сталей і сплавів, які мають високу прогартуваність. Газове гартування є характерним для вакуумних печей, оскільки воно забезпечує стабільність розмірів і чистоту поверхні деталей без утворення окалини. Гелій та аргон використовують у випадках підвищених вимог до однорідності та чистоти поверхні.

Швидкість охолодження визначається за рівнянням:

$$v_o = dt/dt \text{ K/c.}$$

Водночас похідна тривалості охолодження згідно із рівнянням Старка дорівнює:

$$d\tau = \frac{G \cdot c}{F \cdot \alpha_c} \cdot \frac{dt}{t_b - t_c},$$

де G – маса виробу;

c – теплоємність матеріалу виробу;

F – площа поверхні виробу;

α_c – сумарний коефіцієнт тепловіддачі; t_b - температура виробу;

t_c – температура гартівного середовища.

Згідно із рівнянням тривалість охолодження буде тим меншою, чим більше значення α_c . В свою чергу $\alpha_c \gg (w \cdot p) \cdot 0,7$, де w – швидкість руху газу, p – тиск газу. Таким чином, основним чинником, який дозволяє регулювати швидкість охолодження в газах – є його швидкість. Так, наприклад, повітря при швидкості руху 20 м/с і температурі 20 °С дозволяє охолоджувати зі швидкістю близько 60 К/с.

Охолодження у повітряному середовищі забезпечує мінімальне жолоблення, використовується при гартуванні листів, тонкостінних виробів, труб, дроту, виготовлених зі сталей із підвищеною стійкістю аустеніту. При гартуванні стисненим повітрям використовують пристрої, конструкція котрих пристосована до форми та маси виробів і повинна забезпечити рівномірне охолодження усєї поверхні.

Соляні ванни. Соляні розплави застосовують переважно для ізотермічних процесів, таких як бейнітне гартування (мартемперинг) або патентування. Температурний інтервал їх роботи становить приблизно 150...500 °С. Соляні ванни забезпечують рівномірний тепловий режим без різких термічних градієнтів, що мінімізує внутрішні напруження та деформації.

Сходинкове та ізотермічне гартування передбачає використання середовищ з робочими температурами в межах 150...500 °С. Ураховуючи, що мінеральне масло експлуатується при температурах не вище 250°С, тому для більш високих температур широко використовують розтоплені солі, луги, суміші солей. Механізм теплообміну при охолодженні у розплавах інший, ніж при охолодженні у воді або маслі, інтенсивність теплообміну визначається згідно із законом Ньютона:

$$p = a \times Dt.$$

Питомий тепловий потік p і швидкість охолодження пропорційна градієнту температур.

Таблиця 4 – Відносна охолоджувальна здатність розтоплених солей та лугів (650...550°С)

Середовище	Відносна охолоджувальна здатність
Вода (20 °С)	1,000
KNO ₃ + NaNO ₂ (160 °С)	0,390
NaOH+ KOH (200 °С)	0,365
KNO ₃ + NaNO ₃ (250 °С)	0,334
NaOH + KOH (300 °С)	0,300
KNO ₃ + NaNO ₃ (400 °С)	0,210

Охолоджувальна здатність соляних ванн невелика. Теплопровідність розтоплених солей на два порядки менша, ніж розтоплених металів, але теплоємність солей значно вища (у 8...10 разів), ніж у металів. Завдяки цьому, а також меншій в'язкості соляних розплавів, охолоджувальні здатності як розтоплених металів так і солей близькі.

Охолоджувальні середовища у процесі гартування є одним із критично важливих технологічних факторів, які визначають характер фазових перетворень, і відповідно, властивості та якість сталевих деталей. Вибір середовища повинен здійснюватися з урахуванням хімічного складу сталі, прогартуваності, геометричних параметрів виробу, а також вимог до рівня залишкових напружень та деформацій.

Розтоплені NaOH та KOH більш безпечні порівняно із NaNO_2 , KNO_2 і не приводять до окислення поверхні. Після гартування в лугах виробу ретельно промивають для вилучення залишків солей.

Основний недолік лужних ванн – значно менша експлуатаційна довговічність і стабільність властивостей. Внаслідок поглинання із повітря CO_2 утворюються карбонати Na та K, збільшується в'язкість та погіршується охолоджувальна здатність ванни.

Швидкість охолодження в розтоплених лугах та селітрах не перевищує 300 K/с, найчастіше знаходиться в межах 50...200 K/с.

Таблиця 5 – Орієнтовний вибір середовища охолодження

Матеріал	Рекомендоване середовище
Доевтектоїдні вуглецеві сталі	вода
Сталі типу 40X, 30XГСА	масло
Інструментальні сталі (X, XГ, P6M5)	масло або комбіновані режими
Аустенітні нержавіючі сталі	газові середовища
Жароміцні Ni-сплави	газове або вакуумне охолодження

Охолодження сталі зі швидкістю, яка забезпечує перетворення аустеніту у мартенсит, приводить до досягнення двох протилежних результатів:

- ✓ збільшення твердості, міцності та інших властивостей;
- ✓ зміни розмірів та форми виробів, виникнення напружень.

Вибір матеріалу виробу та середовища для гартування дозволяє оптимізувати поєднання названих результатів. Практично здійснюється вибір гартівного середовища для заданого конструктором матеріалу виробу. При виборі середовища ураховуються наступні критерії:

- ✓ кінетика фазових перетворень у сталі, яка описується відповідними діаграмами (ізотермічною, термокінетичною);
- ✓ прогартуваність сталі у різних середовищах;
- ✓ розміри поперечного перетину та складність виробу;
- ✓ вимоги до розподілу твердості у різних точках перетину;
- ✓ тип і конструкція гартівного пристрою;
- ✓ спосіб контакту середовища із виробом і інтенсивність його циркуляції;
- ✓ умови безпеки та охорони довкілля;
- ✓ вартість і її складові: перше наповнення ванни; відновлення втрат при випаровуванні та винесенні; вартість на промивання та очищення тощо.

Найбільш суттєвими із наведених критеріїв, які врешті решт визначають вибір гартівного середовища, є прогартуваність та кінетика перетворень; характеристика гартівних середовищ та інтенсивність гартування; тип та конструкція гартівних пристроїв.

Твердість і структура сталі залежать від швидкості охолодження після аустенізації. Крім, того, існує кореляція між швидкістю охолодження вздовж зразка в перетинах різних діаметрів та на торці. Тому, при виборі гартівного середовища треба звернути увагу на вимоги щодо розподілу твердості по перетину, вимоги щодо наскрізної прогартуваності. Для порівняння розмірів виробу із характеристиками матеріалу слід із довідників отримати дані про смугу прогартуваності та прогартуваність сталі у різних середовищах. Найбільш суттєвою є тривалість охолодження в інтервалі 800...500°C. Час охолодження повинен бути настільки коротким, щоб уникнути перетворення А→П, а у високолегованих інструментальних сталях – запобігти виділенню карбідів. Порівняння інкубаційного періоду на термодіаграмі та на кривій охолодження в даному середовищі, наприклад, маслі, воді, повітрі, дозволить оцінити його придатність для гартування сталі. Вимоги до гартівних середовищ: відсутність негативного впливу середовища на атмосферу печі, внутрішні поверхні печі і усього агрегату. У випадку аустенізації в камерних, шахтних печах немає обмежень у виборі гартівного середовища, тому що їх внутрішній простір не з'єднується із гартівними баками. Гартування в пресах вимагає використання масла із великим опором до випаровування, повільним охолодження при низьких температурах і малим впливом швидкості руху на охолоджувальну здатність.

Агрегати безперервної дії (штовхальні, конвейєрні, барабанні) включають до свого складу камеру, заповнену не тільки пічною атмосферою, але і парою гартівного середовища. Якщо в атмосфері печі припустимий підвищений вміст водяної пари, то гартівною речовиною може бути вода. У випадку, коли вимагається повна відсутність знеуглецювання, то гартівна рідина – лише мінеральне масло. Гартування після аустенізації (гомогенізації) у вакуумних печах не створює обмежень в виборі середовища для охолодження, але найчастіше використовують газові охолоджувальні середовища.

Різке охолодження у воді скорочує термін експлуатації технологічного пристосування. Селітрові та лужні солі важко вилучаються із пристосувань. Найбільш доцільне використання мінеральних масел малої в'язкості, які мають високу охолоджувальну здатність, менш пожежонебезпечні і добре вилучаються при промиванні виробів.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. Засвоїти дані про властивості різних контрольованих середовищ для нагріву та гартівних середовищ (теплоємність, теплопровідність, густину) та їх термодіаграмні характеристики.

2. Сформулювати уявлення про процеси, що відбуваються із гартівною речовиною при різних температурах, і механізми передачі тепла від виробу до середовища.

3. Засвоїти основи вибору контрольованих середовищ та гартівного середовища і знати про роль діаграм ізотермічного та термокінетичного перетворення при вирішенні цієї задачі.

4. Обґрунтувати вибір охолоджувального середовища для заданої деталі з певного сплаву (виданого викладачем), використовуючи теоретичний матеріал.

5. Заповнити таблицю 3 у відповідності до отриманих сталей

Питання для самоконтролю

1. Пояснити вплив температури води на її термокінетичні характеристики.

2. Охарактеризувати переваги та недоліки водних розчинів солей та лугів, як середовищ для гартування.

3. Як і чому впливають розчинені у воді полімерні сполуки на її охолоджувальну здатність ?

4. Як впливають домішки та термін використання на властивості мінерального масла ?

5. Яку роль відіграють термокінетичні та ізотермічні діаграми перетворення аустеніту на вибір гартівного середовища?

Практична робота №3

Поверхнєве загартування (при нагріванні СВЧ та інших видах нагріву).

Технологія ТО при індукційному нагріві

Мета роботи – ознайомитися з фізичною сутністю поверхневого загартування сталей, принципами індукційного нагріву струмами високої частоти, особливостями формування загартованого шару та впливом параметрів процесу на структуру і властивості деталей машин.

Теоретичні відомості

Деталі машин під час роботи зазнають одночасно значного тертя й ударних навантажень. Такі умови їх роботи вимагають, щоб поверхневий шар металу мав високу твердість і зносостійкість і в той же час м'яку та в'язку серцевину, яка добре сприймала б опір ударів. Цих властивостей можна надати виробу поверхневим гартуванням, тобто такою термообробкою, коли нагрівається й охолоджується лише поверхневий шар з метою зміни структури металу зовнішньої частини виробу без зміни структури серцевини.

Поверхнєве гартування належить до процесів, що відбуваються дуже швидко; тому поверхні виробів майже не окислюються і не деформуються, що є важливою перевагою процесу.

Застосування поверхневого гартування замість звичайного підвищує продуктивність праці та знижує собівартість продукції. Поверхнєве гартування є різновидом термічної обробки, метою якої є створення на поверхні деталі шару з високою твердістю та зносостійкістю при збереженні в'язкої, міцної серцевини. Такий структурний стан є оптимальним для деталей, що працюють в умовах контактних і циклічних навантажень, зокрема зубчастих коліс, валів, кулачків, напрямних і осей.

Фізичною основою поверхневого загартування при індукційному нагріві є явище поверхневого ефекту, згідно з яким змінний електричний струм високої частоти протікає переважно в приповерхневому шарі провідника. У результаті теплота виділяється безпосередньо в тонкому поверхневому шарі металу, що забезпечує надзвичайно швидкий нагрів до температур аустенізації без значного прогріву серцевини.

Таблиця 1 – Класифікація методів поверхневої термообробки

Методи поверхневої термообробки			
Індукційне нагрівання	Електроконтактне нагрівання	Нагрівання в електроліті	Газополуменеве нагрівання
Струм високої частоти (500...10000000 Гц) поступає в індуктор, який обхвачує деталь. Час нагріву 1,5...10 с. Глибина прогріву сталі до температури гартування приблизно дорівнює товщині загартованого шару. Деталі швидко охолоджують в потоці води (чи мастила) або занурюють у воду (чи мастило)	Поверхневий шар виробу нагрівають струмом низької напруги (2...6 В) високої густини, створюючи контакт за допомогою мідних електродів через метал, що нагрівають. Охолодження нагрітого шару виконується струменем води чи мастила	Виконується в ванні шляхом пропускання струму напругою 250...350 В. Електролітом являється 5...10 % розчин Na_2CO_3 , анодом – ванна, катодом – деталь. Навколо катода виникає шар водню з високим електричним опором, тому відбувається швидкий нагрів шару деталі до температури 1800...2000 °С. Деталь охолоджують в електроліті або в гартівній ванні	Для великогабаритних виробів при одиничному або дрібносерійному виробництві є найбільш прийнятним способом. Використовують ацетилено-кисневе полум'я з температурою 3150 °С, полум'я пропан-бутанової суміші (2050 °С) чи природного газу (2000 С). Використовують горілки, за допомогою яких нагрівають шар деталі

Глибина прогріву при індукційному нагріві визначається частотою струму, електричними та магнітними властивостями матеріалу, а також тривалістю нагріву. Зі зростанням частоти глибина проникнення струму зменшується, що дозволяє регулювати товщину загартованого шару в широких межах – від часток міліметра до кількох міліметрів.

Після досягнення температури аустенізації поверхневий шар швидко охолоджується, як правило, водою або водно-полімерними розчинами, що призводить до утворення мартенситної структури. Серцевина деталі при цьому залишається у вихідному або попередньо термічно обробленому стані, забезпечуючи необхідну в'язкість і опір крихкому руйнуванню.

Існують такі способи гартування з індукційним нагріванням:

✓ одночасне нагрівання й охолодження всієї поверхні застосовується для виробів, які мають невелику поверхню зміцнення – валики, пальці, вінці зубчатих коліс з модулем до 10 мм інструмент тощо (рис. 1, а);

✓ неперервно-послідовне нагрівання й охолодження застосовується для гартування виробів, що мають велику довжину – вали й осі, рифлені циліндри, великомодульні по робочих поверхнях зуба шестерні тощо (рис. 1, б).

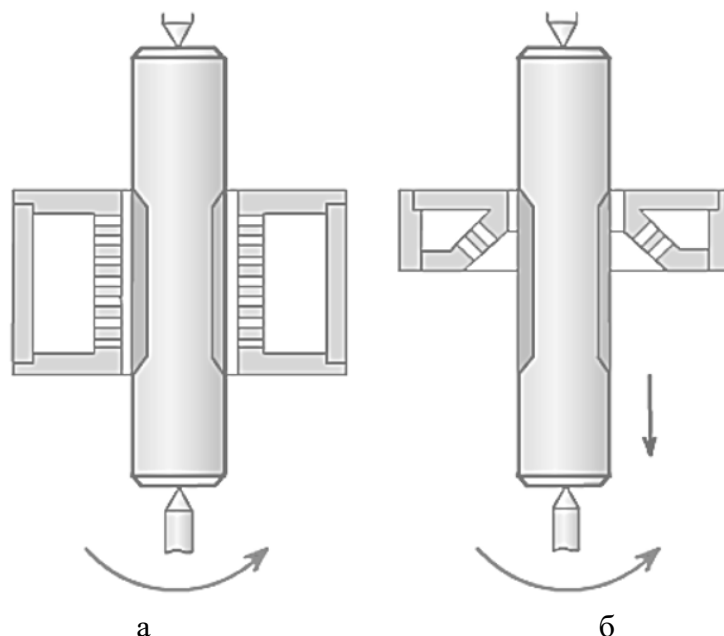


Рисунок 1 – Схеми поверхневого гартування виробів при нагріванні СВЧ:
 а – одночасне нагрівання й охолодження всієї поверхні;
 б – неперервно-послідовне нагрівання й охолодження

Таблиця 2 – Залежність температури нагріву під гартування від швидкості нагріву

Марка сталі	Температура нагрівання в печі, °С	Нагрів СВЧ зі швидкістю °С/с			
		100	250	400	500
10	840...860	850...900	880...920	930...980	960...1020
45	810...860	830...880	860...910	900...950	930...1000
50	820...840	810...850	830...880	870...920	900...960
40Х	850...870	830...880	860...920	900...960	960...1000
50Г	820...840	810...850	830...880	870...920	900...960
У8	790...820	780...820	780...850	780...860	820...920
У12	760...780	780...820	780...850	780...860	820...920

Одним із найпоширеніших методів поверхневого зміцнення є спосіб індукційного гартування виробів струмами промислової чи високої частоти (СВЧ). При нагріванні СВЧ використовується явище індукції і поверхневого розподілу індукovanого струму в деталі.

Деталь встановлюється в індуктор (соленоїд), що являє собою один або кілька витків пустотілої мідної трубки, яка охолоджується водою.

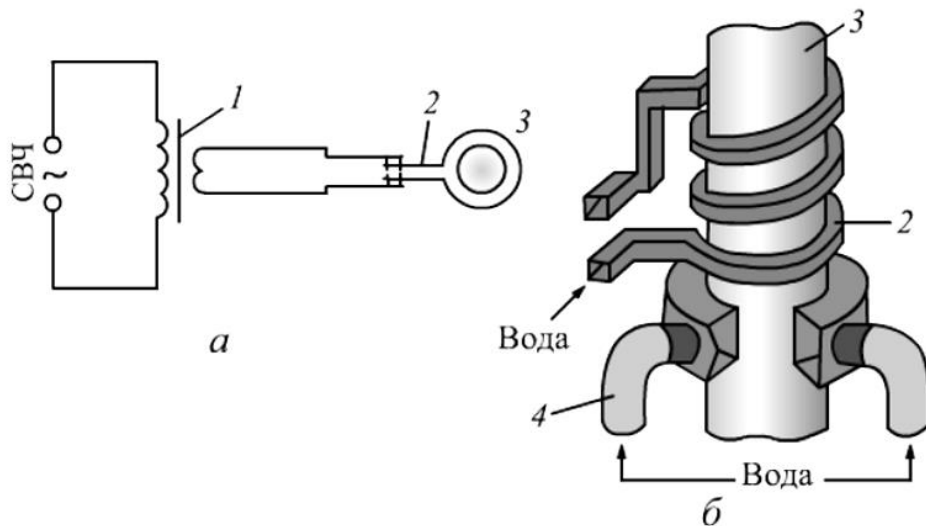


Рисунок 2 – Принцип дії індуктора установки для високочастотного нагрівання виробів:
 а – принципова схема;
 б – загальний вигляд:
 1 – трансформатор; 2 – індуктор;
 3 – виріб; 4 – душовий пристрій.

Струм високої частоти від машинного чи лампового генератора через трансформатор 1 подається в індуктор 2 і створюється магнітне поле, яке викликає появу у виробі 3 індукваного струму тієї ж частоти, але оберненого напрямку (рис. 2). Охолодну рідину (воду, водяні розчини полімерів) для гартування подають через пристрій для розпилення – душовий пристрій 4.

Товщина загартованого шару може бути розрахована за формулою:

$$y = 4,46 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}$$

де ρ – питомий електроопір, Ом·м; μ – магнітна проникність, Гн/м; f – частота, Гц.

Індукований струм викликає розігрівання поверхні виробу.

Особливістю індукваного струму є неоднакова нерівномірна густина струму по перерізу виробу. Струм концентрується здебільшого на поверхні, а його густина зменшується до центру виробу.

Чим менша частота струму, тим більша глибина шару, що нагрівається. Якщо застосувати струм малої частоти (промисловий), то індукований струм проходитиме по всьому перерізу деталі і викликати суцільне нагрівання. Струм більш високої частоти сильніше відтискується від центра до поверхні виробу. Цю властивість СВЧ концентруватися на поверхні виробу, що нагрівається, називають поверхневим ефектом, або скін-ефектом.

Індукційне нагрівання забезпечує високу швидкість нагрівання. Швидкість нагрівання СВЧ f залежно від ρ , μ складає 50...500 °C/с, а при звичайному пічному нагріванні вона не перевищує 1...3 °C/с. Нагрівання до температури гартування відбувається за 2...10 с.

Глибина шару – 2...5 мм. Великі швидкості нагрівання призводять до того, що перетворення перліту в аустеніт (A_{c3}) зміщується в область більш високих температур, а ріст зерна аустеніту не встигає проходити, тому

температура гартування при індукційному нагріванні вища, ніж при нагріванні в печах, де швидкість нагрівання не перевищує 1,5...3 °С/с.

Таблиця 3 – Частоти струму, рекомендовані для індукційного гартування виробів на задану глибину

Параметр	Глибина гартованого шару, мм						
	1	1,5	2	3	4	6	10
Найвища частота струму, кГц	250	100	60	30	15	8	2,5
Найнижча частота струму, кГц	15	7	4	1,5	1	0,5	0,15

Після гартування з індукційним нагріванням вироби піддають низькому відпуску при 160...200 °С, іноді й самовідпуску. У цьому випадку при гартуванні охолодження проводять не до кінця, і в деталі зберігається деяка кількість теплоти, що і нагріває загартований шар до температур відпуску.

Структура на поверхні – мартенсит відпуску, а у внутрішніх об'ємах за відсутності попередньої термічної обробки зберігається ферито-перлітна структура. Для покращення механічних характеристик перед гартуванням СВЧ проводять поліпшення або нормалізацію.

Після гартування з індукційним нагріванням дійсне зерно аустеніту значно менше (10...12 бал), ніж після звичайного гартування з пічним нагріванням (7...8 балів). Дрібне зерно утворюється внаслідок великої швидкості нагрівання і відсутності витримки при нагріванні. При цьому утворюється дрібногочастий мартенсит з твердістю HRC, на 3...6 одиниць вищою ніж при пічному нагріванні.

При поверхневому гартуванні значно підвищується межа утомлюваності сталі. Так, для сталі 40 після нормалізації вона складає 150 МПа, а після поверхневого гартування з індукційним нагріванням – 420 МПа. Підвищення межі утомлюваності пояснюється утворенням у загартованому шарі залишкових напружень стискування. Це особливо важливо для осей і валів, що працюють на згин і кручення, у яких максимальні напруження розтягу виникають у поверхневих шарах.

До переваг належать: можливість виконання місцевої термообробки виробів, безшумність, мале окалиноутворення та висока культура виробництва.

Наприклад: зубчасті колеса автомобілів та редукторів виготовляють зі сталей типу 40Х або 45. Поверхнєве індукційне гартування зубців до температури 880...900 °С з наступним охолодженням водою дозволяє отримати твердість поверхневого шару 52...58 HRC при збереженні в'язкої серцевини з твердістю 28...32 HRC. Така комбінація властивостей суттєво підвищує контактну витривалість і довговічність деталей.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. За заданою маркою сталі обрати доцільну частоту індукційного нагріву.
2. Визначити орієнтовну глибину загартованого шару.
3. Обґрунтувати вибір температури нагріву та охолоджуючого середовища.
4. Пояснити переваги поверхневого загартування для заданої деталі.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає фізична сутність індукційного нагріву?

2. Які параметри визначають глибину загартованого шару?
3. Чому при поверхневому гартуванні зменшуються деформації деталей?
4. Які обмеження має метод індукційного загартування?
5. Яких властивостей можна надати виробу поверхневим гартуванням?
6. Які ви знаєте методи поверхневої термообробки?
7. Як залежить глибина шару, що нагрівається, від частоти струму?
8. Назвіть способи гартування з індукційним нагріванням.
9. Назвіть переваги гартування виробів з використанням індукційного нагрівання.
10. Завдяки чому відбувається електроконтактне нагрівання поверхні виробів?
11. Назвіть переваги та недоліки гартування виробів із використанням електроконтактного нагрівання.
12. Назвіть дефекти поверхневої термообробки виробів і методи їх уникнення.

Практична робота №4

Технологія ТО деталей штампового та різального інструменту

Мета роботи – ознайомитися з особливостями термічної обробки штампового та різального інструменту, вивчити вплив режимів гартування і відпуску на мікроструктуру та експлуатаційні властивості інструментальних сталей, а також навчитися обґрунтовувати вибір режимів термічної обробки залежно від умов роботи інструменту.

Теоретичні відомості

Штамповий і різальний інструмент працює в умовах високих контактних напружень, інтенсивного тертя, ударних і циклічних навантажень, а в ряді випадків — підвищених температур. Саме тому до матеріалів інструменту висуваються підвищені вимоги щодо твердості, зносостійкості, теплостійкості та опору крихкому руйнуванню.

Основним способом досягнення необхідного комплексу властивостей інструментальних сталей є правильно підібрана термічна обробка, яка, як правило, включає гартування та багаторазовий відпуск. Гартування забезпечує формування мартенситної структури з високою твердістю, тоді як відпуск знижує внутрішні напруження, стабілізує структуру та підвищує в'язкість.

Інструментальні сталі поділяють на вуглецеві, леговані та швидкорізальні. Вуглецеві інструментальні сталі застосовують для інструменту, що працює при невисоких температурах і швидкостях різання. Леговані інструментальні сталі характеризуються підвищеною прогартуваністю та зносостійкістю, що дозволяє використовувати їх для штамів холодного деформування. Швидкорізальні сталі призначені для роботи при високих швидкостях різання і зберігають високу твердість навіть при нагріві до 500...600 °С.

Вибір температури гартування для інструментальних сталей має принципове значення. Недостатній нагрів призводить до неповного розчинення

карбідів і зниження твердості, тоді як перегрів викликає ріст зерна аустеніту та підвищує схильність до крихкого руйнування. Особливо чутливими до режимів нагріву є швидкорізальні сталі, для яких необхідно забезпечити оптимальне розчинення легувальних карбідів.

Після гартування інструментальні сталі мають мартенситну структуру з різним вмістом залишкового аустеніту та карбідної фази. Вуглецеві інструментальні сталі характеризуються високою твердістю, але низькою в'язкістю. Леговані сталі мають більш дрібнозернисту структуру, що забезпечує підвищену тріщиностійкість. У швидкорізальних сталях після відпуску формується структура відпущеного мартенситу з дисперсними карбідами, що забезпечує поєднання високої твердості та теплостійкості.

Сталі низької прогартуваності. До таких відносяться вуглецеві сталі якісні У7, У8... У13 і високоякісні У7А, У8А... У13А (вміст Mn 0,15...0,40% і Cr 0,15%).

Низька твердість в стані поставки (2000 НВ) дозволяє виготовляти з них інструмент способом різання і деформації.

Висока твердість (62...65 HRC) різального інструмента досягається шляхом загартування з температури $t_0 = +20^\circ\text{C}$ в розчинах солей та лугів, що забезпечує велику швидкість охолодження. Оскільки стійкість аустеніту вуглецевих сталей невисока, то продуктивність їх мала ($d_{кр} \leq 15$ мм). Ці сталі застосовують для виготовлення дрібного інструмента (зубила, плашок і матриць) з поперечним перерізом до 25 мм з незагартованою серцевиною. Незагартована серцевина збільшує стійкість інструмента при ударних навантаженнях, а також сприяє зменшенню деформації при загартуванні.

Гартування цих сталей від температур $t_0 > A_{cm}$ небажане, бо викликає короблення (деформацію) інструмента і веде до збільшення кількості залишкового аустеніту, для переведення якого в мартенсит потрібна додаткова обробка холодом.

Після гартування інструмент піддають низькотемпературному відпуску: для збереження високої твердості (62...63 HRC) при $150...180^\circ\text{C}$, 1...2 год., а для збільшення в'язкості – при $220...250^\circ\text{C}$, при ньому твердість становить 55...60 HRC.

До сталей низької прогартуваності відносять ряд низьколегованих сталей ХРА, В2Ф, 9ХФ, 11ХВ з вмістом 0,4...0,7 % Cr і 1,15...0,30 % V, а також сталі з вольфрамом. Хром трохи підвищує прогартуваність ($d_{кр} = 15...25$ мм), ванадій забезпечує стійкість до перегріву, а вольфрам збільшує твердість і зносостійкість завдяки присутності карбіду W_6C .

За структурою ці сталі відносяться до заевтектоїдних перлітного класу, їх хімічний склад, режим ТО і твердість приведена в табл. 1 дод. Сталь В2Ф застосовують для виготовлення пилок по металу, а з сталей ХВ4, 9ХФ виготовляють різальний інструмент (різці, фрези).

Недоліком сталей низької прогартуваності є їх низька теплостійкість: виготовлений з них інструмент втрачає твердість при нагріванні вище 2000°C , в зв'язку з чим різання слід проводити лише при невеликих швидкостях.

Сталі підвищеної прогартуваності. Сталі цієї групи мають більшу прогартуваність ($d_{кр} = 25$ мм), завдяки легуванню хромом (1,3...1,6 %),

марганцем (0,3...1,1 %), кремнієм (0,2...1,65), вольфрамом, ванадієм та іншими елементами. З цих сталей виготовляють крупний різальний інструмент і загартовують його в маслі, що зменшує деформацію і не допускає утворення тріщин та короблення. Для збереження високої твердості проводять відпуск при 150...160 °С, а для збільшення в'язкості призначають відпуск при підвищеній температурі (до 300 °С), при цьому забезпечується твердість 55...60 HRC.

Прикладом можуть бути сталі X, 11XB, 13X, B2Ф, XB4, 9XC, XBГ, XBСГ, вища теплостійкість і твердість (62...69 HRC) яких, порівняно з вуглецевими, забезпечується легованим цементитом і карбідом хрому Cr₇C₃, які затримують розпад мартенситу при нагріванні.

Однак сталі цієї групи, як і вуглецеві, мають порівняно низьку теплостійкість (200...250 °С, деякі до 300 °С), а тому придатні для різання м'яких матеріалів (наприклад, дерева) при невеликих і середніх швидкостях.

Швидкорізальні сталі. До цієї групи відносяться високолеговані сталі, з яких виготовляють різальний інструмент високої продуктивності. Основна їх властивість – висока теплостійкість (600...650 °С), яка забезпечується значним вмістом вольфраму разом з другими елементами (Mo, Cr, V), що утворюють карбіди, а також кобальтом (табл.1 додатку). W і Mo утворюють леговані карбіди змінного складу (Fe, W)₃C, типу M₆C, і затримують розпад мартенситу. Cr утворює карбід Cr₂₃C₆, V утворює карбід VC дуже високої твердості і зносостійкості. Со карбідів не утворює, але збільшує теплопровідність і дисперсність карбідів других легуючих елементів, завдяки чому значно підвищує теплостійкість.

Швидкорізальні сталі містять в своєму складі порівняно мало вуглецю (0,7...0,95 %) і до 25 % легуючих елементів.

Вважається, що оптимальним (завдяки економії W) є хімічний склад, в якому сума W+1,5Mo = 12...13 %, що має місце в сталі P6M5, об'єм виробництва якої складає 80 % від усього виробництва швидкорізальних сталей.

Групу швидкорізальних сталей підрозділяють на сталі нормальної теплостійкості (P18, P9, P6M5, P9Ф5, P12 – теплостійкість 620°С, HRC > 58) та сталі підвищеної теплостійкості (P18K5Ф2, P9K10, P9M4K8, P9Ф5, P2AM9K5, P6M5K5, теплостійкість 650°С, 64 HRC), що містять > 2 % V.

Ще вищу теплостійкість (до 650...700 °С) можна одержати шляхом додаткового введення ванадію і кобальту (P9K10, P18K5Ф5, P10Ф5K5).

Сталі підвищеної теплостійкості менш міцні і пластичні, ніж сталі нормальної теплостійкості, мають більшу вартість, і використовуються для обробки різанням важкооброблювальних матеріалів (корозійностійких сталей з аустенітною структурою).

За структурою після відпалу швидкорізальні сталі відносяться до ледебуритного класу і в зливках містять крихку ледебуритну евтектику (рис.1, а). Загальна кількість карбідів (первинних і вторинних) в цих сталях складає 22...28 %. Карбідна ліквіація знижує стійкість інструмента і збільшує його крихкість. Усунути цей недолік можна шляхом подрібнення первинних карбідів при гарячому деформуванні (куванні) (рис. 1, б).

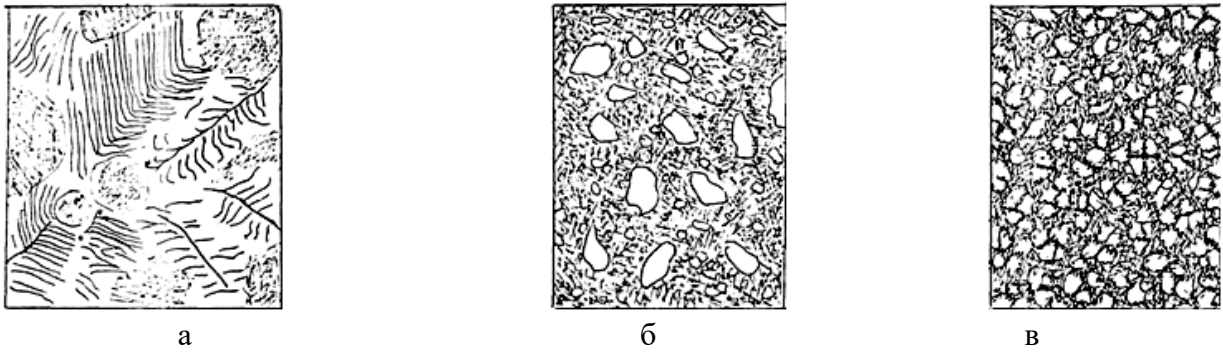


Рисунок 1 – Мікроструктура швидкорізальної сталі:
а) в литому стані; б) після деформування; в) після термічної обробки

Підготовку до обробки різанням і до загартування швидкорізальної сталі проводять шляхом відпалу при 840...880 °С (сталь Р6М5 – при 800...830 °С), що веде до зниження твердості (2500...3000 НВ). Структура відпаленої сталі – дрібнозернистий перліт (сорбіт) + надлишкові карбіди (в основному M_6C). Саме в карбідах знаходиться більша частина легуючих елементів.

Високі експлуатаційні властивості інструмента з швидкорізальних сталей одержують після загартування і трьохкратного відпуску (рис. 2. а).

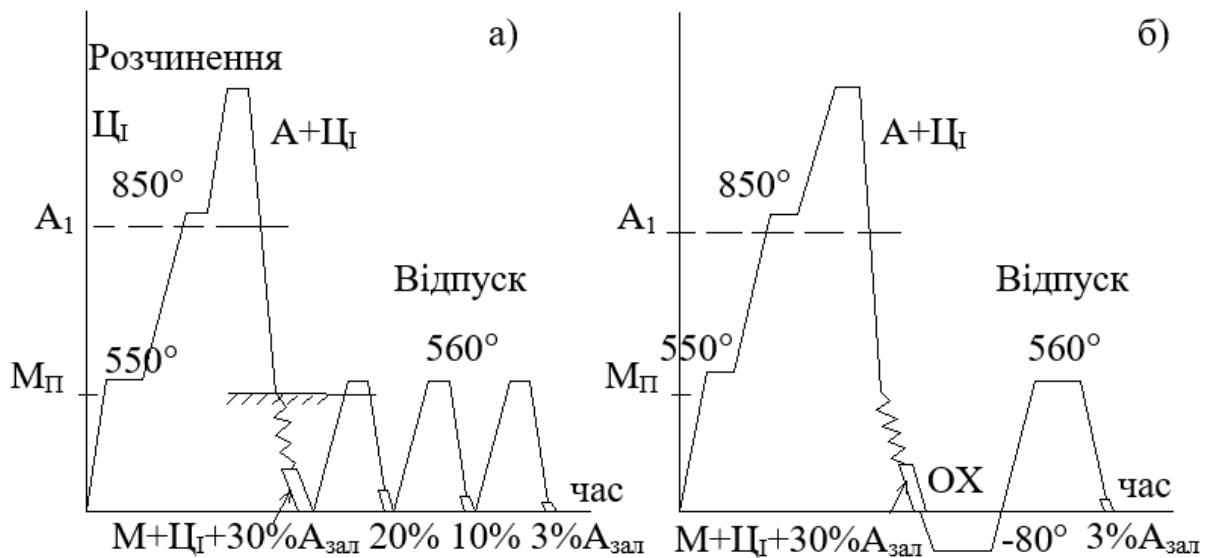


Рисунок 2 - Схема термічної обробки швидкорізальної сталі Р18

Інструмент під загартування нагрівають повільно: спочатку до 550 °С, а потім до 850 °С, що дозволяє вирівняти температуру по перерізу. Після чого нагрівають швидко до 1290 °С, витримуючи протягом короткого часу з розрахунку 10 с на 1 мм товщини, що не допускає окислення, росту зерна та вигорання вуглецю. Висока температура нагріву необхідна для розчинення легуючих елементів в аустеніті, з якого утворюється високолегований теплостійкий мартенсит. Після загартування в оливі сталь Р18 містить 55 % мартенситу, 30 % залишкового аустеніту (оскільки $M_k > 0$ °С) і 15 % нерозчинених первинних карбідів. Для перетворення залишкового аустеніту в мартенсит необхідний трьохкратний відпуск протягом 50 хв. Кожний, при якому з мартенситу виділяються спеціальні карбіди (дисперсне тверднення

мартенситу). Підвищення твердості при цьому до 65 HRC обумовлюється як перетворенням залишкового аустеніту в мартенсит, так і дисперсним твердненням.

Трьохкратний відпуск можна замінити обробкою холодом (ОХ) після загартування і однократним відпуском (рис.2, б). Для підвищення твердості ріжучої крайки до 10000 HV проводять низькотемпературне ціанування.

Штампові сталі. Штампові сталі відносяться до теплостійких і напівтеплостійких.

Сталі для штамів холодного деформування. Основні вимоги: висока твердість, зносостійкість, міцність, опір пластичній деформації (збереження форми) і підвищена в'язкість. Штампи холодного деформування працюють в умовах ударних навантажень, в процесі деформування нагріваються до 200...300°C, і повинні зберігати твердість при цих температурах.

Для виготовлення штамів невеликих розмірів (до 20 мм) використовуються вуглецеві сталі. Після гартування з непрогартованою серцевиною і відпуску на твердість 58 HRC вони мають високу зносостійкість і ударну в'язкість. Для більш крупних штамів застосовуються сталі підвищеної прогартовуваності (Х,ХГС, ХВГ) або сталі з нижчим вмістом вуглецю (6ХС, 7ХФ, 7ХГ2ВМ), які після термічної обробки (загартування з 870...900 °С, відпуск при 450 °С) мають твердість 45...50 HRC. Згадані вище сталі відносяться до нетеплостійких (до 220 °С). Особливу групу складають сталі з підвищеним вмістом хрому (від 6 до 12 %): Х6ВФ, Х12, Х12М. Ці сталі відносяться до ледебуритного класу, мають високу твердість після загартування і прогартовуваність до 300 мм. Вони являються напівтеплостійкими, а сталь Х12Ф4М, крім згаданих вище властивостей, має ще і високу зносостійкість. Штампи для пересування виготовляються також із теплостійких швидкорізальних сталей (Р6М5 та інші.), які мають високу твердість і зносостійкість при понижений в'язкості.

Для виготовлення тих чи інших штамів рекомендується відповідна сталь: а) для висаджування У10, У12, Х, ХВГС; б) для пресування – Х12М, Х12Ф, Р12, Р6М5, 5ХВ2С; для витягання – У10, У12, Х, ХГ2ВМ, Х12ФІ, Х6ВФ; г) для вирубаня – Х12ФІ, Х:ВФ, Р12, 4Х5Ф, Х12Ф4М, 7ХГ2ВМ.

Після загартування з температурою 860...1100 °С в оливі та відпуску 150...200°C штампи мають твердість 60...62 HRC.

Сталі для штамів гарячого деформування. Штампи для гарячого деформування працюють у важких умовах навантаження і при підвищених температурах. Деякі з них мають великі розміри і тривало контактують з гарячим металом. Тому до сталей ставлять додаткові вимоги, а саме:

- ✓ стійкість проти утворення тріщин при циклічному нагріванні і охолодженні – розпалостійкість;
- ✓ окалиностійкість;
- ✓ висока прогартовуваність, висока теплопровідність для відводу тепла.

Крупні молотові штампи нагріваються до температур 500...550 °С, їх виготовляють з напівтеплостійких сталей 5ХВМ, 5ХНВ інші, після загартування в оливі з 850 °С та відпуску при 550 °С їх твердість – до 45 HRC.

Інструмент середнього навантаження, що працює при температурах 400.600 °С, виготовляють з окалиностійких сталей 4Х5В2ФС та 4Х5МФІС, які мають велику розпалостійкість і в'язкість.

Для штамів, що працюють при температурі 600...700 °С, використовуються сталі підвищеної теплостійкості 3Х2В8Ф, 5Х3В3МФС, 3Х12В12Ф, 3Х7В7С. З них виготовляють пресформи для лиття під тиском мідних сплавів, пуансони для прошивки і ін.

Сталі для вимірного інструмента повинні довгий час зберігати незмінні розміри і добре шліфуватися. Зміна розмірів відбувається в результаті старіння, причиною якого є частковий розпад мартенситу, перетворення залишкового аустеніту і релаксація внутрішніх напруг. Для виготовлення вимірних інструментів використовують сталі вуглецеві 55, 50, 20 та низьколеговані Х, ХГ, ХВГ, 9ХС, 12Х1. Для попередження старіння інструмент гартують в оливі з низьких температур (860 °С), проводять обробку холодом та довготривалий (до 48 год.) відпуск при 120...140°С. Нерідко з метою уникнення ефектів старіння проводять цементування низьковуглецевих сталей, загартування за допомогою струмів високої частоти та азотування на високу твердість (62... 64 HRC).

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. За заданим типом інструменту обрати марку інструментальної сталі.
2. Призначити режим гартування та відпуску.
3. Обґрунтувати вибір температур нагріву і охолоджуючого середовища.
4. Пояснити можливі дефекти інструменту при порушенні режимів термічної обробки.

Питання для самоконтролю

1. Які вимоги висуваються до матеріалів різального та штампового інструменту?
2. Чому для швидкорізальних сталей застосовують багаторазовий відпуск?
3. Як впливає перегрів при гартуванні на властивості інструменту?
4. Які відмінності в режимах ТО вуглецевих і легованих інструментальних сталей?
5. Який режим зміцнення інструмента зі сталі з високим вмістом хрому для одержання підвищеної твердості?
6. Яка структура швидкорізальної сталі після ТО? Які структурні складові забезпечують теплостійкість цих сталей?

Практична робота №5

Технологія ТО деталей із високолегованих сталей

Мета роботи – ознайомитися з особливостями термічної обробки високолегованих сталей різних структурних класів, вивчити вплив легувальних елементів на фазові перетворення, мікроструктуру та властивості, а також навчитися обґрунтовувати вибір режимів нагріву, охолодження і відпуску залежно від призначення деталей.

Теоретичні відомості

Високолеговані сталі містять значну кількість легувальних елементів, зокрема хрому, нікелю, молібдену, ванадію, вольфраму та інших, які суттєво змінюють положення критичних температур, кінетику фазових перетворень і стабільність структурних складових. Саме тому режими термічної обробки таких сталей істотно відрізняються від режимів, характерних для вуглецевих і низьколегованих сталей.

За структурною ознакою високолеговані сталі поділяють на мартенситні, аустенітні та феритні. Мартенситні високолеговані сталі після гартування здатні формувати високотверду структуру і широко застосовуються для деталей, що працюють в умовах підвищених механічних навантажень. Аустенітні сталі не зазнають мартенситного перетворення при охолодженні, але відзначаються високою корозійною стійкістю та пластичністю. Феритні сталі характеризуються стабільною феритною структурою і обмеженою можливістю зміцнення термічною обробкою.

Враховуючи положення критичних точок на діаграмі стану «залізо–цементит», леговані сталі за структурою у відпаленому стані поділяють на чотири групи. Доевтектоїдні сталі характеризуються структурою фериту та перліту, евтектоїдні – структурою перліту, заевтектоїдні – перлітом і вторинними карбідами, а ледебуритні – перлітом, вторинними карбідами та ледебуритом.

Хімічний склад визначає фазовий клас сталей. Значний вміст елементів, що розширюють γ -область (Ni, Mn, Cu), зумовлює формування сталей аустенітного класу. Натомість підвищений вміст елементів, які розширюють α -область (Cr, W, Mo, V, Ti), сприяє отриманню феритних сталей.

З урахуванням впливу легуючих елементів на кінетику розпаду аустеніту, положення ізотермічних кривих, а також на температури початку (M_p) і завершення (M_k) мартенситного перетворення, леговані сталі у нормалізованому стані (охолодження на повітрі) поділяють на три основні структурні класи. Перлітний клас відповідає незначному вмісту легуючих елементів (до 5 %), мартенситний – середньому вмісту (5...13 %), а аустенітний – високому рівню легування (13...30 %).

Легуючі елементи можуть перебувати у металі у різних структурних формах: у вільному стані, у вигляді інтерметалічних фаз із залізом або між собою, у формі оксидів, у карбідній фазі (розчин у цементиті або спеціальні карбіди), а також у вигляді твердих розчинів у залізі. Відповідно, легуючі елементи переважно розчиняються в основних структурних складових сталі (ферит, аустеніт, цементит) або утворюють специфічні карбіди.

У сталях легуючі елементи впливають на ряд фундаментальних властивостей, зокрема на поліморфізм заліза. Деякі елементи, розчиняючись у залізі, підвищують температуру критичної точки A_1 та знижують температуру точки A_3 , стабілізуючи при цьому ферит.

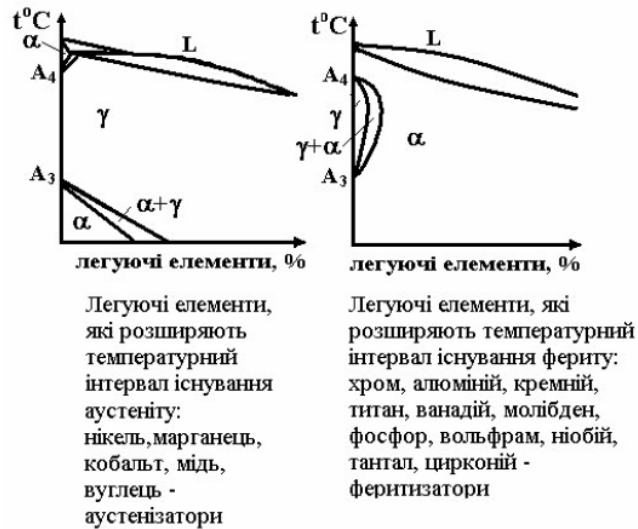


Рисунок 1 – Вплив легуючих елементів на поліморфізм заліза

Легуючі елементи істотно впливають на властивості сталей через зміну фазового складу, кінетики фазових перетворень та стабільність окремих структурних компонентів.

Розчиняючись у фериті, легуючі елементи змінюють параметри його кристалічної ґратки, що супроводжується зміною механічних властивостей. Як правило, підвищуються твердість та ударна в'язкість. Елементи з великими атомними радіусами зміцнюють ферит незалежно від швидкості охолодження.

Частина легуючих елементів утворює карбіди. Карбідоутворення характерне для елементів із недобудованою d-смугою, розташованих у періодичній системі лівіше заліза. За типом кристалічної ґратки карбіди поділяють на дві групи: карбіди зі складною ґраткою (M_3C , M_{23}C_6 , M_7C_3 , M_6C) та карбіди з простою ґраткою типу впровадження (MC , M_2C), де М – залізо або інші карбідоутворюючі елементи.

Легуючі елементи впливають на кінетику ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту, що дозволяє регулювати температурні інтервали утворення бейнітних структур. Крім того, вони впливають на прогартуваність сталі: зсуваючи вправо криві початку та кінця ізотермічного перетворення, легуючі елементи знижують критичну швидкість гартування та сприяють формуванню мартенситу в більш товстих перерізах.

Безпосередньо на механізм мартенситного перетворення легування майже не впливає, однак окремі елементи змінюють температури його початку (M_n) та завершення (M_k). Наприклад, алюміній та кобальт підвищують ці температури, а молібден – знижує, впливаючи тим самим на кількість залишкового аустеніту.

Всі легуючі елементи, за винятком марганцю та бору, зменшують схильність до росту зерна аустеніту та сприяють отриманню більш дрібнозернистої структури. Під час відпуску легуючі елементи сповільнюють розпад мартенситу, тому для легуваних сталей необхідно застосовувати вищі температури відпуску або збільшувати час витримування.

Повний комплекс властивостей легуваних сталей проявляється лише після відповідної термічної обробки. Використання таких сталей у недовідпаленому або ненормалізованому стані є технологічно та економічно недоцільним.

Особливістю термічної обробки високолегованих сталей є необхідність застосування підвищених температур нагріву, подовжених витримок та контрольованих або вакуумних атмосфер. Це обумовлено повільною дифузією легувальних елементів і необхідністю забезпечити рівномірний хімічний склад аустеніту перед гартуванням.

Таблиця 1 – Типові режими ТО для високолегованих сталей

Марка сталі	Структурний клас	Температура гартування, °С	Охолодження	Температура відпуску, °С
12X13	Мартенситна	950...1000	Масло/повітря	200...300
20X13	Мартенситна	1000...1050	Повітря	250...350
40X13	Мартенситна	1020...1050	Масло	200...300
08X18H10	Аустенітна	1050...1100	Вода	-
12X17	Феритна	900...950	Повітря	700...750

Для аустенітних сталей основним видом термічної обробки є відпал з наступним швидким охолодженням, що забезпечує однорідну аустенітну структуру та високу корозійну стійкість.

У мартенситних високолегованих сталях після гартування формується мартенсит з підвищеним вмістом легувальних елементів і значною кількістю залишкового аустеніту. Подальший відпуск сприяє зниженню внутрішніх напружень, частковому розпаду мартенситу та виділенню дисперсних карбідів, що забезпечує оптимальне поєднання міцності та в'язкості.

В аустенітних сталях при нагріві до температур 1050...1100 °С відбувається розчинення карбідів хрому. Швидке охолодження запобігає їх повторному виділенню по межах зерен, що є принципово важливим для запобігання міжкристалітній корозії.

Таблиця 2 – Термічна обробка сталей різного призначення

Сталь	Термічна обробка
Хромонікелева конструкційна	Відпал при 830 °С. Нормалізація 860 °С. Гартування при 830 °С, охолодження в маслі з наступним відпуском при 550 °С.
Хромонікелева жароміцна	Гартування при 1100 °С, охолодження у воді
Хромонікелева нержавіюча	Гартування при 1100 °С, охолодження у

Приклад. Деталі насосів і клапанів, що працюють у корозійно-активних середовищах, виготовляють зі сталі 12X13. Після гартування при 1000 °С і відпуску при 250 °С досягається твердість 45...50 HRC при збереженні достатньої корозійної стійкості та міцності, що забезпечує тривалий термін експлуатації виробів.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. За заданою маркою високолегованої сталі визначити її структурний клас.
2. Обрати доцільний режим термічної обробки.
3. Обґрунтувати вибір температури нагріву та охолоджуючого середовища.

4. Пояснити вплив легувальних елементів на структуру та властивості сталі.

Питання для самоконтролю

1. Чим обумовлені особливості ТО високолегованих сталей?
2. Чому аустенітні сталі не зміцнюються гартуванням?
3. Яку роль відіграє вакуум або захисна атмосфера при нагріві?
4. Як відпуск впливає на властивості мартенситних високолегованих сталей?
5. Як впливають легуючі елементи на критичні точки сталі, на властивості сталі у відпаленому стані і на термічну обробку?

Практична робота №6

Карти технологічного процесу, їх призначення та оформлення. Планування робочого місця терміста

Мета роботи – ознайомитися з призначенням і структурою карт технологічного процесу термічної обробки, навчитися читати та складати технологічні карти для типових операцій гартування і відпуску, а також вивчити принципи раціонального планування робочого місця терміста з урахуванням вимог безпеки, якості та продуктивності.

Теоретичні відомості

Карта технологічного процесу є основним нормативно-технічним документом, що регламентує послідовність, умови та параметри виконання операцій термічної обробки. Вона забезпечує відтворюваність режимів, стабільність якості продукції та контроль дотримання технологічної дисципліни. У виробничій практиці карти технологічного процесу застосовуються як для одиничного і дрібносерійного виробництва, так і для масового виготовлення деталей.

Для термічної обробки карта технологічного процесу має особливе значення, оскільки навіть незначні відхилення температури, тривалості витримки або умов охолодження можуть призвести до суттєвих змін структури та властивостей матеріалу. Саме тому технологічна карта містить не лише перелік операцій, а й конкретні значення температур, середовищ нагріву та охолодження, допустимі відхилення і контрольні параметри.

Раціональне планування робочого місця терміста є невід'ємною частиною забезпечення якості термічної обробки. Усі планування дільниць на підприємстві мають відповідати в Україні Правилам охорони праці при термічній обробці металів (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0066-08#Text>). Планування передбачає оптимальне розміщення обладнання, інструменту та засобів контролю з метою зменшення втрат часу, підвищення безпеки праці та зниження ймовірності технологічних помилок. А правила охорони праці... забезпечують комфортну і безпечну організацію праці

Таблиця 1 – Основні елементи карти технологічного процесу ТО

Елемент карти	Зміст
Найменування деталі	Назва, марка матеріалу, маса
Вид обробки	Гартування, відпуск, нормалізація тощо
Обладнання	Тип печі, ванни, установки
Температура нагріву	Номінальне значення та допуски
Середовище нагріву	Повітря, захисна атмосфера, вакуум
Тривалість витримки	Час витримки при заданій температурі
Середовище охолодження	Вода, масло, полімерний розчин
Контроль якості	Твердість, структура, зовнішній вигляд

Наявність чітко оформленої карти технологічного процесу дозволяє уніфікувати виконання операцій термічної обробки та мінімізувати вплив людського фактора.

Рациональне робоче місце терміста повинно забезпечувати безпечне та ефективне виконання операцій термічної обробки. Основні зони робочого місця включають зону нагріву, зону охолодження, зону контролю та допоміжну зону для зберігання інструменту й засобів індивідуального захисту. Розміщення обладнання має забезпечувати мінімальні переміщення деталей між операціями та виключати перехреснення потоків гарячих і охолоджених виробів.

Особливу увагу приділяють безпеці праці. Робоче місце повинно бути обладнане захисними екранами, вентиляцією, засобами пожежогасіння та чітко промаркованими шляхами евакуації. Контрольно-вимірювальні прилади мають розміщуватися в зоні прямої доступності для оперативного контролю параметрів процесу.

Після проведення механічних або заготівельних операцій деталі з сталей та сплавів поступають у термічне відділення. Транспортування здійснюється роликівими або пластинчастими конвеєрами, транспортними візками або підвісними системами (для габаритних та масивних деталей). Вибір обладнання визначається масою, габаритами, складністю геометрії та вимогами до структури та властивостей матеріалу.

Для деталей масою 10...15 кг варто враховувати, що застосовуються агрегати безперервної дії та стандартні печі камерного типу.

Для сталей:

- ✓ нагрів у електричних камерних печах малої місткості;
- ✓ гартування здійснюється в масляних, водних або полімерних ваннах безперервної дії;
- ✓ низький або середній відпуск у муфельних печах або камерних електропечах.

Для алюмінієвих і титанового сплавів:

- ✓ розчинний відпал у камерних печах з конвекцією;
- ✓ гартування у водяних ваннах;
- ✓ старіння в термостатах або шафах.

Маршрут: піч → ванна гартування → піч відпуску/старіння → приконтрольне охолодження.

Деталі масою від 15 до 50 кг потребують більш рівномірного нагріву та підвищеної точності температурного контролю.

Вибирають обладнання:

- ✓ роликові або шафові печі з примусовою циркуляцією;
- ✓ періодичні соляні печі (для хіміко-термічних режимів);
- ✓ масляні ванни гартування з інтенсивним перемішуванням;
- ✓ баки для полімерного гартування.

Для хіміко-термічної обробки:

- ✓ цементація і нітроцементація у газових шахтних печах;
- ✓ азотування у шахтних або горизонтальних печах з азотовмісними атмосферами.

Маршрут: піч → ванна/бак гартування → піч термообробки → ділянка контролю твердості.

Деталі масою від 50 до 200–250 кг розподіляються на два технологічні потоки залежно від складності та точності вимог.

1. Деталі без складної геометрії та без хіміко-термічних покриттів.

Для такого випадку застосовують:

- ✓ піч шахтного типу або підвішені печі;
- ✓ ванни гартування з підйомним механізмом;
- ✓ камери відпуску з циркуляцією;
- ✓ установки для ступінчастого гартування (соляні або полімерні).

Маршрут: шахтна піч → гартувальна ванна → піч відпуску → контроль структури

2. Деталі з високими вимогами до структури, з неоднорідною геометрією або леговані сплави.

Такі випадки потребують більш точного контролю:

- ✓ вакуумні печі (для інструментальних та швидкорізальних сталей);
- ✓ індукційні установки для локального гартування;
- ✓ газові гартувальні системи високого тиску.

Маршрут: вакуумний нагрів → газове гартування → низький або високий відпуск у вакуумі.

Деталі масою понад 250 кг і великогабаритні заготовки обробляють із використанням важкого термічного обладнання:

- ✓ вагонеткові печі для нагріву і відпалу;
- ✓ тунельні печі для безперервної термообробки;
- ✓ підвісні печі з крановою подачею;
- ✓ басейни водяного або масляного гартування з підйомниками;
- ✓ охолоджувальні камери повільного охолодження.

Маршрут залежить від марки сталі:

– *конструкційні сталі:* нагрів → гарт → відпуск;

– *інструментальні:* нагрів у вакуумі → гарт газом → відпуск → стабілізація;

– *жароміцні сплави:* розчинний відпал → охолодження → старіння.

Окрім того існують додаткові критерії вибору обладнання, які не можна ігнорувати:

- за типом інструменту чи матеріалу;
- за точністю температури;
- за впливом атмосфери.

Таблиця 3 – Можливі технологічні процеси термічної обробки сталей і сплавів

Технологічний процес	Типові операції	Кінцевий результат
Конструкційні сталі (вуглецеві, низьколеговані)	гартування + відпуск	підвищення твердості та міцності
Хіміко-термічна обробка (ХТО, цементовані, азотовані сталі)	цементация/ азотування → гартування → відпуск	твердий зносостійкий поверхневий шар
Інструментальні та швидкорізальні сталі (Р6М5, Х12, ХВГ, ін.)	нагрів → гартування → відпуск → охолодження (кріо)	висока твердість + розмірна стабільність
Алюмінієві сплави	гомогенізуючий відпал → гартування → старіння	зміцнення за рахунок старіння
Титанові та жароміцні Ni-сплави (Ti-сплави, Inconel)	відпал → охолодження → старіння	стабілізація структури + жароміцність

Коли варто враховувати тип інструменту, терміст повинен обирати залежно від їх призначення. *Наприклад:* підшипникові та інструментальні сталі передбачають використання вакуумних печей з газовим гартуванням. Алюмінієві сплави – печі з конвекцією + водяні ємності, титан – вакуум або інертна атмосфера.

Коли виникає потреба у точному визначення температури та її відхилень:

- ✓ ± 3 °С – інструментальні сталі, авіаційні сплави;
- ✓ ± 10 °С – конструкційні.

За впливом атмосфери розрізняють відкритий нагрів та контрольовані атмосфери. Перший варіант можливий для чорнових деталей, другий – для легованих сталей і складних профілів. В деяких випадках обов'язковим є вакуум – для чистих і високоточних деталей.

Розміщення технологічного обладнання на термічній ділянці визначається поєднанням вимог технологічного процесу, безпеки праці, ергономіки робочих місць та нормативної документації, що регламентує мінімальні відстані між печами, ваннами, стінами та проходами. При проектуванні ділянки для масової термічної обробки сталі було обрано потокове компонування, яке забезпечує прямолінійний рух деталей у послідовності виконання операцій без перехрещень транспортних маршрутів (рисунок 1).

Технологічний маршрут для сталей та сплавів у масовому виробництві включає ряд операцій.

- а** Від поздовжньої сторони електропечі до стін або колон будівлі — 1500 мм
- б** Від торцевої сторони стін або колон будівлі — 1500 мм
- в** Між електропечами — 1200–1600 мм
- г** Від електропечі до баку для загартовування — 1200–1500 мм
- г** Між баками для загартовування у воді й мастілі — 1200–1500 мм
- д** Між осями шахтних печей — 3000–3500 мм
- ж** Від осі шахтної печі до стін або колон будівлі — 3000 мм

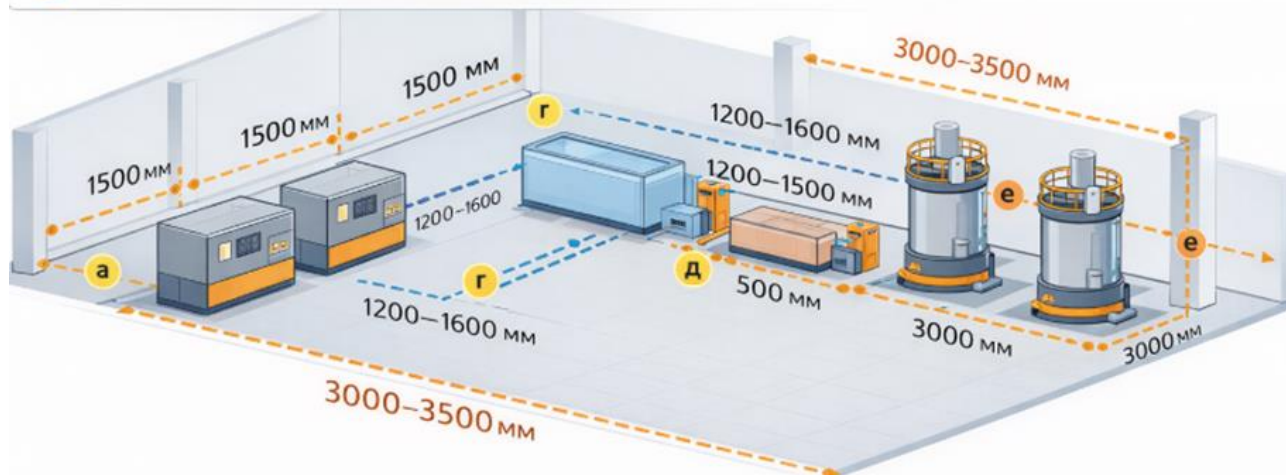


Рисунок 1 – Норми розміщення обладнання на термічній дільниці

Наприклад, для сталі 45 нагрів під гартування в камерній електропечі, подальше охолодження у водній, масляній або полімерній ванні, проведення відпуску в окремій камері, а також охолодження деталей на решітках та контроль твердості. Така послідовність операцій формує три функціональні зони: гарячу (нагрів), теплу (відпуск і повітряне охолодження) та холодну (контроль і відвантаження). Поділ на зони є необхідним для підвищення безпеки праці, зменшення теплових впливів на персонал та відокремлення операцій, що вимагають точного контролю.

Нормативні відстані між обладнанням сформовано на основі стандартів, які регламентують ширину проходів та зони обслуговування термічного обладнання. Вони передбачають мінімальні відстані 1500 мм від поздовжньої сторони печі до стіни, 1200...1600 мм між електропечами та 1200–1500 мм між електропечами і гартувальними ваннами. Ці значення забезпечують можливість фронтального завантаження та вивантаження деталей, доступ для механізмів, візків або підвісного транспорту, а також безпечне виконання операцій занурення при гартуванні. Відстань між ваннами становить не менше 500 мм, що запобігає змішуванню середовищ, а також полегшує обслуговування та відсмоктування парів.

Робоче місце терміста розташовується в «холодній» зоні технологічного потоку, що пов'язано з необхідністю зменшення теплового навантаження на персонал, забезпечення швидкого доступу до стендового контролю твердості та місця консервації або пакування деталей. Обслуговування гарячої частини дільниці здійснюється з урахуванням напрямку відходу після операції гартування: терміст повинен мати можливість безперешкодно відступити від ванни після занурення деталей, оскільки це є вимогою безпеки.

Вибране рішення є універсальним для обробки сталей у масовому виробництві і відповідає вимогам потокової організації праці. Воно забезпечує мінімальні холості переміщення деталей, ізоляцію контрольних операцій, зменшення ризику травмування та сприяє стабільності технологічного процесу термічної обробки.

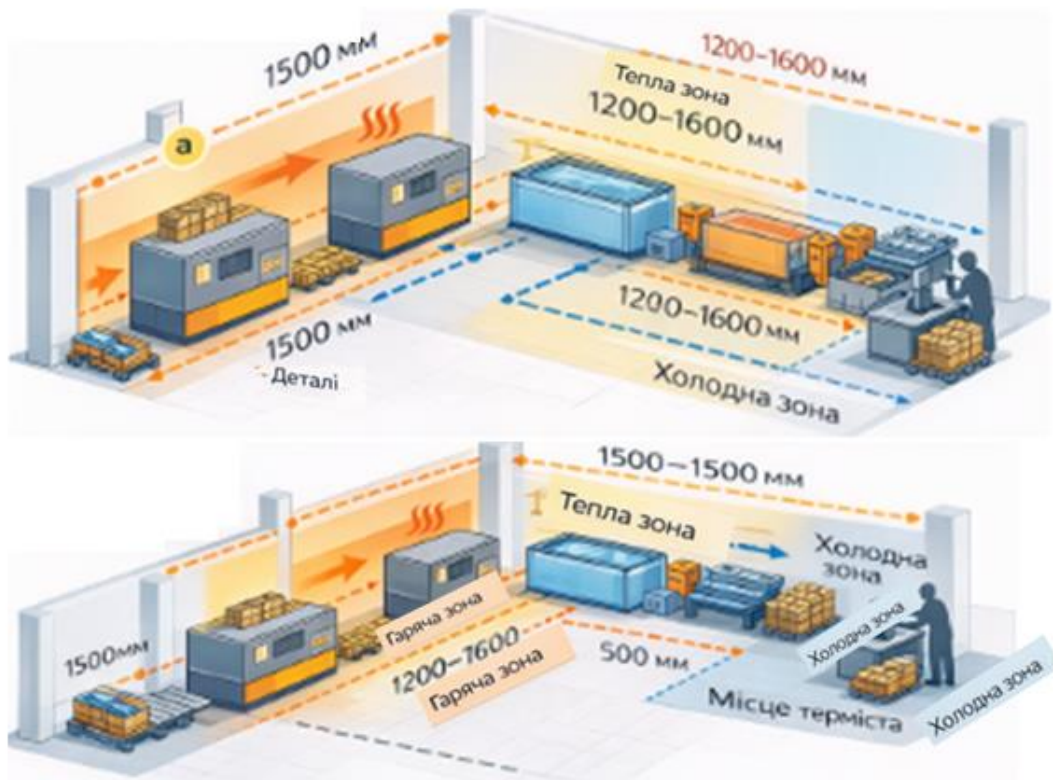


Рисунок 2 – Схема розташування на дільниці ТО

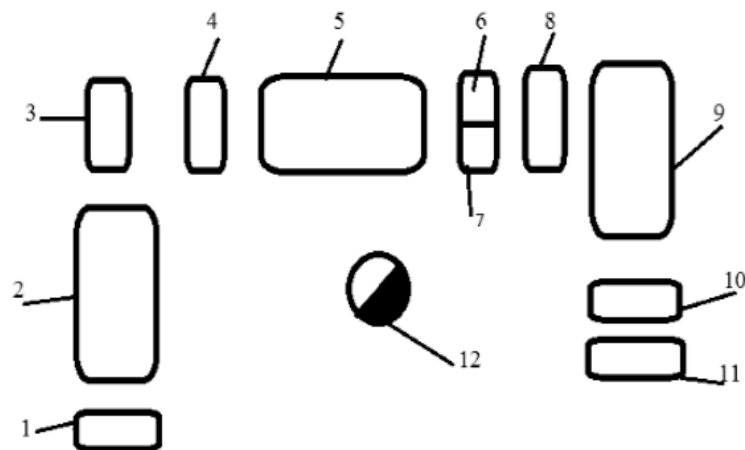


Рисунок 3 – Організація робочого місця терміста:

- 1 – стелаж для сирих деталей,
- 2 – піч СШЦ типу,
- 3 – стелаж для цементованих деталей,
- 4 – стіл контролера,
- 5 – піч СДВ типу,
- 6 – гартівний бак,
- 7 – мийна машина,
- 8 – стіл контролера,
- 9 – піч СНО типу,
- 10 – стіл контролера,
- 11 – стелаж з готовими деталями,
- 12 – контролер

Спрощено зображення робочого місця терміста показано на рисунку 3. Вибір устаткування для термічної обробки залежить від властивостей оброблюваного матеріалу та вимог до кінцевих механічних характеристик, а також від масо-габаритних параметрів деталей і типу технологічного процесу (гартування, відпуск, старіння тощо). Додатково його визначають умови виробництва, такі як масштаб випуску, рівень автоматизації та доступні енергетичні ресурси (таблиця 4).

Таблиця 4 – Устаткування для термічної обробки сталей та сплавів

Маса/габарити, ТО	Рекомендовані печі/агрегати	Середовище нагріву	Охолодження
до 10...15 кг гартування + відпуск	камерні електропечі, муфельні печі	повітря, нейтральна атмосфера	вода/масло/полімери
до 15 кг, складна геометрія ХТО (цементация, азотування)	шахтні печі, газові печі	атмосфери CO-CO ₂ -CH ₄ , NH ₃	масло/газ/полімери
15...50 кг гартування + відпуск	роликові та шафові печі, соляні ванни	повітря, сольові розплави	масло/полімери
20...50 кг вакуумне гартування	вакуумні печі високого розрідження	вакуум, інертні гази	газове гартування (N ₂ , Ar)
50...250 кг нормалізація, відпал	вагонеткові печі, шахтні печі	повітря	повітря/камера повільного охолодження
80...250 кг старіння/гомогенізуючий відпал	печі з конвекцією, печі з циркуляцією газу	повітря/Ar	вода/повітря
будь яка + висока точність стабілізація властивостей	вакуумні печі, печі із контролем ± 2 °C	інертні гази	газ/кероване охолодження

Можливі ризики та недоліки при невірно вибраному або порушеному технологічному процесі термічної обробки полягають у формуванні небажаних структурних станів, що призводить до зниження міцності, твердості, втомної та ударної стійкості деталей, а також появи внутрішніх залишкових напружень і деформацій. Окрім деградації властивостей матеріалу, це може спричинити відмову виробу в експлуатації, зростання браку, додаткові витрати на переробку або повторну термообробку та погіршення технологічної надійності виробництва (таблиця 5).

Наслідки невірно вибраного або порушеного технологічного процесу термічної обробки проявляються у зростанні відсотку браку за рахунок отримання нестабільних або деградованих структур (підвищеної крихкості, недостатньої твердості, внутрішніх напружень чи деформацій), що призводить до відмови деталей під час випробувань або в експлуатації та збільшує кількість переробок, рекламаций і виробничих втрат. Окрім економічних збитків, такі порушення створюють додаткові ризики для техніки безпеки, оскільки підвищується ймовірність аварійних ситуацій при роботі з гарячим обладнанням, гартувальними середовищами, термічними ваннами та холодильними агентами, що може спричинити опіки, хімічні ураження або вибухонебезпечні ситуації. Також некоректний процес негативно впливає на

стан навколишнього середовища через збільшення викидів продуктів згоряння, випаровувань гартувальних масел, втрат енергії та утворення відходів, що потребують утилізації, що в комплексі погіршує екологічні показники виробництва.

Таблиця 5 – Типові недоліки та їх наслідки

Помилка	Можливі наслідки
Відсутність допусків температур	Нестабільна структура
Нечітке зазначення середовища	Окиснення, знеуглецювання
Відсутність контролю якості	Брак продукції
Нераціональне розміщення обладнання	Зниження продуктивності
Порушення вимог безпеки	Травматизм

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. За заданою деталлю скласти карту технологічного процесу термічної обробки.
2. Обґрунтувати вибір режимів нагріву, витримки та охолодження.
3. Запропонувати схему планування робочого місця терміста для виконання даного процесу.
4. Вказати основні параметри контролю якості після термічної обробки.

Питання для самоконтролю

1. Яке призначення карти технологічного процесу?
2. Які параметри термічної обробки є критичними та потребують обов'язкового контролю?
3. Як планування робочого місця впливає на якість ТО?
4. Які наслідки можуть виникнути при порушенні технологічного процесу?

Практична робота №7

Особливості мартенситного перетворення при гартуванні

Мета роботи – вивчити фізичну природу мартенситного перетворення в сталях, з'ясувати роль температур M_p і M_k , швидкості охолодження та хімічного складу сталі у формуванні мартенситної структури, а також навчитися пояснювати вплив мартенситного перетворення на механічні властивості загартованих сталей.

Теоретичні відомості

Мартенситне перетворення є основним структурним процесом, що визначає ефективність гартування сталей. Воно полягає в бездифузійному перетворенні переохолодженого аустеніту в мартенсит під час швидкого охолодження. На відміну від перлітного чи бейнітного перетворення, мартенситне перетворення відбувається практично миттєво та не супроводжується дифузійним переміщенням атомів вуглецю.

Формування мартенситу починається при досягненні температури M_p (martensite start) і завершується при температурі M_k (martensite finish). Інтервал температур M_p - M_k залежить від вмісту вуглецю та легувальних елементів. Чим вищий вміст вуглецю, тим нижчими є температури початку та завершення

мартенситного перетворення, а також тим більша кількість залишкового аустеніту зберігається після гартування.

Мартенсит характеризується пересиченим твердим розчином вуглецю в α -залізі з тетрагональною кристалічною ґраткою. Саме ця пересиченість і спотворення ґратки зумовлюють надзвичайно високу твердість і міцність загартованих сталей, але водночас призводять до високих внутрішніх напружень і зниження пластичності.

Таблиця 1 – Вплив вмісту вуглецю на температури M_p і M_k

Вміст вуглецю, %	M_p , °C	M_k , °C	Характер структури після гартування
0,20	~400	~250	Мартенсит + ферит
0,40	~350	~200	Переважає мартенсит
0,60	~300	~150	Мартенсит + залишковий аустеніт
0,80	~250	~100	Значна частка залишкового аустеніту
1,00	~200	<50	Мартенсит + великий вміст аустеніту

Зниження температури M_p нижче кімнатної призводить до збереження залишкового аустеніту, що є характерним для високовуглецевих і високолегованих сталей.

Для формування мартенситу необхідно забезпечити швидкість охолодження, вищу за критичну. Якщо швидкість охолодження є недостатньою, аустеніт перетворюється за дифузійним механізмом з утворенням перлиту або бейніту, що істотно знижує твердість сталі.

Швидке охолодження при гартуванні необхідне, щоб вуглець не встиг виділитись з твердого розчину – аустеніту – і залишився б в кристалічній ґратці заліза після охолодження (рис. 1).

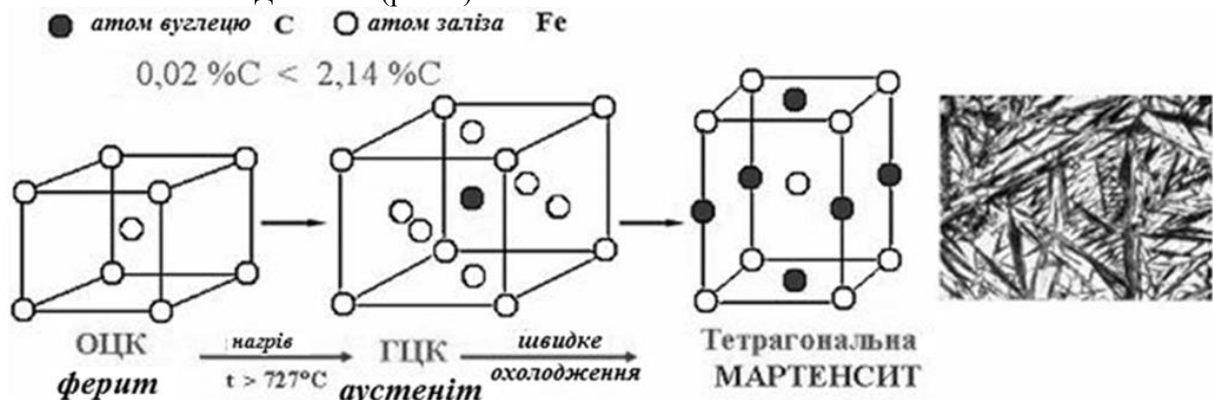


Рисунок 1 – Схема утворення структури загартованої сталі

Щоб загартувати сталь, необхідно правильно вибрати температуру нагріву і швидкість охолодження. Ці два параметри є визначними при проведенні гартування. При виборі температури нагріву діє наступне правило: доєвтектоїдні сталі нагрівають під гартування на 30... 50°C вище критичної точки A_{c3} , а заєвтектоїдні – 30...50°C вище точки A_{c1} (рис. 2). невеликі перевищення критичної точки необхідне, оскільки в печах для термообробки не уникнути деяких коливань температури відносно заданого значення.

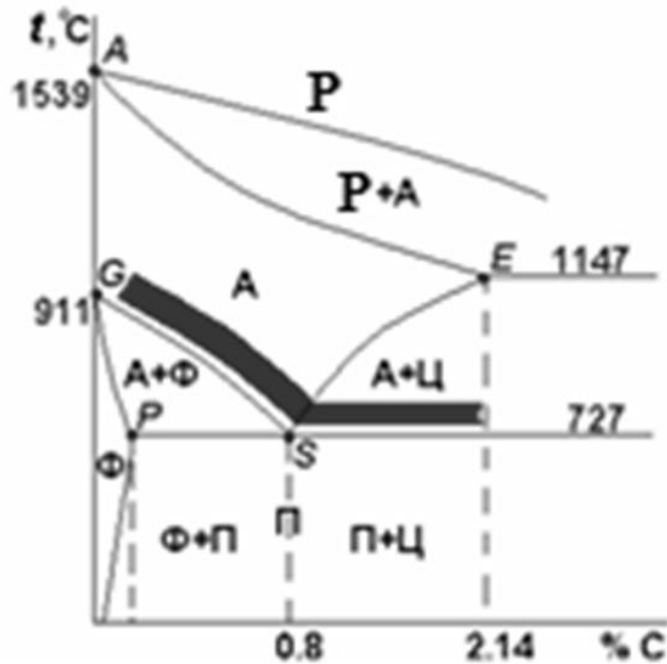


Рисунок 2 – Температурний інтервал нагріву сталі під гартування

Критична швидкість охолодження при гартуванні вуглецевих сталей складає не менше 400°C/с. така швидкість досягається при охолодженні в воді або в водних розчинах солей (NaCl) і лугів (NaOH), що збільшують охолоджуючу здатність води. При цьому деталь необхідно енергійно переміщувати в охолоджуючій рідині, щоб видаляти з поверхні металу пухирі водяної пари, яка уповільнює охолодження. Критична швидкість охолодження легированих сталей набагато нижча, тому використовують більш м'які охолоджуючі середовища – мінеральні масла або розчини полімерів.

Гартування є найбільш «жорсткою» з усіх операцій термообробки, оскільки сталь піддається різкому зниженню температури. При цьому в деталях виникають великі внутрішні напруження. Вони складаються із термічних напружень, що виникають із-за різниці температур на поверхні і в серцевині деталі при швидкому охолодженні, і структурних напружень, що виникають за рахунок об'ємних змін при мартенситному перетворенні.

Ці напруження можуть призвести до деформації деталі і навіть до появи тріщин. Особливо це є небезпечним у відношенні до деталей складної форми, що мають концентратори напружень у вигляді проточок, отворів, кутів, галтелей тощо. Для зменшення гартувальних напружень потрібно зменшити перепад температур в процесі охолодження при гартуванні.

Легувальні елементи, такі як хром, нікель, молібден і марганець, знижують температури M_p і M_s , стабілізують аустеніт і сприяють утворенню залишкового аустеніту. Водночас вони підвищують прогартуваність сталі, що дозволяє отримувати мартенситну структуру навіть при менш інтенсивному охолодженні.

У високолегованих сталях мартенситне перетворення може завершуватися лише після глибокого охолодження, включаючи обробку холодом або криогенну обробку.

Мартенситна структура забезпечує:

- ✓ високу твердість і зносостійкість;

- ✓ високу межу міцності;
- ✓ низьку пластичність і ударну в'язкість без подальшого відпуску.

Після гартування практично завжди проводять відпуск, який дозволяє знизити внутрішні напруження і стабілізувати структуру.

Приклад. Сталь 40 після гартування у воді має мартенситну структуру з температурою $M_n \approx 350 \text{ }^\circ\text{C}$ і $M_k \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$. Висока швидкість охолодження забезпечує практично повне мартенситне перетворення. Однак без подальшого відпуску деталь є крихкою і схильною до утворення тріщин, що підтверджує необхідність комплексного підходу до термічної обробки.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. За заданим хімічним складом сталі визначити орієнтовні температури M_n і M_k .
2. Оцінити ймовірність утворення залишкового аустеніту.
3. Обґрунтувати вибір охолоджуючого середовища для забезпечення мартенситного перетворення.
4. Пояснити необхідність відпуску після гартування.

Питання для самоконтролю

1. Чим мартенситне перетворення відрізняється від дифузійних перетворень?
2. Яку роль відіграють температури M_n і M_k ?
3. Як вміст вуглецю впливає на структуру мартенситу?
4. Чому залишковий аустеніт є небажаним для більшості деталей?

Практична робота №8

Визначення і розрахунок тривалості нагрівання при гартуванні та відпуску

Мета роботи – опанувати методи визначення тривалості нагрівання і витримки сталевих деталей при гартуванні та відпуску, навчитися користуватися розрахунковими формулами і поправочними коефіцієнтами, а також оцінювати вплив геометрії деталі, теплопровідності матеріалу і температурного режиму на кінетику нагріву.

Теоретичні відомості

Процес будь-якої термообробки включає три послідовні етапи: нагрівання, витримку при заданій температурі та охолодження. Нагрівання характеризується швидкістю та максимальною температурою.

Тривалість нагрівання деталі при термічній обробці визначається необхідністю досягнення заданої температури в усіх точках поперечного перерізу деталі. Цей процес залежить від теплофізичних властивостей матеріалу (теплопровідність, теплоємність, густина), геометричних розмірів деталі та потужності печі.

- У практиці термічної обробки прийнято розділяти нагрів на два етапи:
Період прогріву – до досягнення заданої температури;

Період витримки – для вирівнювання температурного поля і завершення фазових перетворень.

У літературі і виробничих нормативних документах використовують емпіричну залежність:

$$\tau = K \cdot S,$$

де: τ – тривалість нагрівання, хв;

K - коефіцієнт, що враховує тепловіддачу і матеріал;

S – характерний розмір (товщина або діаметр), мм.

Соляні ванни та індукційні установки забезпечують найвищу тепловіддачу, а повітряні печі – найнижчу.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта K

Умови нагріву	K , хв/мм
у повітрі	0,8...1,2
у соляній ванні	0,2...0,4
у вакуумі	1,2...1,6
індукційний нагрів	0,05...0,1

Тривалість витримки визначають за формулою:

$$\tau_v = a \cdot S,$$

де a – поправочний коефіцієнт, що залежить від типу сталі.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнту a залежно від типу сталі

Тип сталі	a , хв/мм
Вуглецеві	0,5...0,6
Леговані	0,7...0,9
Високолеговані	0,9...1,2

Для гартування тривалість нагріву повинна забезпечувати повну аустенізацію, тоді як при відпуску – розпад пересиченого мартенситу і стабілізацію структури.

Решта етапів характеризується тривалістю витримки і швидкістю охолодження. У реальних умовах розрахункові дані процесів нагрівання та охолодження перевіряються на дослідних партіях, коректуються та представляються у вигляді таблиць (таблиця 1). При цьому суттєве значення має правильний вибір способу нагрівання деталей. Використовується дуже повільне нагрівання ступінчасте з проміжними зупинками для вирівнювання температури за поперечним перерізом деталей. Для гарантії завершення фазового перетворення температура, до якої нагрівають піч, має бути вищою на 30...50° С.

Температура нагрівання сталевих деталей залежить від їх хімічного складу. Якщо під час нагрівання до температури меншої точки A_{c1} сталь зберігає перлітну структуру, то в разі подальшого нагрівання у перліті на міжфазних межах ферит-цементит з'являються зародки аустеніту, далі відбувається перекристалізація з утворенням нових центрів кристалізації аустеніту, тобто перетворення перліту в аустеніт.

Таблиця 3 – Орієнтовні норми тривалості нагрівання деталей

Устаткування	Температура нагріву, °С	Тривалість нагріву на 1 мм товщини виробу	
		з вуглецевих сталей	з легованих сталей
Полуменева піч	800...900	60...70	65...80
Полуменева піч з упакованою тарою	800...900	90...100	120...150
Електропіч	770...820; 820...880	60...65; 50...55	70...75; 60...65
Соляна ванна	770...820; 820...880	12...14; 10...12	18...20; 16...18

Під час нагрівання відбуваються початкові фазові перетворення, що відбуваються в металі. Зважаючи на продуктивність процесу швидкість нагрівання повинна бути максимально допустимою і її вибирають залежно від теплопровідності сталі, форми та розмірів заготовок, що нагріваються, їх розташування у печі тощо. Що менше в сталі легувальних елементів і простіша конфігурація заготовки, то більша допустима швидкість нагрівання. Швидке нагрівання зменшує утворення оксидів і зневуглецювання на поверхні заготовки, а також затримує ріст зерен аустеніту. Водночас швидке нагрівання збільшує перепад температур по об'єму заготовки, відповідно, спричинює неодноразність фазових перетворень, що може призвести до виникнення значних залишкових напружень. Які у свою чергу спричинюють жолоблення заготовок і навіть утворення в них тріщин. Для вуглецевих сталей орієнтовна швидкість нагрівання в печах становить 0,8...1 мм/хв. Нагрівання у соляних ваннах скорочує швидкість нагрівання удвічі. Швидкість нагрівання легованих сталей зменшують на 25...40 % через їх низьку теплопровідність. Час витримки при температурі нагрівання t_{\max} потрібен, щоб вирівняти температуру по об'єму заготовки та закінчити фазові перетворення. Це приблизно 20 % загального часу нагрівання.

Таблиця 4 – Фактори, що впливають на нагрів

Фактор	Вплив
Геометрія деталі	Найбільш значущий
Теплопровідність матеріалу	Зростання λ → швидший нагрів
Атмосфера печі	Вакуум → повільніше нагрів
Характер укладки	Щільна укладка → збільшення часу
Початкова температура деталі	Висока (з попереднім підігрівом) → зменшення часу
Потужність печі	Низька → збільшення тривалості

При розрахунку часу нагріву нагрів розбивається на три інтервали: I – 20...600 °С, II – 600...800 °С, III – 800...850 °С.

Середня теплоємність в інтервалі температур:

$$C_{ptn}^{t_k} = \frac{i_0^{t_k} - i_0^{t_n}}{t_k - t_n}, \text{ де } i^t - \text{тепловміст при температурі } t, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$a_n^* = \sigma_{\text{печ}} \frac{\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n}{100}\right)^4}{t_{\text{печ}} - t_n}, \text{ де } t_{\text{печ}}(T_{\text{печ}}) - \text{температура печі, } ^\circ\text{C}(^\circ\text{K});$$

$$t_n(T_n) - \text{температура поверхні, } ^\circ\text{C}(^\circ\text{K});$$

$\sigma_{\text{печ}} = \varepsilon \sigma_0 = 5,76 * 0,56 = 3,23$ – приведений коефіцієнт випромінювання, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} * \text{°K}^4$;

де $\sigma_0 = 5,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} * \text{°K}^4$;

ε – степінь чорноти.

Середнє значення коефіцієнту тепловіддачі:

$$a_n = \frac{a_n + a_k}{2}$$

Тривалість нагріву визначається за формулою:

$$\tau = \frac{S \rho C_p}{k_1 \alpha} \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_n}{t_{\text{печ}} - t_k},$$

Де S – розрахункова товщина тіла, що нагрівається (половина товщини при двосторонньому нагріві);

k_1 - коефіцієнт форми, який для плити дорівнює 1;

ρ - щільність, кг/м³;

C_p - середня теплоємність, Дж/кг·град;

α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·град;

$t_{\text{печ}}$ - температура печі, °С;

t_n - початкова температура деталі, °С;

t_k - кінцева температура деталі, °С.

Тривалість охолодження визначаємо за формулою:

$$\tau_{\text{ох}} = t_{\text{гарт}} / v_{\text{ох}},$$

де $\tau_{\text{ох}}$ – час на охолодження, $t_{\text{гарт}}$ – температура гартування, $v_{\text{ох}}$ – швидкість охолодження.

При термічній обробці сталей найбільш часто застосовують охолодження деталей в печі, на повітрі, в маслі та воді. Швидкість охолодження вуглецевих сталей може бути в межах:

– охолодження зразків з піччю – 0,2 °С/с;

– охолодження на повітрі – 2,0 °С/с;

– охолодження в маслі – 150 °С/с;

– охолодження у воді – 550 °С/с.

Крім того застосовують прискорене охолодження виробів форсунками з подачею стисненого повітря, води, повітряно-водяними сумішами.

Тривалість витримки за спрощеним методом визначаємо за формулою:

$$\tau_{\text{в}} = \tau_{\text{наг}} / 5$$

Загальний час під гартування становить:

$$\tau_{\text{гарт}} = \tau_{\text{наг}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{ох}},$$

де $\tau_{\text{гарт}}$ – час гартування, $\tau_{\text{наг}}$ – час нагріву, $\tau_{\text{в}}$ – час витримки, $\tau_{\text{ох}}$ – час охолодження.

Для відпуску використовують значно менші часи витримки:

$$\tau_{\text{відп}} = b \cdot S$$

де $b = 0,3 \dots 0,5$ хв/мм.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. Виконати розрахунок тривалості нагрівання і витримки для заданої деталі.
2. Порівняти режими гартування і відпуску за тривалістю.
3. Обґрунтувати вплив конструктивних параметрів на кінетику нагріву.
4. Запропонувати способи зменшення тривалості ТО без шкоди для властивостей.

Питання для самоконтролю

1. Чому час прогріву та витримки залежить від розміру деталі?
2. Як впливають легуючі елементи на тривалість нагрівання?
3. Чому відпуск триває менше, ніж гартування?
4. Які фактори можуть призвести до недогріву або перегріву деталі?
5. Як визначити температуру нагрівання під гартування сталей з різним відсотковим вмістом вуглецю?
6. Як визначити час витримки сталі при нагріванні під гартування?
7. Як визначити швидкість охолодження сталі при гартуванні?

Практична робота №9

Вивчення результатів циклічного відпалу сталей

Мета роботи – ознайомитись з фізичною суттю процесів, які мають місце при циклічному відпалі вуглецевих сталей.

Теоретичні відомості

Циклічний або маятниковий відпал – це різновид сфероїдируючого відпалу. Цей відпал застосовують для отримання глобулярного (зернистого) перліту (рис.1,б) в евтектоїдних і, особливо, в заевтектоїдних сталях. Для заевтектоїдних сталей повний відпал з нагрівом вище A_{cm} (лінія ES) взагалі не використовують, оскільки при повільному охолодженні випадає груба сітка Σ_{II} , що погіршує механічні властивості.

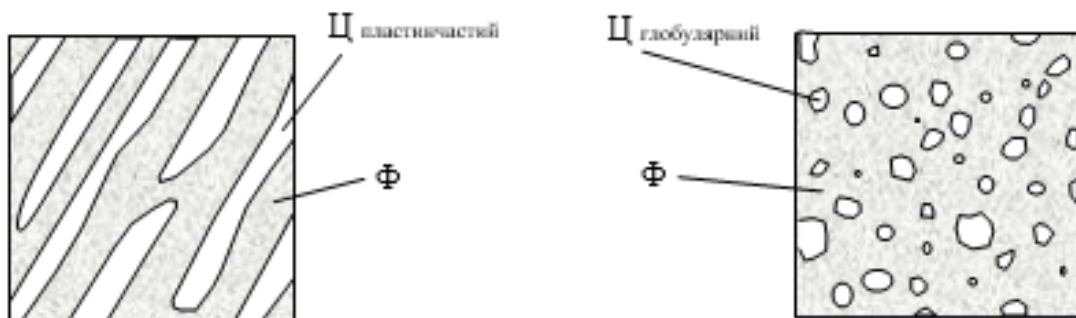


Рисунок 1 – Структура перліту:
а – пластинчастого, б – глобулярного.

При нагріванні до $740...780^{\circ}\text{C}$ в аустеніті залишається значна кількість дрібних частинок цементиту, що не встигла розчинитися. Під час охолодження ці частинки відіграють роль готових центрів кристалізації при розпаді аустеніту,

що гальмує утворення нових зародків цементиту пластинчастого типу. В результаті утворюється структура зернистого перліту.

Циклічний відпал застосовують при неповному проходженні сфероїдизації цементиту під час однократного відпалу. Режим циклічного відпалу для вуглецевих сталей показано на рис.2.

Дрібні частинки цементиту отримуються внаслідок ділення цементитних частинок. При діленні пластин цементиту має місце їх розчинення в найбільш тонких місцях, а також в місцях виходу на міжфазну поверхню цементит-аустеніт субграниць в тій чи іншій фазі.

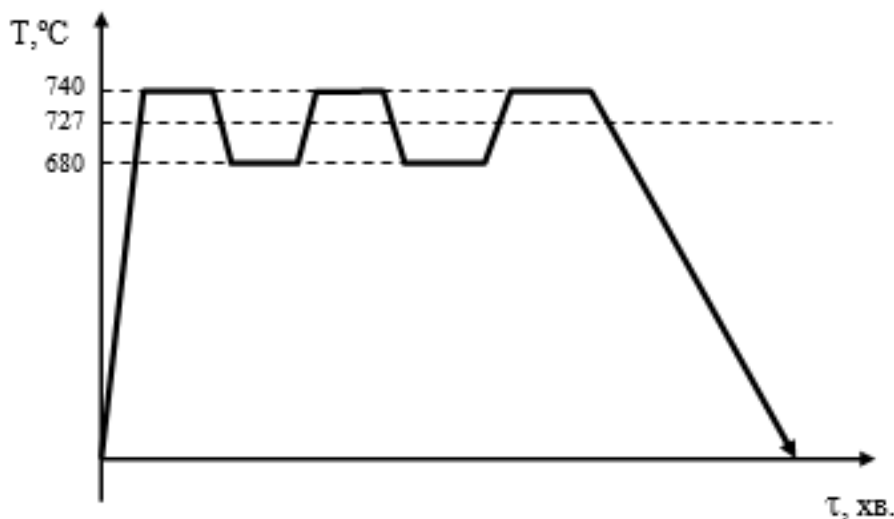


Рисунок 2 – Схема температурно-часового режиму циклічного відпалу вуглецевих сталей.

Стимулом для локального розчинення цементиту є неврівноваженість сил поверхневого натягу в місцях виходу субграниць на міжфазну поверхню.

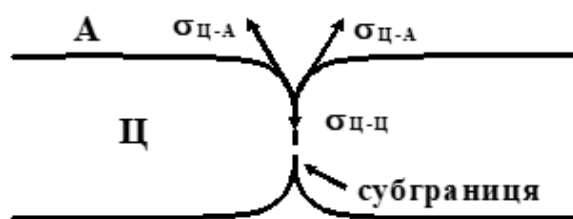


Рисунок 3 – Канавки в місцях виходу субграниць в цементиті на поверхню між фазами цементит-аустеніт.

Відомо, що розчинення частинки залежить від радіуса кривини її поверхні. Ця залежність описується рівнянням Томсона-Фрейндрліха:

$$\ln \frac{C_r}{C_\infty} = \frac{2\gamma V}{kTr}$$

де C_r – концентрація розчину біля міжфазної границі з радіусом r ,
 C_∞ – концентрація розчину біля плоскої границі, γ – поверхнева енергія на границі фаз, V – атомний об'єм.

Чим менший радіус кривини границі, тим більша біля неї рівноважна концентрація розчину. Отже, біля випуклих стінок канавок виходу субграниць

цементиту (рис.3) концентрація вуглецю в аустеніті буде більшою, ніж біля плоскої поверхні пластинки. Врівноваження складу аустеніту понизить концентрацію вуглецю в ньому біля випуклих стінок канавки і, оскільки аустеніт тут стане ненасиченим по відношенню до цементиту, то цементит розчиниться, і границі його випрямляться. Це в свою чергу викличе порушення рівноваги сил поверхневого натягу біля виходу субграниці та наступне відновлення рівноваги при заглибленні канавки і т.д. (рис.4). В результаті такого процесу пластинка розчинятиметься і розділиться саме по субграниці.

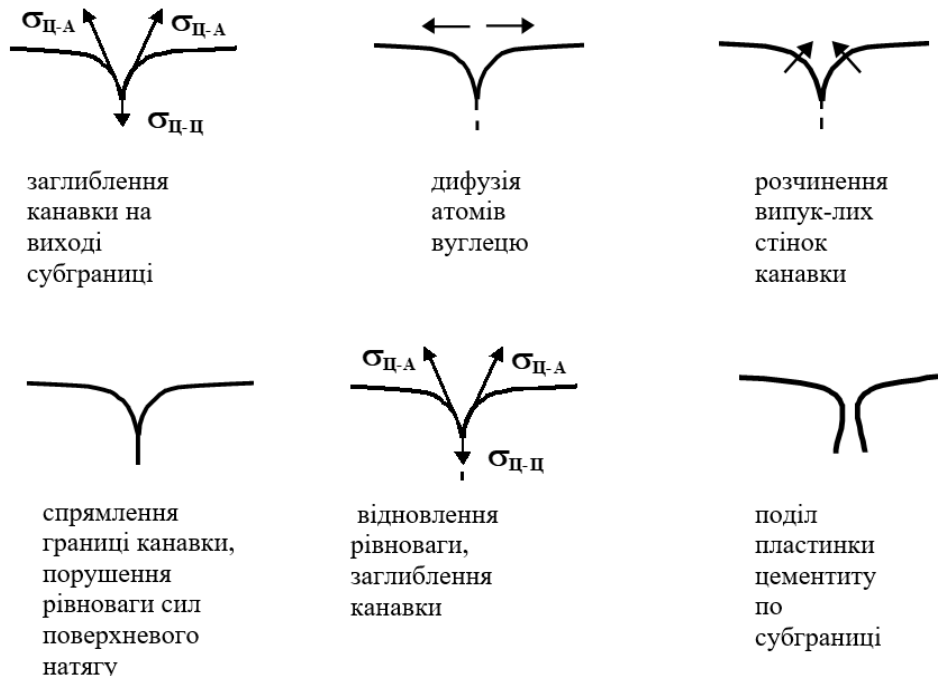


Рисунок 4 – Процес ділення пластинки Ц при сфероїдизуючому відпалі.

Після розподілу пластин дрібні їх частинки коагулюють. Біля країв та вершин цементитних часток з малим радіусом кривини концентрація вуглецю в аустеніті підвищена у відповідності з рівнянням Томсона-Фрейдліха. Врівноваження складу аустеніту призводить до підвищення концентрації вуглецю біля ділянок границі з великими радіусами кривини, де аустеніт перенасичується та виділяє цементит. Одночасне пониження концентрації вуглецю в аустеніті біля країв та вершин викликає розчинення останніх. В результаті градієнт концентрації вуглецю в аустеніті відновлюється, та процес розчинення цементиту в місцях з меншим радіусом кривини границі та осідання його в місцях з більшим радіусом кривини призводить до округлення частинки, що показано на рисунку 5.

Таким чином, сфероїдизація частинок цементиту іде шляхом переносу вуглецю через оточуючий твердий розчин.

При циклічному відпалі пластинка цементиту при кожному нагріванні частково розчиняється в аустеніті, причому розчиняються переважно вершини та ребра пластинки. При кожному охолодженні з аустеніту виділяється цементит, причому переважно на плоских ділянках цементитних пластин, що прискорює процес коагуляції останніх.

Циклічному відпалу піддають вуглецеві та леговані інструментальні та підшипникові сталі. Сталь зі структурою зернистого перліту має найменшу твердість, вищу пластичність, легше обробляється різанням. Крім того, глобулярний перліт є оптимальною вихідною структурою перед гартуванням.

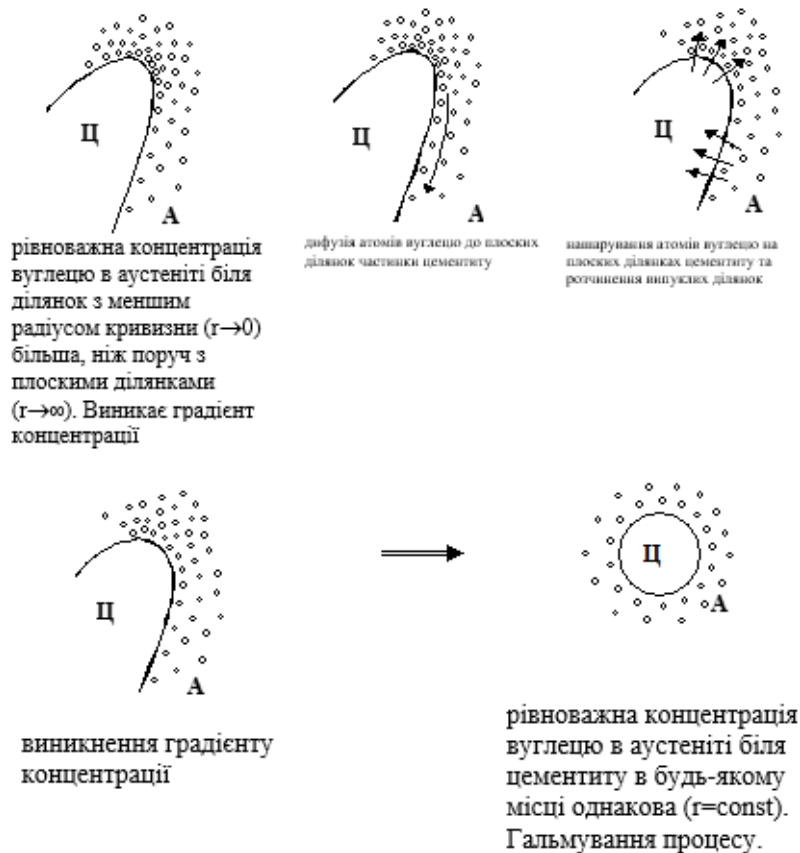


Рисунок 5 – Процес коагуляції цементиту при сфероїдизуючому відпалі.

Сталі зернистим перлітом менш схильні до росту зерна, для них характерний більш широкий інтервал гартувальних температур, а також вони мають більшу міцність і в'язкість після гартування.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

Для інструментальної сталі У8 (вуглецевої) призначити режим циклічного відпалу. Попередньо встановити початкову структуру сталі (пластинчастий перліт). Структуру сталі замалювати у звіт.

Структуру сталі після ТО замалювати у звіт. Зробити висновки.

Питання для самоконтролю

1. Що називається циклічним відпалом?
2. Температурно-часовий режим циклічного відпалу.
3. Що є стимулом для ділення цементитних частин?
4. Рівняння Томсона-Фрейдліха.
5. Чому виникає градієнт концентрації вуглецю в аустеніті біля поверхні цементитних пластин?
6. В чому суть процесу коагуляції цементитних частинок?
7. Які сталі піддають циклічному відпалу?
8. Описати властивості сталей з структурою зернистого перліту.

Практична робота №10

Вивчення впливу легуючих елементів на мікроструктуру і властивості сталей після хіміко-термічної обробки (ХТО)

Мета роботи – вивчити вплив хіміко-термічної обробки на структуру і властивості поверхневого шару виробів із сталі; ознайомитися з технологіями ХТО (цементациєю).

Теоретичні відомості

Багато виробів повинні мати високу поверхневу твердість, міцний поверхневий шар і в'язку серцевину. Таке сполучення властивостей досягається поверхневим зміцненням виробів, котрі виготовлені із сталей з доброю пластичністю і задовільною міцністю. До методів поверхневого зміцнення відносять ХТО, поверхневе гартування та поверхневу пластичну деформацію.

Хіміко-термічна обробка – це процеси дифузійного насичення поверхневого шару виробів із зовнішнього середовища різними елементами одночасно із тепловим впливом.

ХТО – один із найбільш ефективних методів підвищення довговічності деталей машин завдяки збільшенню твердості, опору зношуванню, границі витривалості, контактної витривалості, а в деяких випадках – антикорозійних, антиерозійних властивостей та окалино- (жаро)стійкості.

Після ХТО змінюється хімічний і фазовий склад, структура, та як наслідок цього - властивості поверхневого шару. Дифузійне насичення металів і сплавів можливо лише при підвищеній температурі, коли стає помітною дифузія атомів елемента, що насичує поверхню. Для зміни хімічного складу виробів їх нагрівають в активному середовищі і при цьому одночасно відбуваються такі процеси: утворення елемента в активному (атомарному) стані; адсорбція атомів поверхнею виробів; дифузія атомів від поверхні у глибину виробу.

Основні кількісні характеристики дифузійного шару – його глибина, концентрація елемента, твердість поверхні. При ХТО глибина шару залежить від багатьох факторів: природи елемента, що насичує; його активності в робочому середовищі; тривалості та температури насичення; хімічного складу сталі. Наприклад, при насиченні елементами, котрі утворюють тверді розчини втілення, швидкість формування шару в багато разів вища, ніж при утворенні твердих розчинів заміщення, тому що дифузійна рухомість атомів втілення на декілька порядків вища рухомості атомів заміщення. Підвищення температури насичення при однаковій тривалості приводить до збільшення глибини дифузійного шару за експонентою і на практиці використовується як один із методів інтенсифікації процесів ХТО. У залежності від стану речовини - постачальника атомів насичення, розрізняють насичення із газової (парової), рідкої або твердої фази. Окрім того, всі різновиди ХТО поділяють на дві групи:

✓ дифузійне насичення неметалами: цементация (насичення вуглецем), ціанування (вуглецем і азотом), азотування (азотом);

✓ дифузійне насичення металами (дифузійна металізація) - хромом, алюмінієм, кремнієм, титаном тощо.

Найбільш поширене промислове використання знайшли методи насичення неметалами.

Цементация – процес дифузійного насичення вуглецем поверхневих шарів сталевих виробів. Цементовані вироби повинні мати поверхневу твердість ^356HRC , підвищену зносостійкість поверхні та в'язку серцевину. Тому для їх виготовлення використовують маловуглецеві (0,1...0,25 %C) сталі: 10, 15, 20, 15X, 18XГТ, 12ХНЗА, 18Х2Н4А та інші.

Розчинність вуглецю у фериті незначна, тому цементацию сталі проводять в аустенітному стані (при температурі вище A_{c3} для цементованої сталі). Інтервал температур цементации складає 870...1050°C.

Підвищення температури цементации приводить до росту аустенітного зерна, погіршенню механічних і експлуатаційних властивостей шару і серцевини. Оптимальним поверхневим вмістом вуглецю у шарі вважається 0,8...1,1 %. При меншому вмісті вуглецю не досягається необхідна твердість поверхні, а при більшому - в цементованому шарі утворюється карбідна сітка, внаслідок чого він стає крихким.

Глибина шару частіше за все знаходиться в межах 0,6...1,3 мм; на деталях зі значними розмірами вона може досягати 4...6 мм. За рівних умов підвищення температури цементации скорочує тривалість насичення.

Наприклад, тривалість процесу для досягнення глибини 1 мм в сталі 10 при 900°C становить 6 годин, а при 970 °C – 4...5 годин. Речовини-постачальники вуглецю при цементации називаються карбюризаторами. У залежності від виду карбюризатору розрізняють цементацию у твердому карбюризаторі і газову цементацию. Твердий карбюризатор складається із суміші деревного вугілля та вуглекислих солей. Деталі складають в спеціальні сталеві ящики, пересипають карбюризатором, герметизують, щоб зменшити доступ повітря, і завантажують у нагріту піч. При нагріванні внаслідок взаємодії деревного вугілля і залишку кисню утворюється оксид вуглецю CO , який на поверхні металевих виробів дисоціює за реакцією $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ з утворенням атомарного вуглецю. Останній «поглинається» металом, а CO_2 після взаємодії з деревним вугіллям відновлюється до CO .

При газовій цементации використовують як карбюризатор спеціально приготовлену суміш газів (ендогаз); природний газ; рідкі вуглеводні - гас, синтин, піробензол. Деталі у спеціальних пристроях завантажуються в цементацийні печі, в котрих природний газ і органічні рідини дисоціюють з утворенням атомарного вуглецю, наприклад, $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$. Газова цементация має низку переваг порівняно з цементацией у твердому карбюризаторі: можливі механізація і регулювання насичення; менша тривалість процесу. У зв'язку з цим газова цементация використовується в масовому та серійному виробництві.

Після цементации максимальний вміст вуглецю на поверхні виробів плавно зменшується в перерізі деталі від поверхні до початкового вмісту в серцевині. Наприклад, в цементованій деталі із сталі 10 концентрація вуглецю зменшується від 1,0 % на поверхні до 0,1 % в серцевині. Структура деталей, повільно охолоджених після цементации, близька до рівноважної і залежить від вмісту вуглецю: в заевтектоїдній частині шару – перліт із сіткою вторинних карбідів, в евтектоїдній – перліт, в доевтектоїдній – перлітоферитна із

зростанням частки фериту в напрямку до серцевини. Зазначені структури мають низький рівень твердості, тому лише однієї цементації недостатньо для досягнення значної поверхневої твердості та високих експлуатаційних властивостей. Вони забезпечуються завершальною термічною обробкою – гартуванням та відпусканням. У залежності від марки цементованої сталі, температури цементації, призначення деталей і т. ін., можливі такі основні технологічні схеми:

✓ цементація, повільне охолодження, гартування від температури $A_{c1}+(30...50)^{\circ}C$, відпускання низькотемпературне (ХТО для маловідповідальних деталей);

✓ цементація, повільне охолодження, подвійне гартування, відпускання низькотемпературне (для важконавантажених деталей відповідального призначення), перше гартування (температура вище A_{c3}) використовують для перекристалізації та подрібнення зерен в серцевині, що вирости при високих температурі і тривалості цементації, а також розчинення цементитної сітки в заевтектоїдній зоні шару. Друге гартування (температура $A_{c1}+(30...50)^{\circ}C$) забезпечує дрібнозернисту структуру шару та збереження дрібних глобулярних карбідів в заевтектоїдній частині шару;

✓ цементація, охолодження в печі до температури гартування сталі ($A_{c1}+(30...50)^{\circ}C$), гартування (так зване гартування з цементаційного нагрівання), відпускання низькотемпературне. Використовується для спадководрібнозернистих сталей, що зберігають після тривалої цементації зерно в серцевині і в шарі не більше 7 балу. Ця технологія використовується після газової цементації; її головні переваги – виключення повторного нагрівання, зменшення деформації деталей, збереження енергоносіїв.

Структура цементованого шару після термічної обробки – мартенсит відпущений, аустеніт залишковий, карбіди; структура серцевини – ферито-перлітна (вуглецеві сталі), мало вуглецевий відпущений мартенсит із феритом (леговані сталі), що пояснюється підвищеною прогартуваністю легованих сталей. Після ХТО твердість поверхні цементованих сталей HRC56, серцевини HRC20...45 (в залежності від хімічного складу сталі, розмірів деталі, структури серцевини). Швидкість цементації становить 0,1...0,2мм/год.



Рисунок 1 – Структура цементованого шару

Методи поверхневого зміцнення матеріалів, зокрема цементація, забезпечують підвищення міцності, границі витривалості та опору втомному руйнуванню виробів, що працюють під дією контактних навантажень. Розвиток тріщин втоми відбувається переважно за умов напружень розтягу. У зміцненому поверхневому шарі, який має більший питомий об'єм у порівнянні

із серцевиною, формуються залишкові напруження стиску. Завдяки їх взаємодії з робочими напруженнями навантаження загальна величина напружень розтягу зменшується, що підвищує опір втомі сталі та збільшує довговічність деталей.

Борування сталей полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару бором. Основна мета процесу полягає в отриманні покриття з високою твердістю, підвищеним опором абразивному зношуванню та корозії у агресивних середовищах, а також у забезпеченні високої теплостійкості та жаростійкості деталей. Борування здійснюють при температурах 920...950 °С з ізотермічним витримуванням до 2...5 годин. Товщина борованого шару становить 0,1...0,2 мм.

Розрізняють два основні методи борування: рідинне електролізне та газове. Найпоширенішим є рідинне електролізне борування, при якому оброблювану деталь (катод) та графітовий електрод (анод) занурюють у розплав борвмісної солі на основі бури, через яку пропускають постійний струм. Перед обробкою поверхню виробу очищають дробоструминним способом для забезпечення якісного насичення.

Внаслідок борування формується поверхневий шар із надзвичайно високою твердістю (до 1350...2000 HV), що зберігається при підвищених температурах. Це зумовлено утворенням боридних фаз FeB та Fe₂B, які характеризуються високою стійкістю до зношування та хімічної дії. Боруванню піддають деталі з вуглецевих і легованих сталей (наприклад, 20, 45, 18ХГТ, 15Х11МФ, Х23Н18, 40Х, Х12, У10), а також елементи техніки, що працюють в умовах інтенсивного абразивного впливу, наприклад траки та компоненти нафтового обладнання.

Дифузійна металізація полягає у насиченні поверхневих шарів сталей різними металами, зокрема Cr, Al, Ti, V та ін. Залежно від елемента, який вводиться у метал, процес отримує відповідну назву: хромування при насиченні хромом, алітування при насиченні алюмінієм, силіціювання при введенні кремнію тощо. У випадку комбінованого насичення застосовуються процеси типу хромоалітування або хромовольфрамівання, при яких одночасно вводяться два або більше елементи для отримання функціональних покриттів підвищеної стійкості.

Процеси дифузійної металізації можуть проводитися у твердому, рідкому або газоподібному насичувальному середовищі. При рідинній металізації деталі занурюються у розплав відповідного металу, тоді як при газовій насичення здійснюється з використанням летких хлоридних сполук типу AlCl₃, CrCl₃ чи SiCl₄, які при температурах 1000...1100 °С реагують з залізом, утворюючи активні атоми металу, здатні до дифузії. Дифузія хрому й алюмінію є значно повільнішою порівняно з дифузією вуглецю та азоту, оскільки перші утворюють тверді розчини заміщення, тоді як останні — тверді розчини впровадження. Це обмежує промислове застосування таких процесів через необхідність тривалих витримувань та високих температур, що підвищує їх вартість.

Хромування забезпечує значне підвищення корозійної стійкості деталей, зокрема стійкості проти газової корозії при температурах до 800 °С, а також корозії у водних та кислотних середовищах, включно з морською водою.

Товщина хромового шару, як правило, не перевищує 0,2 мм. На низьковуглецевих сталях формується твердий розчин хрому в α -залізі з концентрацією 30...60 % Cr. На середньо- і високовуглецевих сталях хромований шар складається з карбідів $Cr_{23}C_6$ на поверхні та Cr_7C_3 ближче до перехідної зони. У приповерхневій зоні спостерігається збільшений вміст вуглецю порівняно з серцевиною. Твердість поверхні після хромування залежить від вмісту вуглецю в сталі: для низьковуглецевих вона становить 180...280 HV, а для високовуглецевих може досягати 1350 HV, що перевищує твердість цементованих та окремих азотованих сталей.

Алітування здійснюють шляхом насичення поверхні алюмінієм у порошкових сумішах або у розплавленому металі. Утворена оксидна плівка Al_2O_3 забезпечує підвищений опір корозії і окисненню. Мікроструктура алітованого шару характеризується наявністю твердого розчину Al у α -залізі, боридних фаз типу Fe_3Al , а також інтерметалічної фази Fe_2Al_5 біля поверхні. Товщина шару становить 0,2...0,5 мм, а застосовують процес для низьковуглецевих, спеціальних сталей та чавунів.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. Користуючись зразками, а також альбомами з фотографіями мікроструктур, вивчити структуру поверхневого шару і серцевини сталі 10 після цементації і повільного охолодження, після цементації і гартування.

2. Користуючись довідниками розписати зміну структури та схематично зарисувати її. В таблицю внести дані зміни твердості.

Таблиця 1 – Зміна твердості по глибині цементованого шару сталі 10

Марка сталі	ХТО	Твердість , на відстані від поверхні, мм					
		0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
10							

Схематично зарисувати структуру цементованого шару (після повільного охолодження і після гартування). Позначити структурні складові. Використовуючи дані про структуру, побудувати і пояснити графік «твердість-відстань від поверхні» зразка зі сталі 10 після цементації, гартування та низькотемпературного відпускання.

Питання для самоконтролю

1. Призначення ХТО та поверхневого гартування.
2. Переваги ХТО та поверхневого гартування у порівнянні із об'ємною термічною обробкою.
3. Процеси, які проходять при ХТО.
4. Вплив температури насичення, тривалості процесу, хімічного складу сплаву на глибину дифузійного шару.
5. Сутність цементації. Речовини-постачальники вуглецю.
6. Температура цементації, оптимальна поверхнева концентрація вуглецю.
7. В чому суть азотування? Які технологічні параметри азотування?
8. Суть і призначення борування.
9. Суть і призначення різновидів дифузійної металізації.
10. Структура і властивості шару та серцевини після цементації та наступної термічної обробки.

Практична робота №11 Термічна обробка чавунів

Мета роботи –вивчити зміни структури відбіленого чавуну в процесі графітізуючого відпалювання. Сформувати практичні навички вибору та обґрунтування режимів термічної обробки чавунів з урахуванням їхнього хімічного складу, форми графіту, структурного стану та вимог до експлуатаційних властивостей деталей.

Теоретичні відомості

Чавуни є багатокомпонентними залізвуглецевими сплавами з вмістом вуглецю понад 2,14 %, у яких вуглець перебуває у вигляді графіту або цементиту. Структура і властивості чавунів істотно залежать від форми та розподілу графітної фази, що визначається хімічним складом і умовами кристалізації.

Термічна обробка чавунів застосовується для зниження внутрішніх напружень, покращення оброблюваності, підвищення міцності, зносостійкості або пластичності. На відміну від сталей, чавуни не завжди підлягають класичному загартуванню, проте широко застосовуються відпал, нормалізація, ізотермічне гартування та спеціальні режими обробки.

Для сірого чавуну характерним є відпал з метою зниження твердості та покращення оброблюваності різанням. Високоміцні (кулясті) чавуни можуть піддаватися нормалізації або ізотермічному гартуванню з утворенням бейнітної структури, що забезпечує поєднання високої міцності та пластичності. Білий чавун застосовується обмежено і зазвичай не піддається класичній ТО через високу крихкість. Структура і механічні властивості чавунного литва залежать від його хімічного складу і визначаються умовами охолодження литва. Термічну обробку проводять головним чином для поліпшення механічної обробки литва, виробленого із чавуну з пластинчастим графітом і високоміцного чавуну, у тонких перерізах яких внаслідок швидкого охолодження спостерігається відбіл. Шар білого чавуну має високу твердість і погану оброблюваність різанням. У цьому випадку є необхідним графітізуюче відпалювання.

Для стабілізації розмірів і усунення внутрішніх напружень, які виникають завдяки неоднаковій швидкості охолодження окремих частин литва і призводять до зміни форми виробів (короблення), утворення тріщин, застосовують релаксаційне відпалювання при температурі 500...600°C чи природне старіння шляхом витримки литва протягом 3...15 міс на відкритому повітрі чи у приміщенні складу.

Для більшого зниження напружень використовують вібраційне старіння і старіння з тимчасовим статичним перевантаженням. Тимчасові навантаження, що виникають в останніх двох випадках, сумуються з залишковими, викликаючи пластичну деформацію і більш повний перебіг релаксаційних процесів та, як наслідок, зниження напружень на 15...30%.

Для зміни механічних властивостей литва за рахунок підвищення дисперсності складових металічної основи застосовують нормалізацію, а також

різновиди гартування з поліморфним перетворенням : безперервне охолодження при гартуванні, ізотермічне гартування, обробку холодом. Після гартування литво підлягає відпуску для зняття напружень, отримання заданої твердості, міцності, зносостійкості.

Особливістю термічної обробки чавунів на відміну від сталі є необхідність строгого врахування структурного стану та властивостей вихідного чавуну. Специфічними процесами термічної обробки чавунів є графітизація, тобто розкладання цементиту для зменшення кількості зв'язаного вуглецю; розчинення графіту і збагачення вуглецем аустеніту, що зумовлює збільшення кількості перліту у структурі чавуну.

Основними видами термічної обробки сірого чавуну є:

- ✓ відпал;
- ✓ нормалізація;
- ✓ гартування (об'ємне, поверхнєве);
- ✓ відпуск.

Низькотемпературний відпал (500...600 °С), або штучне старіння, протягом 1...8 год. здійснюють повільним нагріванням (70...100 °С/год.) і повільним охолодженням з піччю (20...50 °С/год.) до 250 °С і далі – на повітрі. Застосовують його для зняття напружень, запобігання деформації й тріщиноутворення під час механічної обробки та експлуатації.

Середньотемпературний відпал (680...750 °С) – графітизуючий, застосовують для зменшення твердості, підвищення пластичності та ударної в'язкості, поліпшення оброблюваності. Залежно від потрібної структури тривалість відпалювання змінюють у межах 1...4 год.

Високотемпературний відпал (850...950 °С) – графітизуючий (0,5...5,0 год.), використовують для зменшення твердості та поліпшення оброблюваності. Здійснюють повільним нагріванням і охолодженням з піччю до 250 °С, далі – на повітрі. Нормалізацію (охолодження на повітрі) від 850...950 °С застосовують для підвищення твердості та зносостійкості.

Гартування у воді або маслі від 850...930 °С з витримуванням при нагріванні 0,5...3,0 год. використовують для підвищення твердості до 500 НВ, міцності та зносостійкості. Ізотермічне гартування чавуну переважає традиційні види підвищення твердості та зносостійкості виробів, проте ускладнює обробку різанням. Воно зводиться до аустенізації та наступного ізотермічного розпаду аустеніту в проміжній області С-подібної діаграми з утворенням переважно структури бейніту.

Ізотермічне гартування чавуну складається з двох етапів:

- ✓ аустенізації при 820...900 °С, витримування за цієї температури 0,2...1,5 год.;
- ✓ переохолодження аустеніту з наступним розпадом його в ізотермічних умовах в інтервалі температур від 250...300 до 450...500 °С.

Швидко нагріваючи поверхню чавуну до 840...950 °С струмами високої частоти, газовим полум'ям тощо і охолоджуючи у воді, маслі та інших охолоджувальних середовищах здійснюють поверхнєве гартування. Це забезпечує підвищення твердості до 55 HRC та стійкості проти спрацювання.

Відпуск виробів із сірих чавунів застосовують для усунення термічних напружень, підвищення в'язкості та пластичності. При цьому температура відпуску становить 250...600 °С, тривалість – 1...3 год. залежно від потрібної твердості. Термічну обробку білого чавуну проводять для одержання з нього ковкого чавуну з високою міцністю та пластичністю, застосовуючи для цього спеціальний режим графітуючого відпалювання. Для цього використовують білий чавун з досить вузьким інтервалом вмісту легуючих елементів: 2,4...2,8% С; 0,8...1,4% Si; < 1% Mn; ≤ 0,1% S; ≤ 0,1% P.

Під час графітуючого відпалу цементит у чавуні розпадається з утворенням фериту і графіту або перліту і графіту. феритний ковкий чавун на зламі має темний колір. Злам перлітного чавуну сірий.

Сучасний процес графітуючого відпалу складається з двох стадій.

✓ -Перша стадія – рівномірне нагрівання до 950...1000 °С. За цієї температури відбувається графітація надлишкового цементиту (10...15 год.), потім чавун охолоджують з піччю до 740 °С зі швидкістю 70...100 °С/год.

✓ Друга стадія – ізотермічна обробка за такої температури (протягом майже 30 год.), після чого чавун охолоджують на повітрі.

На цій стадії графітується цементит перліту. Остаточна структура після графітуючого відпалювання складається з фериту та пластівчастого графіту.

Перлітний ковкий чавун отримують у результаті неповного відпалювання: після першої стадії графітації при 950...1000 °С чавун охолоджується з піччю, друга стадія графітації не проводиться.

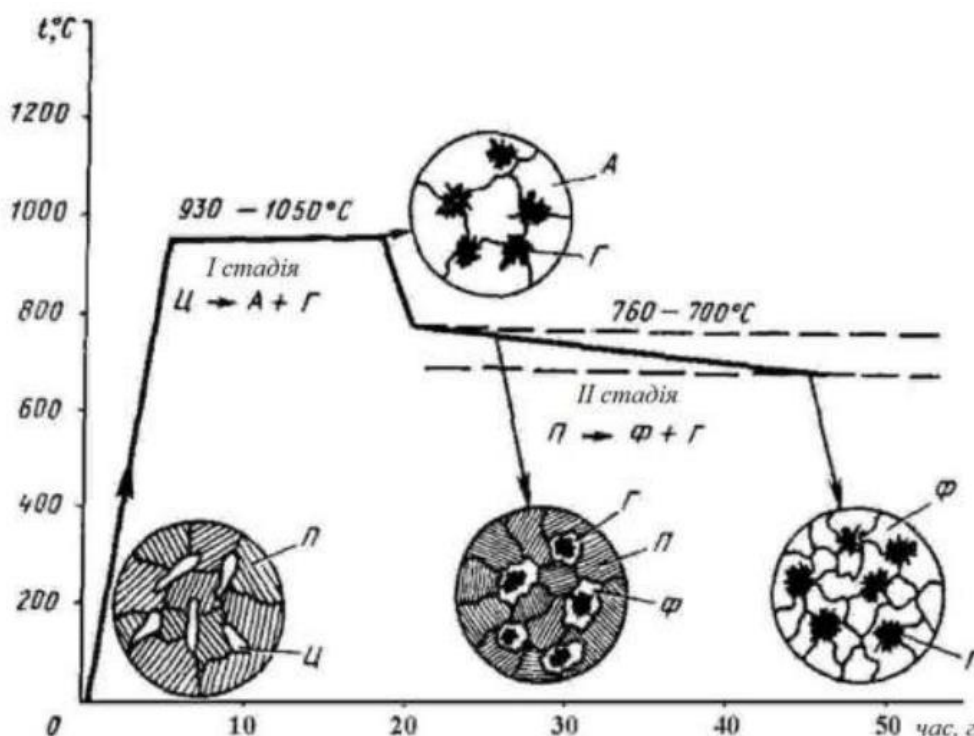


Рисунок 1 – Схема графітації чавуну

Для підвищення в'язкості перлітний чавун піддають сфероїдації при 700...750 °С, за якої отримують структури зернистого перліту. При термічній обробці ковких чавунів для підвищення міцності та зносостійкості їх піддають

гартуванню з відпуском або нормалізації. Гартування здійснюють від 850...900 °С з охолодженням у маслі або воді, відпуск – залежно від потрібної твердості (у більшості випадків при 650...680 °С). Гартування можна здійснювати також після першої стадії графітизації по досягненні температури 850...880 °С з наступним високим відпуском. застосовують також режим поверхневого гартування.

Нормалізацію ковкого чавуну здійснюють нагріванням до 850...900 °С з витриманням 1...1,5 год. і наступним охолодженням на повітрі. Якщо нормалізовані вироби мають підвищену твердість, їх після цього піддають високому відпуску при 650...680 °С протягом 1...2 год. Термічну обробку високоміцного чавуну проводять для того, щоб зняти внутрішні напруження (на 80...90%) виливків складної форми. Для цього їх повільно нагрівають до 500 °С, витримують за цієї температури 2...3 год. і охолоджують з піччю до 200 °С, а далі – на повітрі.

Хіміко-термічна обробка чавунів. Азотування. До азотування зазвичай використовують сірі чавуни, леговані хромом, нікелем, молібденом та іншими елементами, здатними утворювати нітриди, а також високоміцні чавуни. Метою процесу є підвищення твердості до 600...1000 НВ, зносостійкості та корозійної стійкості в газових середовищах. Азотування проводять при 550...580 °С протягом 50...70 год залежно від необхідної глибини азотованого шару. Після витримання деталі охолоджують разом із піччю.

Перед азотуванням сірий чавун піддають відпалу при 950...1000 °С (4...12 год) для розпаду цементиту. Щоб забезпечити високі механічні властивості металевої основи після відпалу, чавун гартують від 800...850 °С у маслі та короткочасно відпускають при 600 °С.

Перспективним різновидом є азотування у тліючому розряді. Такий процес істотно підвищує стійкість при терті та зношуванні, а також втомну міцність при знакозмінному навантаженні. Отриманий дифузійний шар характеризується відсутністю крихкості та міцним зчепленням з підшаром.

Алітування. Алітування чавунних виробів проводять з метою підвищення жаротривкості за режимами, аналогічними до алітування сталей. Найчастіше використовують порошкові суміші на основі феросплавів алюмінію. Процес здійснюють при 950...1050 °С протягом 2...6 год після повільного підігрівання виробів до 500 °С. Охолодження проводять на повітрі або разом із піччю.

Хромування. Хромування чавунів здійснюють у твердих середовищах протягом 10...12 год або у газових – приблизно 5 год. Після хромування забезпечуються підвищена жаростійкість, корозійна стійкість та поверхнева твердість до 1600 НВ.

Силіціювання. Для підвищення кислотостійкості та твердості поверхні ковких і сірих чавунів застосовують силіціювання в твердих або газових середовищах при 1000...1100 °С. На ковкому чавуні при витриманні 20...25 год формується шар товщиною 0,5...0,8 мм, тоді як на сірому чавуні за той самий час утворюється лише близько 0,1 мм. Найвищі результати силіціювання спостерігаються на ковких чавунах, задовільні – на сірих.

Сульфідкування. Для полегшення механічної обробки чавунів різанням застосовують сульфідкування виливків шляхом повільного нагріву до

550...600 °С у сірковмісних середовищах. Для формування шару товщиною близько 0,3 мм тривалість насичення має становити приблизно 3 год. Після завершення процесу охолодження проводять на повітрі.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. Для вивчення графітуючого відпалювання розглянути структури чавуну до відпалу. Описати та схематично відобразити структури чавуну.

2. Описати структурні зміни чавуну з урахуванням термічної обробки при температурі 900°С та спрогнозувати зміни структури за різної витримки (15, 30, 60 хв і 2 год)

3. Зобразити графік графітуючого відпалу в координатах температура-час. До нагріву і витримки врахувати перенесення у піч нагріту до 680°С, з відпалом протягом 2 год.

4. Кінцеву мікроструктуру потрібно замалювати.

5. У звіті необхідно описати структурні зміни, що відбуваються при відпалюванні, враховуючи розпад цементиту, фериту і графіту нижче A_1 . У висновку з роботи необхідно вказати на оптимальну тривалість високотемпературного відпалювання.

Питання для самоконтролю

1. Пояснити специфічні особливості термічної обробки чавунів.
2. Перелічити основні види термічної обробки сірих чавунів.
3. Які види відпалу сірих чавунів?
4. Проаналізуйте призначення та режими проведення різних видів відпалу чавунів.
5. Охарактеризуйте призначення та режим проведення гартування чавунів.
6. Що таке графітизація?
7. Чому термічна обробка чавунів відрізняється від ТО сталей?

Практична робота №12

Азотування та структурні перетворення при азотуванні

Мета роботи – вивчити основні процеси, що протікають при азотуванні, визначити формування структури поверхневого шару та серцевини азотованого зразка.

Теоретичні відомості

Азотування – процес дифузійного насичення поверхні виробів азотом. Мета азотування – підвищити твердість, зносостійкість, границю витривалості та опір корозії.

В сплавах системи Fe-N (рис. 1) утворюються наступні фази:

- ✓ α -фаза – твердий розчин втілення азоту в α -Fe з граткою ОЦК;
- ✓ γ -фаза – твердий розчин втілення азоту в γ -Fe з граткою ГЦК;
- ✓ γ' -фаза – твердий розчин на основі нітриду Fe_4N з ГЦК граткою.
- ✓ ε -фаза – твердий розчин на основі нітриду Fe_3N з граткою ГЦП.

Твердість нітридів заліза відносно невисока: γ' -фази – HV 550 (HRC 50); ε -фази – HV 450 (HRC 44). Тому твердість вуглецевих сталей після азотування не перевищує HV600 і для азотування використовують леговані алюмінієм,

ванадієм та хромом сталі. В них, окрім нітридів AlN , VN , Cr_2N , для яких характерна висока твердість, є зони з підвищеним вмістом азоту і легувальних елементів, що створюють пружні викривлення ґратки α -твердого розчину. Високодисперсні нітриди легувальних елементів та збагачені азотом, алюмінієм, ванадієм та хромом зони гальмують рух дислокацій і підвищують твердість азотованого шару легуваних сталей (HV 1000...1200).

Азотування конструкційних сталей проводиться при температурах нижче $591^\circ C$ – температури евтектоїдного перетворення в системі Fe-N.

Використовують середньовуглецеві (0,3...0,45 %C) легвані сталі 38Х2МЮА, 30Х2Н2МФА, 40ХНМ та ін. Перед азотуванням деталі проходять поліпшення (гартування і високотемпературне відпускання), щоб забезпечити в'язку серцевину і підготувати структуру до азотування.

Азотування при $520...560^\circ C$ дозволяє сформувати шар 0,3...0,6 мм за 30...60 годин, тобто швидкість азотування складає 0,01 мм/год. Атомарний азот для насичення утворюється при дисоціації аміаку $2NH_3 \rightarrow N+3H_2$.

Після насичення деталі охолоджуються з піччю в атмосфері аміаку до $150...200^\circ C$, а потім на повітрі. Висока твердість азотованого шару забезпечується утворенням твердого розчину втілення азоту в α -Fe і головним чином, нітридами легувальних елементів. Тому після азотування термічна обробка не виконується.

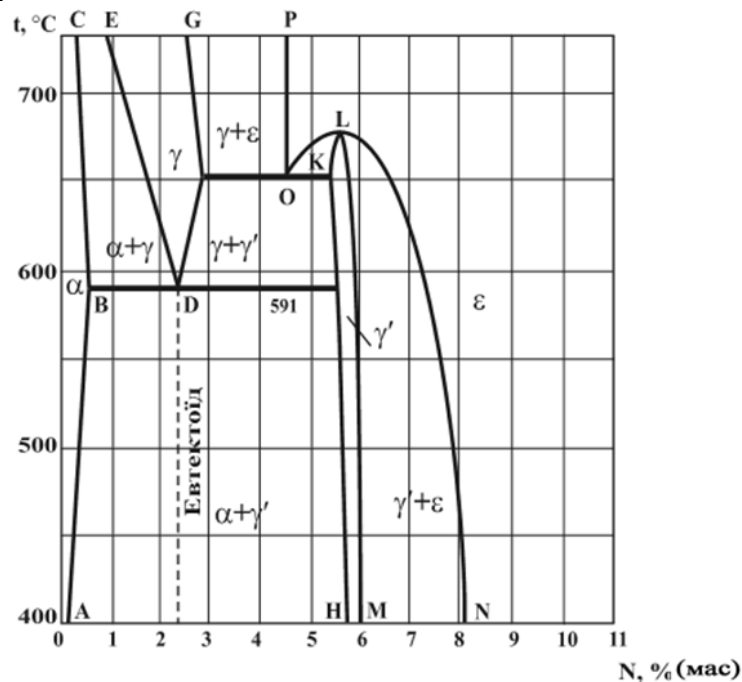


Рисунок 1 – Фрагмент діаграми стану системи Fe-N

Переваги азотування порівняно із цементацією: більша твердість поверхні, яка зберігається при нагріванні до $500^\circ C$ (твердість цементованих виробів знижується при нагріванні вище $200^\circ C$); підвищені зносостійкість, границя витривалості, кавітаційна стійкість; опір корозії в повітряній атмосфері, прісній воді і її парі; незначна деформація виробів. Недоліки азотування: повільна швидкість насичення; підвищена крихкість азотованого шару.

Для азотування переважно використовують середньовуглецеві легвані сталі, до складу яких входять Cr, W, Mo, V, Al. З наведеними елементами азот

утворює дрібнодисперсні термічно стійкі дуже тверді нітриди (хімічні з'єднання). Типовими сталями, що азотуються, є сталі 35ХМЮА, 38ХМЮА, 40Х, 18ХНВА, сталь 30 та ін. Перед азотуванням деталі піддають покращенню (загартування + високий відпуск). Потім виконують механічну обробку для надання деталям необхідних розмірів.

Атомарний азот, що утворився внаслідок реакції, поглинається поверхнею сталі та дифундує в глибину металу. Якщо метою загартування є висока твердість та зносостійкість, то доцільно використовувати сталі, до складу яких входить Al. Наприклад 38ХМЮА. В поверхневому шарі таких сталей утворюються нітриди (хімічні з'єднання) Fe_2N , CrN, MoN, AlN. Наявність нітридів зумовлює високу твердість поверхневого шару

Залежно від умов експлуатації деталей процеси азотування класифікують на два типи:

- 1) для отримання високої поверхневої твердості та зносостійкості;
- 2) для отримання деталей з поверхневим шаром, який характеризується високою корозійною стійкістю.

Для отримання високої поверхневої твердості та зносостійкості деталей, процес азотування, при температурі 500...520°C, триває від 20 до 90 годин.

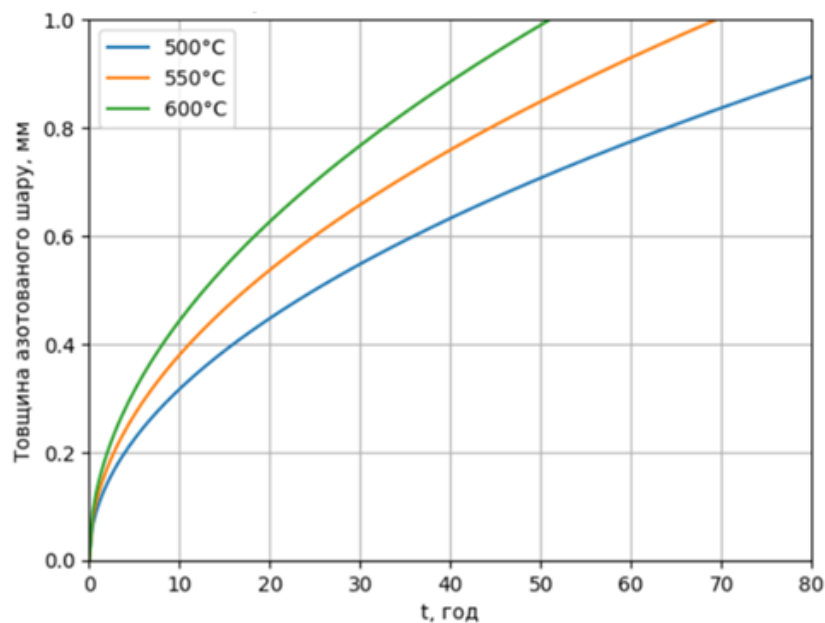


Рисунок 2 – Залежність товщини шару від тривалості процесу азотування

Швидкість дифузійного насичення поверхні металу азотом близька до 0,01мм за 1 годину. Оптимальним є вміст азоту в поверхневому шарі 10...12%. Товщина шару складає близько 0,3...0,6мм, а його твердість HV – 1000...1200. Для прискорення процесу азотування його виконують двоступенево, рис.3, спочатку при температурі 500...520°C, а потім при 560...600 С. Після азотування деталі охолоджують разом з піччю.

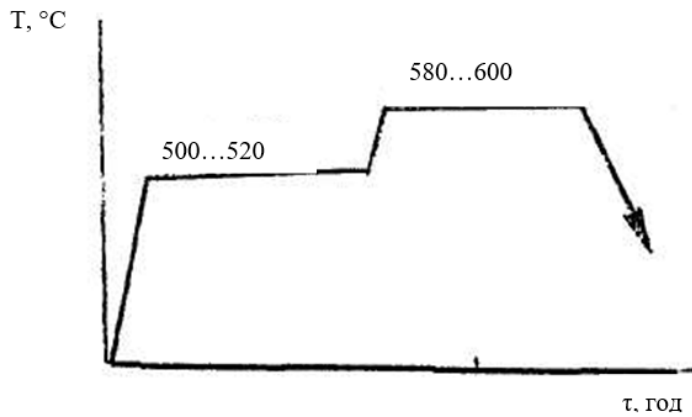


Рисунок 3 – Схема двоступеневого процесу азотування

Структура азотованого шару складається із двох контактуючих ділянок:

1) поверхневий шар, що відноситься до зовнішньої ділянки, має товщину близько 0,01...0,03 мм. Він характеризується значним вмістом азоту і являє собою ϵ -фазу, товщиною 0,01...0,03 мм, яка має білий вигляд, не травиться і є корозійно-стійкою в агресивному середовищі. При товщині ϵ -фази $\leq 0,03$ мм вона стає крихкою, тому її товщину слід обмежити 0,03 мм;

2) з зовнішньою ділянкою, по глибині деталі, безпосередньо контактує друга ділянка, що характеризується темною структурою. Така структура являє собою азотистий евтектоїд, тобто суміш азотистого фериту, карбонітридів та нітридів. Внутрішня область деталі має структуру сорбіту відпуску, яку отримали внаслідок покращення.

Для підвищення корозійної стійкості вуглецевих та легованих сталей їх азотування виконують при температурах 650...700 °С. Наведені умови сприяють підвищенню інтенсивності дифузії і відповідно значному прискоренню терміну азотування. Підвищення температури азотування сприяє збільшенню глибини азотованого шару, але при цьому зменшується твердість шару.

Процес азотування в середовищі розчинів ціаністомістких солей $KCNO$, KCN , при температурі 570°C, характеризується відчутно скороченим терміном його проведення в порівнянні з азотуванням в середовищі NH_3 . Водночас недоліком цього процесу є використання отруйних солей.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

Користуючись зразками, а також альбомами з фотографіями мікроструктур, вивчити структуру поверхневого шару і серцевини легованої сталі 38Х2МЮА після азотування.

Схематично зарисувати структуру азотованого шару. Позначити структурні складові. Використовуючи дані про структуру, побудувати і пояснити графік “твердість-відстань від поверхні” зразка

Порівняти температури і тривалість процесів, глибину зміцненого шару, структуру і твердість поверхні та серцевини.

Питання для самоконтролю

1. Принципи підвищення твердості, зносостійкості, міцності, опору втомі після різних способів поверхневого зміцнення.

2.. Попередня термічна обробка виробів із азотованих сталей. Сутність азотування. Сталі для азотування, температура та тривалість процесу.

3 Структура і властивості сталей після азотування. Вплив легувальних елементів на властивості азотованого шару.

4. Переваги та недоліки азотування порівняно із цементациєю.

Практична робота №13

Термічна обробка цементованої сталі

Мета роботи – вивчити вплив режимів термічної обробки на мікроструктуру і твердість цементованого шару і серцевини вуглецевих та легованих сталей. Сформувати практичні навички обґрунтування вибору режимів термічної обробки цементованих сталей після хіміко-термічної обробки, аналізу структурних перетворень у поверхневому шарі та серцевині, а також прогнозування експлуатаційних властивостей деталей.

Теоретичні відомості

Цементация є одним із найпоширеніших методів хіміко-термічної обробки, що забезпечує насичення поверхневих шарів сталі вуглецем з утворенням високовуглецевого шару. Після цементациї сталь має значну структурну неоднорідність, тому для формування необхідних властивостей обов'язково застосовують подальшу термічну обробку.

Цементация є процесом хіміко-термічної обробки сталі, спрямованим на насичення поверхневого шару вуглецем при температурі аустенізації. Після цементациї сформована поверхнева зона має підвищений вміст вуглецю (0,8...1,2 % C), тоді як серцевина зберігає низьковуглецевий склад (0,1...0,25 % C). Саме ця неоднорідна структура зумовлює необхідність правильно підбраної термообробки для отримання одночасно високої твердості поверхні та в'язкості серцевини.

Термічна обробка цементованих сталей спрямована на отримання твердої зносостійкої поверхні з мартенситною структурою при збереженні в'язкої і міцної серцевини. Найпоширенішим є гартування з подальшим низьким відпуском. Температура нагріву під загартування може бути єдиною для всієї деталі або диференційованою для поверхні і серцевини.

Після цементациї термообробка має забезпечити:

- ✓ мартенситну структуру високовуглецевого поверхневого шару;
- ✓ достатню пластичність та ударну в'язкість серцевини;
- ✓ мінімальні залишкові напруження та деформації;
- ✓ стабільність вимірів та експлуатаційних властивостей деталі;
- ✓ зняття крихкості поверхневого шару.

Особливу увагу приділяють контролю росту зерна аустеніту та запобіганню утворенню надмірної кількості залишкового аустеніту у цементованому шарі. Вибір режиму відпуску дозволяє знизити внутрішні напруження та стабілізувати структуру поверхневого шару. Для отримання заданого комплексу механічних властивостей після цементациї необхідна додаткова термічна обробка. Цією обробкою можна виправити структуру і

подрібнити зерно серцевини і цементованого шару, яке неминуче збільшується під час довгої витримки при високій температурі цементації, отримати високу твердість у цементованому шарі, хороші механічні властивості серцевини; усунути карбідну сітку в цементованому шарі, яка може з'явитись при насиченні його вуглецем до заевтектоїдної концентрації.

У залежності від умов роботи, а також від обраної для виготовлення деталі сталі режим зміцнюючої термічної обробки може бути різним. Для відповідальних, важконавантажених деталей машин, які працюють в умовах тертя, з метою усунення перегріву і надання цементованому шарові високої твердості потрібно застосовувати подвійну термічну обробку. Перша термічна обробка – гартування або нормалізація з окремим нагрівом цементованої сталі до температури, на $30...50^{\circ}\text{C}$ вищої від температури A_{c3} , призначається для виправлення структури серцевини. Крім того, при нагріванні у поверхневому шарі в аустеніті розчиняється цементитна сітка, яка при швидкому охолодженні знову не утворюється. Витримка при цій температурі повинна бути короткочасною для уникнення повторного перегріву. Короткочасність витримки і прискорене охолодження дозволяють отримати дрібнозернисту структуру внутрішніх шарів металу внаслідок фазової перекристалізації. Високовуглецевий цементований шар залишається при цьому перегрітим, тому що для нього температура гартування знаходиться нижче від точки A_{cm} . Друге гартування проводять з нагріванням до температури, на $30...50^{\circ}\text{C}$ вищої від температури A_{c1} , для усунення перегріву цементованого шару і надання йому високої твердості.

Деталі менш відповідального призначення після цементації піддають більш простій термічній обробці, яка складається з одинарного гартування безпосередньо з цементаційної печі після підстужування виробів до температури $840...860^{\circ}\text{C}$. Така обробка не виправляє структури цементованого шару і серцевини і не призводить до подрібнення зерна. Тому вона придатна тільки для спадково дрібнозернистої сталі. Безпосереднє гартування недопустиме для високолегованих сталей через загрозу утворення у структурі цементованого шару надмірної кількості залишкового аустеніту, внаслідок чого може значно знизитись міцність виробу.

Внаслідок термічної обробки поверхневий шар отримує структуру мартенситу або мартенситу з невеликою кількістю залишкового аустеніту і надлишкових карбідів. Вміст залишкового аустеніту не повинен перевищувати $15...20\%$. Недопустиме виділення карбідів у формі сітки на границях зерен або виділення у значній кількості ізольованих карбідів, тому що у такій формі вони знижують в'язкість цементованої сталі.

Заключною операцією термічної обробки цементованих виробів в усіх випадках є низький відпуск при температурі $180...200^{\circ}\text{C}$, який переводить мартенсит гартування у поверхневому шарі у відпущений мартенсит. Твердість після гартування і відпуску для вуглецевих сталей (15,20,25) дорівнює $60...64\text{HRC}$, а для легованих (20X, 12XНЗА, 18ХГТ, 25ХГМ та ін.) – $58...61\text{HRC}$; зниження твердості в останньому випадку пояснюється утворенням великої кількості залишкового аустеніту.

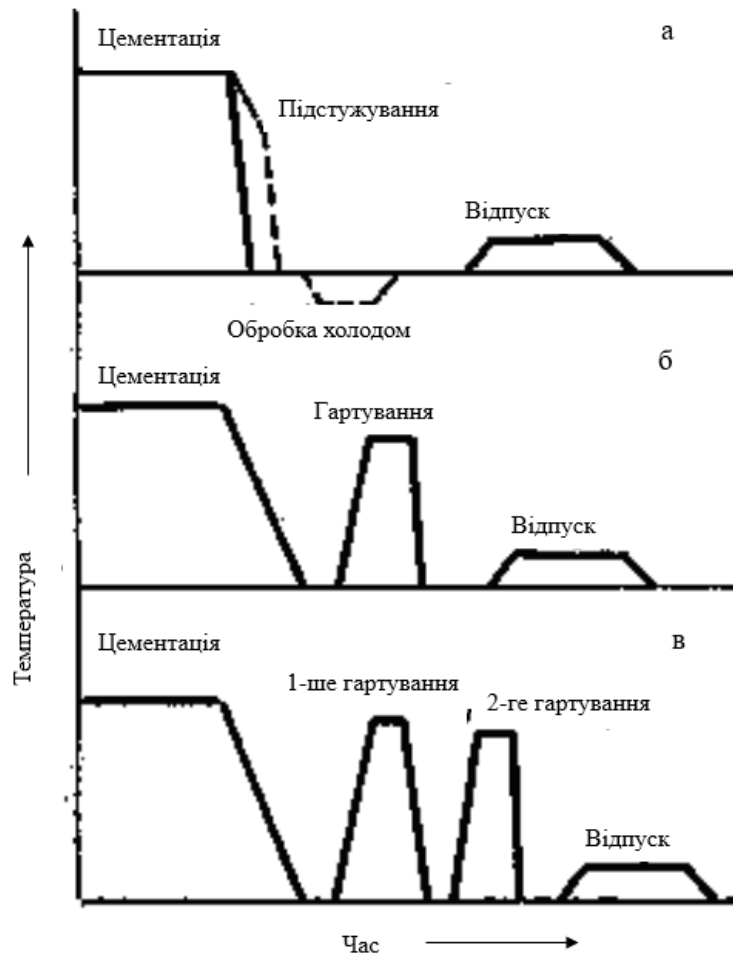


Рисунок 1 – Схеми режимів термічної обробки після цементації

Серцевина деталей з вуглецевих сталей дає структуру сорбіту, а з легуваних – бейніту або низьковуглецевого мартенситу. Низьковуглецевий мартенсит забезпечує підвищену міцність і достатню в'язкість серцевини. Твердість серцевини, як правило, дорівнює 25...40HRC у залежності від хімічного складу вихідної сталі.

При відповідно підібраній термообробці формується:

- ✓ поверхневий шар: мартенсит відпуску + карбіди → висока твердість + зносостійкість;
- ✓ перехідна зона: троостит/сорбіт → градієнт властивостей;
- ✓ серцевина: сорбіт/ферит + карбіди → в'язкість та опір ударним навантаженням.

У промисловій практиці застосовують кілька технологічних схем, серед яких найбільш типові подано у таблиці.

Таблиця 1 – Технологічні режими ТО після цементації

ТО	Температура гартування, °С	Охолодження	Температура відпуску, °С	Твердість поверхні/серцевини, HRC	Очікуваний результат
Гартування + низький відпуск	780...860	Вода/масло/полімер	150...200	58...65/ 30...45	Для відповідальних деталей. Висока зносостійкість.
Подвійне гартування + низький відпуск	1-ше 850...900 2-ге 780...820	Вода/масло	150–200	58...65/ 32...45	Знижує деформації у великих деталях.
Гартування + високий відпуск	780...860	Масло/полімер	350...500	45...55/ 28...40	Для деталей з ударними навантаженнями, підвищує в'язкість поверхні.
Ізотермічне гартування (бейнітне)	800...850 ізотермічна витримка 250...350	Соляні ванни	200...300 °С	50...58/ 30...40	Мінімальні деформації, стабільність розмірів, висока в'язкість.
Гартування + відпуск + старіння	780...860	Масло	150...200 + витримка	58...62/ 30...40	Підвищує стабільність у часі, застосовується для прецизійних деталей.
Гартування з охолодженням в струменях газу	800...900	Азот/Аргон	150...200	58...65/ 32...45	Деталі високої точності, мінімум окалини та деформацій.

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. Порівняти режими обробки вуглецевих і легованих сталей (марки сталей указує викладач), цементованих з перегрівом (наявність карбідної сітки у цементованому шарі, вміст вуглецю 1,0...1,2%, товщина шару не менше 2 мм).
2. Для проведення одинарної термічної обробки кожної сталі обрати температуру гартування.
3. Для подвійної термічної обробки вуглецевої та легованої сталей обрати температуру гартування. Для гартованих зразків визначити режим відпуску.
4. За допомогою довідника визначити твердість поверхневого шару та серцевини зразків, описати отримані мікроструктури, у тому числі вихідних зразків.

5. У звіті з роботи необхідно пояснити зміст структурних змін внаслідок кожної операції термічної обробки, проаналізувати при цьому зміну твердості, викликану термічною обробкою.

Питання для самоконтролю

1. З яких основних етапів складається цементація і ТО після цементації?
2. Які основні варіанти термічної обробки застосовують після цементації та в чому їх відмінність?
3. Яка роль температури аустенізації при гартуванні цементованих сталей?
4. Чому після гартування обов'язково проводять відпуск і які зміни структури при цьому відбуваються?
5. Що таке перехідна зона між поверхневим шаром та серцевиною і яке її призначення?
6. Як змінюється твердість від поверхні до серцевини цементованої деталі та чому?
7. Які структури можуть формуватися в поверхні, перехідній зоні та серцевині після різних режимів ТО?
8. У яких випадках застосовують подвійне гартування і який ефект воно дає?
9. Що забезпечує ізотермічне гартування та в яких випадках воно технологічно доцільне?
10. Чому стабільність розмірів є важливим критерієм для цементованих деталей високої точності?

Практична робота №14 **Термічна обробка алюмінієвих сплавів**

Мета роботи – практично ознайомитися з термічною обробкою (ТО) дюралюмініїв і визначити залежність механічних властивостей сплавів від режиму ТО (гартування і природного старіння).

Теоретичні відомості

Сплави на основі алюмінію широко використовуються в машинобудуванні і особливо в авіабудуванні. Вони мають малу густину (2,5...2,8 г/см³), високе значення питомої міцності $k = \sigma_b / \rho$, корозієстійкість, високі тепло- і електропровідності. За технологією виготовлення напівфабрикатів та виробів всі технічні алюмінієві сплави поділяють на три групи: деформівні, ливарні і спечені. Віднести алюмінієвий сплав до тієї чи іншої групи можна за характером взаємодії з легуючими елементами, тобто за типом діаграми стану (рис.1). При цьому враховується схильність сплаву до зміцнення при ТО, у зв'язку з чим сплави поділяються на зміцнювані і незміцнювані при ТО.

Незміцнювані при ТО сплави (АМц, АМг, АМг3, АМг5, АМг6) застосовуються в трьох станах: відпаленому, напіввідпаленому і нагартваному, в зв'язку з чим їх механічні властивості можуть бути різними.

Ці сплави мають високу корозієстійкість, але невисоку міцність і добре зварюються. Застосовуються у вигляді листів для виготовлення виробів, ємностей (бензо- і маслбаків) та деталей, що виготовляються холодним штампуванням.

Сплави, що зміцнюються при ТО, характеризуються більш високими механічними властивостями, але недостатньою корозієстійкістю у вологому повітрі, в річковій та морській воді. За характерними властивостями ці сплави поділяють на такі групи (табл.1): підвищеної пластичності – система Al-Mg-Si конструкційні – система Al-Cu-Mg, для штампування і кування – система Al-Cu-Mg-Si, високоміцні – система Al-Zn-Mg-Cu, жароміцні – систем Al-Cu-Mn і Al-Cu-Mg.

Сплави підвищеної пластичності (авіалі - АВ) мають високу пластичність і корозієстійкість, добре зварюються. З цих сплавів одержують листи, труби, пресовані профілі та інші напівфабрикати, а також виготовляють лопасті гвинтів гелікоптерів, ковані деталі двигунів, рами, вікна, двері тощо.

Конструкційні алюмінієві сплави (дюралюміні) – найбільш старі сплави, широко використовуються в різних галузях техніки, зокрема, в авіації. З них виготовляють лопасті гвинтів (Д1), обшивки, лонжерони літаків (Д16), а також кузови вантажних автомобілів, будівельні конструкції, труби і т.п. Для заклепок використовуються сплави Д18 і В65, що мають високу технологічність, добре розклепуються.

Сплави АК для штампування і пресування мають високу пластичність і стійкі до утворення тріщин при гарячій пластичній деформації. З них виготовляють фітинги, кріпильні деталі, пояси лонжеронів, лопасті гвинтів гелікоптерів, бандажі вагонів.

Високоміцні сплави В95, В96 використовуються в літакобудуванні для високонавантажених конструкцій (шпангоути, лонжерони, силові каркаси).

Жароміцні сплави застосовують для виготовлення деталей, що працюють при $t \leq 300$ °С (поршні двигунів, головки циліндрів, диски компресорів турбореактивних двигунів).

Для формування певної структури і одержання потрібних властивостей виробів алюмінієві сплави у більшості випадків піддаються термічній обробці: відпалу, загартуванню та старінню.

Відпалу піддають сплави, що знаходяться в нерівноважному стані (пластично деформовані, литі або попередньо термічно оброблені). Розрізняють такі види відпалу. Гомогенізуючий відпал зливає усуває хімічну неоднорідність (ліквацію) твердих розчинів. Проводиться при $t = 450...540$ °С, $\tau \leq 40$ год. Рекристалізаційний відпал усуває нерівноважність структури, що виникає при холодній та гарячій пластичній деформації (текстуру, наклеп). В результаті знижується міцність і підвищується пластичність. Проводиться при $t = 350...500$ °С, протягом 0,5...2 год.

Неповний відпал (дорекристалізаційний) проводиться як заключна операція при $t = 200...350$ °С протягом часу, що дає можливість підібрати оптимальне поєднання міцності і пластичності деталей. Відпал для стабілізації розмірів литих деталей при $t = 300$ °С протягом 5...10 год. Відпал для зниження міцності виробів, що піддавались ТО для зміцнення, повертає сплави до

вихідної рівноважної структури і проводиться при t близько $400\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 1...2 год.

Гартування проводиться з метою одержання при кімнатній температурі структурного стану, властивого підвищеній температурі, а саме перенасиченого твердого розчину. Загартування алюмінієвих сплавів ґрунтується на змінній розчинності легуючих елементів (Cu, Mg, Si, Zn) в твердому розчині. *Наприклад*, в сплаві Al + 4,5 % Cu перед загартуванням маємо α -твердий розчин і кристали CuAl_2 . При нагріванні до $t = 500\text{ }^\circ\text{C}$ під загартування відбувається розпад CuAl_2 і підвищення концентрації Cu в α -твердому розчині від 0,1 % при $20\text{ }^\circ\text{C}$ до 4,5 % при температурі загартування.

Основними технологічними параметрами гартування є температура нагрівання і швидкість охолодження. Оскільки в більшості промислових сплавів вміст легуючих елементів більше граничної розчинності їх при евтектичній температурі, то вони завжди мають деяку кількість легкоплавкої евтектики, яка при перевищенні температури ($t > t_{\text{евт}}$) оплавиться по границях зерен, що приведе до зниження міцності, твердості і в'язкості. Отже, нагрівання сплавів до температур вищих евтектичної є недопустимим.

Старіння. В нерівноважній структурі після загартування з часом протікають структурні зміни, що називаються старінням, пов'язані з дифузійним перерозподілом атомів і виділенням з твердого розчину надлишкових інтерметалідних фаз. Природне старіння відбувається при кімнатній температурі протягом довгого часу (десятки діб). При нагріванні має місце штучне старіння, час якого вимірюється годинами.

При кімнатній температурі (природне старіння) чи при нагріванні до $100\text{ }^\circ\text{C}$ (низькотемпературне штучне старіння) відбувається перша стадія старіння, під час якої атоми Cu утворюють в площинах $\{100\}$ внаслідок дифузії дископодібні скупчення, що називаються зонами Гіньє-Престона – 1 (ГП-1). Товщина їх не перевищує 5...10Å при $100\text{ }^\circ\text{C}$, тому їх не можна виявити в оптичний мікроскоп. Концентрація Cu в ГП-1 вища, ніж в твердому розчині, але ще не досягає такого вмісту, як в CuAl_2 . Різниця розмірів атомів Cu і Al обумовлює деяку деформацію ґратки зон ГП-1, але ще не втрачається когерентність (спряженість) її з ґраткою твердого розчину. Пружні спотворення ґратки обумовлюють значне підвищення твердості і міцності сплаву.

На другій стадії розпаду при температурах $150\text{...}200\text{ }^\circ\text{C}$ утворюються зони ГП-II (θ'' -фаза), які відрізняються від ГП-1 більшими розмірами (товщина 30Å, діаметр до 300Å), впорядкованим розміщенням атомів і концентрацією, близькою до концентрації CuAl_2 . Ґратка ГП-II подібна до ґратки твердого розчину, але вже набуває витягнутості (тетрагональності), хоча ще залишається спряженою з ґраткою твердого розчину. Утворення зон ГП-II також сприяє зміцненню сплавів.

Кількагодинна витримка при температурах $150\text{...}200\text{ }^\circ\text{C}$ приводить до утворення дисперсних (тонкопластинчатих) часток θ' -фази, яка має склад сполуки CuAl_2 (θ' -фази). Але має іншу кристалічну ґратку, яка ще когерентно зв'язана з твердим розчином. На цій стадії також має місце зміцнення сплавів.

Остання стадія відповідає коагуляції частинок θ -фази (CuAl_2) при підвищенні температури до $250\text{...}400^\circ\text{C}$, при цьому відбувається зниження міцності сплавів.

Перша і друга стадії старіння призводять до локального спотворення ґратки твердого розчину, що викликає значне зміцнення сплаву. На третій стадії зміцнення може бути незначним.

Таким чином, при природньому старінні утворюються тільки зони ГП-1, тоді як при підвищених температурах можливі всі чотири стадії, залежно від часу. Окремі стадії розпаду накладаються одна на одну і розмежувати їх дуже важко.

Значення механічних величин для Д1 після рекристалізаційного відпалу при температурі 360°C , безпосередньо після загартування подано в таблиці 1. Таблиця 1

Після ТО	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	НВ, МПа	δ , %
Відпалу	210	450	18
Загартування	300	750	18
Старіння при 200°C	490	1500	14

Вказівки щодо виконання роботи та оформлення звіту

1. Зарисувати діаграми стану Al-Cu і Al-Mg₂Si;
2. Вказати хімічний склад і область застосування сплаву Д1;
3. Визначити твердість зразків до і після гартування, та після старіння за різних температур, користуючись довідниковими даними;
4. Оформити звіт, у висновку оцінити можливі зміни структури за різних умов старіння, оформити таблицю.

Температура штучного старіння, $^\circ\text{C}$	Твердість НВ після часу старіння, хв			
	5	10	20	40
50				
100				

5. Вивчити мікроструктуру дюралюмініу після відпалу і після загартування та старіння.

Питання для самоконтролю

1. Якій термічній обробці можна піддавати алюмінієві сплави?
2. У чому полягає процес старіння алюмінієвих сплавів?
3. Як утворюються зони Гінґе-Престона?

Практична робота №15

Визначення основних параметрів технології термічної обробки виробів

Мета роботи – вивчити фактори, що впливають на вибір та величину параметрів технології термічної обробки; отримати навички у визначенні основних параметрів технології термічної обробки конкретних виробів.

Теоретичні відомості

Ефективність та якість термічної обробки виробів залежить від вірності визначення основних параметрів термічної обробки, як важливої складової загальної технології виготовлення виробів; від вірності складання технологічної карти термічної обробки; від ретельності виконання технології термічної обробки та контролю параметрів; від якості контролю виробів як в процесі, так і після завершення термічної обробки.

До основних параметрів термічної обробки відносяться:

- ✓ температура (початкова, проміжна, кінцева при нагріванні, ізотермічної витримки при охолодженні, кінцева при охолодженні, обробки холодом);
- ✓ тривалість процесу (загальна, нагрівання, ізотермічної витримки, технологічна, охолодження);
- ✓ швидкість нагрівання та охолодження на різних стадіях обробки;
- ✓ склад робочих середовищ при виконанні технологічних операцій (переходів), їх параметри та витрати;
- ✓ схеми розташування та кількість виробів в садці, маса садки.

Вихідні та додаткові дані. Для розробки режиму та визначення основних параметрів термічної обробки необхідна низка даних.

Вихідні дані отримуються безпосередньо із робочого креслення виробу, в якому зазначаються: матеріал та маса виробу; форма, розміри та вимоги щодо шорсткості поверхонь, допуски на розміри та відхилення від геометрії; вимоги до властивостей поверхні, серцевини, окремих ділянок виробу; технологічний метод виготовлення заготовки та вимоги до властивостей матеріалу заготовки; глибина зміцненого шару та його властивості; конструкційні особливості виробу, наявність концентраторів напружень, різнотовщинність, тощо. *Додаткові дані* розробник технології термічної обробки отримує із довідників, галузевих стандартів, державних та міждержавних стандартів. До цієї групи даних належать: хімічний склад матеріалу; температури критичних точок, початку та завершення мартенситних перетворень; теплофізичні характеристики матеріалу виробу (теплоємність, тепло- та температуропровідність); густина матеріалу; технологічні характеристики матеріалу виробу (зварюваність, ливарні властивості, деформованість в гарячому та холодному станах, оброблюваність різанням, прогартовуваність, прогартовуваність, схильність до водневої та зворотної відпускнуї крихкості, схильність до знеуглецювання та росту аустенітного зерна, тощо); схильність виробу до деформації та жолоблення при термічній обробці. Використовуються також: діаграми стану сплавів, до яких відносяться матеріал виробу; діаграми ізотермічного та термокінетичного перетворення високотемпературних фаз; кінетичні криві розпаду пересичених твердих розчинів при різних температурах. Особливе місце в цій групі даних посідають довідкові дані щодо рекомендованих (типових) режимів термічної (хіміко-термічної) обробки матеріалу виробу, або групи аналогічних матеріалів та виробів.

На основі вихідних та додаткових даних обґрунтовуються режими термічної обробки, вибираються основні та додаткові операції, за довідниками, каталогами обирається основне та додаткове обладнання із урахуванням річної програми випуску виробів.

Визначення температур термічної обробки

Зазвичай початкова температура виробів відповідає температурі повітря в термічному підрозділі. Але існують і винятки. Так, наприклад, заготовки після кування, штампування, зварювання, прокатки недоцільно охолоджувати до 20°C, а потім виконувати попередню термічну обробку (відпал, нормалізацію, високотемпературне відпускання). Заготовки завантажуються гарячими, використовується тепло попередніх операцій, економляться енергоносії, скорочується цикл виготовлення виробів, зменшується ймовірність жолоблення та утворення тріщин.

Проміжні та кінцева температури нагрівання залежать від операції термічної обробки, хімічного складу матеріалу, необхідних кінцевих структури та властивостей, що вимагаються від матеріалу виробу. Так, наприклад, температура гартування доєвтектоїдних вуглецевих сталей залежить від вмісту вуглецю (температури критичної точки A_3 : $t_r = A_3 + 30 \dots 50$ °C. Температура гартування алюмінієвих сплавів на ~ 50 °C нижче температури солідусу. Гартування високолегованих сталей здійснюється від температур на 100...400 °C вище, ніж температура A_1 , що пояснюється необхідністю розчинення спеціальних карбідів та насичення твердого розчину атомами легувальних елементів. Температура відпускання сталей ($< A_1$) залежить в першу чергу від необхідної кінцевої структури, тепло- та червоностійкості мартенситу та легованості сталі.

Визначення тривалості нагрівання, витримки та загального часу перебування виробів в печах (устаткуванні).

Загальний час перебування виробів визначається за рівнянням:

$$t_{\text{заг}} = t_{\text{н}} + t_{\text{в}} + t_{\text{тех}} + t_{\text{о}}$$

де, $t_{\text{н}}$ – тривалість нагрівання поверхні виробів до номінальної температури;

$t_{\text{в}}$ – тривалість витримки для наскрізного прогрівання;

$t_{\text{тех}}$ – технологічна витримка необхідна для завершення фазових перетворень, протікання дифузійних процесів, формування шару при ХТО, розчинення (виділення) надлишкових фаз, гомогенізації, тощо;

$t_{\text{о}}$ – тривалість охолодження виробів із піччю.

Тривалість нагрівання визначається за спрощеною емпіричною залежністю:

$$t = S \cdot k \cdot L \cdot f$$

Витримка $t_{\text{в}}$ необхідна для усунення перепаду температур між поверхнею та центром виробу i , як наслідок, забезпечення після термічної обробки однорідних структури та властивостей в різних точках перерізу виробу. Перепад температур після нагрівання впродовж $t_{\text{н}}$ залежить від умов передачі тепла (a), а також теплопровідності матеріалу виробу (l) та характеристичного розміру виробу (S). Зазначені величини використовуються при розрахунках критерія Біо: $Bi = a \cdot S / l$.

Час витримки можна визначити за співвідношенням $t_{\text{в}} = (0,05 \dots 0,20)t_{\text{н}}$. Менші значення приймаються для виробів та умов нагрівання із $Bi < 0,25$, більші – при $Bi \geq 0,25$.

Тривалість технологічної витримки може бути розрахована або визначена за довідковою літературою. Наприклад, коли при нітроцементації необхідно отримати шар $h=0,5...0,7$ мм за умови, що швидкість процесу $v_{\text{НЦМ}} = 0,15$ мм/год, $t_{\text{тех}} = h/v_{\text{НЦМ}} = 0,6/0,15 = 4$ год. У випадку довготривалих дифузійних процесів при гомогенізації, відпалі, старінні, тривалість яких розрахувати неможливо, користуються в кожному конкретному випадку експериментальними або довідковими даними. Так, наприклад, природне старіння сплаву Д16 триває 4...7 діб, старіння сплаву ЖС6К при 750...800°C – 16 год. Охолодження із нагрівальними пристроями здійснюється при відпалі, після азотування, тощо. Тривалість охолодження визначається за рівнянням:

$$t_o = (t_{\text{вп}} - t_{\text{вк}})/v_{\text{ох}}$$

де $t_{\text{вп}}$ – температура, від якої розпочинається охолодження виробів;

$t_{\text{вк}}$ – кінцева температура охолодження;

$v_{\text{ох}}$ – рекомендована для матеріалу виробів швидкість охолодження, град/год.

Визначення складу, параметрів робочих середовищ та їх витрат

Вибір складу робочих середовищ залежить від операції термічної обробки, вибраного обладнання, виду додаткової операції. В процесі нагрівання та охолодження як робочі середовища використовують гази, рідини, тверді тіла та їх частинки, а також вакуум. Гази – це повітря, азот, аргон, водяна пара, ендогаз, аміак, екзогаз, азотоводнева суміш; рідини – розтоплені солі, луги та метали, олія, вода, водні розчини солей; частини твердих тіл – кварцовий пісок, графіт, корунд, карборунд.

Якщо, наприклад, для нормалізації виробів вибрати піч СШО, то питання про робоче середовище при нагріванні та охолодженні вирішено автоматично: це повітря. При термічній обробці (гомогенізації) лопаток зі сплаву ХН65ВМТЮ в печі СЭВ нагрівання відбувається у вакуумі, а охолодження – в аргоні. У випадку гартування тонких виробів зі сталі Р6М5 із використанням печі СВС робоче середовище при аустенізації – розтоплена сіль, а при охолодженні – масло.

Робочі середовища, їх склад необхідно визначати для усіх основних та додаткових операцій. До параметрів робочих середовищ відносяться температура (інтервал температур), тиск, швидкість руху. Зазначені параметри перш за все залежать від процесу. Наприклад, розтоплена сіль із температурою 780...820°C може бути використана для аустенізації, а із температурою 210...250°C для сходинкового охолодження, ізотермічного гартування, низькотемпературного відпускання.

Витрати робочого середовища визначаються за технічними характеристиками вибраного для обробки обладнання.

Швидкість нагрівання та охолодження на різних стадіях обробки Перш за все необхідно визначитись із тим, при виконанні яких операцій (переходів) швидкість нагрівання (охолодження) не впливає на структуру, якість, жолоблення, властивості, тому може бути довільною (технічно можливою), а для яких операцій (переходів) вона повинна мати певне значення (тобто бути технологічно обумовленою). Наприклад, при нагріванні перед гартуванням термічно тонких, мало схильних до деформації виробів із вуглецевих сталей

швидкість нагрівання не контролюється і не регулюється. В той же час дійсна швидкість охолодження повинна бути вище за критичну. Для термічно товстих виробів із середньо- та високолегованих сталей в технологічних інструкціях рекомендується уповільнене нагрівання, наприклад, зі швидкістю 50...100 град/год, що обумовлено низькою теплопровідністю цих сталей та можливістю виникнення завищених напружень, жолоблення, а інколи – тріщин.

Визначення схеми та маси садки. Зазначені характеристики відносяться до групи додаткових параметрів, тому що вони опосередковано впливають на основні параметри. До складу технологічних карт обов'язково входять дані про кількість виробів, піддонів, технологічних пристосувань, що одночасно завантажуються у піч або інше устаткування.

Вирішення зазначених питань розпочинається після вибору обладнання і отримання даних про розміри робочого простору. Для цього спочатку розробляється схема розташування виробів, яка б забезпечувала вирішення двох полярних задач: високої якості термічної обробки, а це можливе при значній відстані між виробами; високої продуктивності обладнання, яка досягається збільшенням коефіцієнта використання робочого об'єму печі.

Необхідно пам'ятати, що схема розташування виробів, кількість виробів у садці, маса садки, площа поверхні теплообміну безпосередньо впливають на тривалість нагрівання.

Завдання на проведення практичної роботи

1 Вивчити основні види термічної обробки, їх призначення і особливості, основні параметри операцій термічної обробки та їх кількісні характеристики.

2 Ознайомитись із основним та додатковим обладнанням для термічної обробки, його технічними характеристиками.

3 Засвоїти методики визначення основних параметрів термічної обробки конкретних виробів, знати причини, що впливають на якість термічної обробки виробів.

4 Для заданого робочим кресленням виробу, із урахуванням матеріалу, технічних вимог та річної програми випуску:

– запропонувати режими попередньої, основної і додаткової термічної обробки виробу;

– визначити і пояснити основні параметри термічної обробки, здійснити вибір обладнання;

– спрогнозувати мікроструктуру та властивості після термічної обробки.

5 Описати результати термічної обробки заданого виробу, співставити отримані властивості та структуру із технічними вимогами робочого креслення виробу. По виконаній роботі зробити висновки

Питання для самоконтролю

1 Які вихідні дані необхідні для розробки режиму та технології термічної обробки виробу ?

2 Яку додаткову інформацію необхідно отримати перед визначенням основних параметрів термічної обробки ?

3 Наведіть перелік основних параметрів термічної обробки виробів і зробіть їх короткий аналіз.

4 Які чинники впливають на вибір температур операцій термічної обробки? Як визначаються ці температури?

5 Які складові входять до загального часу перебування виробів у нагрівальних пристроях та іншому обладнанні? Охарактеризуйте кожну із них і методику визначення.

6 Що впливає на вибір складу робочих середовищ та їх основних параметрів? Наведіть склади робочих середовищ (речовин) для нагрівання, цементації, азотування, нітроцементації, високотемпературного відпускання, алітування, охолодження, промивання, очищення від окалини, тощо.

7 Від чого залежить та як визначається швидкість нагрівання, охолодження виробів при виконанні різних операцій термічної обробки?

8 Яким чином схема розташування виробів, маса садки впливають на основні параметри термічної обробки?

9 Охарактеризуйте в цілому методику вирішення задачі по визначенню основних параметрів термічної обробки виробу.

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. Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steels / José I. Verdeja González, Daniel Fernández González, Luis F. Verdeja González. – Cham : Springer, 2022. – 332 с.
4. Heat Treatment of Steels (reprint) / Andrea Di Schino, Claudio Testani (Eds.). – Basel : MDPI, 2021. – 236 с. – ISBN 978-3-0365-2388-0.
5. Heat Treatment Principles and Techniques (2nd ed.) / T. V. Rajan, R. Krishnan, R. K. Sharma. – Chennai : Alpha Science, 2020. – 420 с.
6. Лабораторний практикум із дисципліни «Хімічне матеріалознавство» / укладачі: О. П. Гапонова, А. І. Дегула. – Суми : Сумський державний університет, 2025. – 226 с.
7. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях) : навч. посіб. / Т. П. Говорун, О. П. Гапонова, С. В. Марченко. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 163 с.

Допоміжна

1. Баладжи Шрінівасан, К. Баладжи, Сатіш Гедупуді Heat Transfer Engineering: Fundamentals and Techniques. Elsevier. 2020. – 500 p.
2. Echániz T., Pérez-Sáez R.B., Risueño E., González-Fernández L., Faik A., Rodríguez-Aseguinolaza J., Blanco-Rodríguez P., Doppiu S., Tello M.J. Thermal emissivity spectra and structural phase transitions of the eutectic Mg-51% Zn alloy: A candidate for thermal energy storage, arXiv preprint arXiv:2401.13102, 2024. - 12 с.
3. Смирнов О.М., ін. Особливості легування та термічного оброблення високоміцних ливарних алюмінієво-мідних сплавів / О.М. Смирнов та ін. // Металофізика та новітні технології. - 2024. - № 46/6. - С. 559-573.
4. Бурова Д.В. Структура та механічні властивості ряду конструкційних сталей після термообробки з витримкою у міжкритичному інтервалі температур / Д. В. Бурова // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2024. - № 1. - С. 6-12.
5. Influence of heat treatment on the structure and mechanical properties of pseudo α -titanium alloy in a welded joint // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4 No. 12 (130), 2024, 15–25.
6. Mechanical Properties and Fracture Toughness Prediction of Ductile Cast Iron under Thermomechanical Treatment // Metals, 14(3):352, 19 березня 2024.
7. Abdellah M.Y., Alharthi H., et al. Mechanical Properties and Fracture Toughness Prediction of Ductile Cast Iron under Thermomechanical Treatment // Metals. - 2024. - 14(3): 352, 19 Mar 2024.

8. Прикладне матеріалознавство : підручник для вищих навчальних закладів III–IV ступенів акредитації / авт. колектив: О. В. Сушко, Е. К. Посвятенко, С. В. Кюрчев, С. І. Лодяков. – Мелітополь : Forward press, 2019. – 352 с.: іл.

Інформаційні ресурси

https://uk.wikipedia.org/wiki/Термічна_обробка
<https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/3029>
https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/shapovalova_materialoznavstvo/index.htm
<https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/832/3/Termoobl.pdf>
<https://www.youtube.com/watch?v=G7Ct0jrrHdU>
<https://www.youtube.com/watch?v=1JpIRAyYpXg>
<https://www.youtube.com/watch?v=VRBpqM6ESrg>
https://mdpi-res.com/bookfiles/book/4644/Heat_Treatment_of_Steels.pdf?v=1751072692
<https://metinvest-smc.com/ua/articles/termicna-obrobka-metaliv-i-splaviv/?srsltid=AfmBOornv0hDzRaRQ2mH6U7-O5pp-Z1zuDX2QKQM-PkuPxDalklqFB9U>
<https://www.youtube.com/watch?v=1JpIRAyYpXg>
<https://www.youtube.com/watch?v=G7Ct0jrrHdU>

Зміст

Вступ	4
Практична робота №1 Визначення температури нагріву під гартування	5
Практична робота №2 Контрольовані середовища для нагріву. Охолоджуючі середовища для гартування	8
Практична робота №3 Поверхнєве загартування (при нагріванні СВЧ та інших видах нагріву). Технологія ТО при індукційному нагріві	17
Практична робота №4 Технологія ТО деталей штампового та різального інструменту	22
Практична робота №5 Технологія ТО деталей із високолегованих сталей ..	27
Практична робота №6 Карти технологічного процесу, їх призначення та оформлення. Планування робочого місця терміста	31
Практична робота №7 Особливості мартенситного перетворення при гартуванні	38
Практична робота №8 Визначення і розрахунок тривалості нагрівання при гартуванні та відпуску	41
Практична робота №9 Вивчення результатів циклічного відпалу сталей	45
Практична робота №10 Вивчення впливу легуючих елементів на мікроструктуру і властивості сталей після хіміко-термічної обробки (ХТО)	49
Практична робота №11 Термічна обробка чавунів.....	54
Практична робота №12 Азотування та структурні перетворення при азотуванні	58
Практична робота №13 Термічна обробка цементованої сталі	62
Практична робота №14 Термічна обробка алюмінієвих сплавів	66
Практична робота №15 Визначення основних параметрів технології термічної обробки виробів	69
Література	

Т35 Термічна обробка: методичні вказівки до практичних занять 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, 2026. – 77 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Термічна обробка». Видання призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності G8 Матеріалознавство денної форми навчання, містить вказівки до виконання практичних робіт, теоретичні відомості, завдання, перелік літератури, питання для самоконтролю.

Комп'ютерний набір
Редактор

Зайчук Н.П.
Зайчук Н.П.

Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Таймс.
Ум. друк. арк. 5,3. Обл.-вид. арк. 5,3.
Тираж ___ прим. Зам. 1.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
ВП ЛНТУ