

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



## **КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

**методичні рекомендації**

**для виконання практичних і самостійних робіт**

**змістовного модуля №2 «Термічна обробка»**

**здобувачами першого (бакалаврського) рівня**

**вищої освіти ОПШ «Комп'ютерні науки»**

**спеціальності F3 (122) «Комп'ютерні науки**

**денної форми здобуття вищої освіти**

**Миколаїв – 2026**

УДК 669.017  
К64

Друкується за рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету, протокол №\_5\_ від 19.02.2026 р.

**Укладач:**

Полянський П. М. – канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін МНАУ.

**Рецензенти:**

Марченко Д. Д. – канд. техн. наук, доцент, заступник декана з навчальної роботи інженерно-енергетичного факультету, доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу МНАУ.

Лимарь О.О. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу МНАУ.

## Вступ

Один з найпоширеніших в техніці і найефективніших способів зміни структури і властивостей сталей і сплавів, обумовлених протіканням різних фазових перетворень це термічна обробка.

Термічна обробка може бути як проміжною операцією, призначеною для поліпшення технологічних властивостей (полегшення кування, штампування, пресування) так і кінцевою - для забезпечення в матеріалі або виробах необхідного комплексу властивостей.

Класифікація основних видів термічної обробки, використовуваних на практиці, була розроблена академіком А.А. Бочваром.

Початок вивчення процесів термічної обробки пов'язаний з відкриттям в 1868 р. Д. К. Черновим існування критичних температур фазових перетворень в сталях. Подальший значний внесок в розробку теорії термічної обробки сталей внесений радянськими ученими С. С. Штейнбергом, Р. В. Курдюмовим, В. Д. Садовським, а також зарубіжними дослідниками Бейном, Мелом і ін.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 0

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ

**Мета роботи:** 1. Вивчити сутність, призначення термічної обробки і розібратися в технології основних видів обробки вуглецевих сталей.

2. Оволодіти методикою виконання досліджень по вивченню впливу температури нагрівання на структуру і властивості вуглецевих сталей.

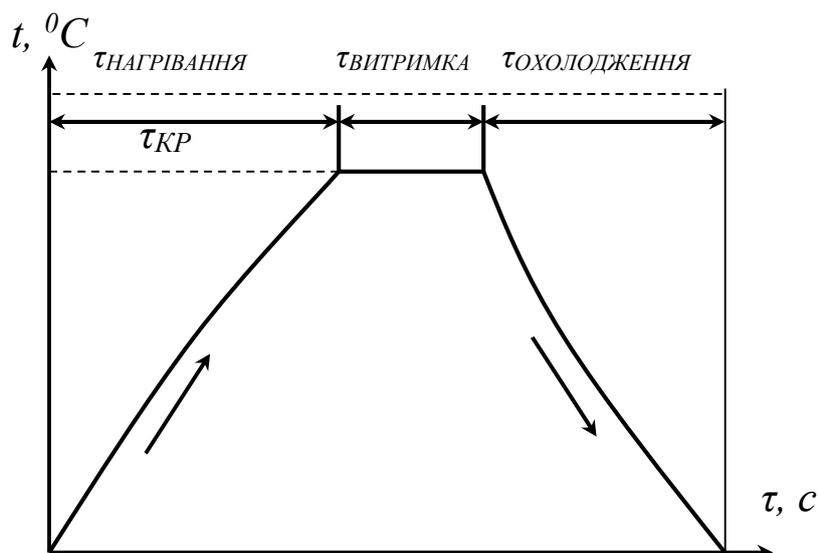
3. Вміти призначати режим термічної обробки сталі - для заданого складу.

4. Встановити зв'язок між твердістю, структурою, діаграмою стану і режимом термічної обробки сталей.

**Прилади та матеріали:** печі муфельні електричні типу МП-2У з регулятором температури, баки з гартувальним середовищем; прилади для вимірювань твердості - твердомір ТК-2; зразки вуглецевих сталей різного складу; шліфувальний папір дрібнозернистий; терпуг; кліщі кузнечні; металеві плити і годинник.

#### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Термічною обробкою сталі називають нагрівання її в твердому стані до визначених температур, витримка при даній температурі та наступне охолодження з різними швидкостями, з метою отримання необхідних фізико-хімічних властивостей і забезпечення бажаної структури. Будь-який режим термічної обробки може бути представлений графічно в координатах "температура-час" (мал. 1).



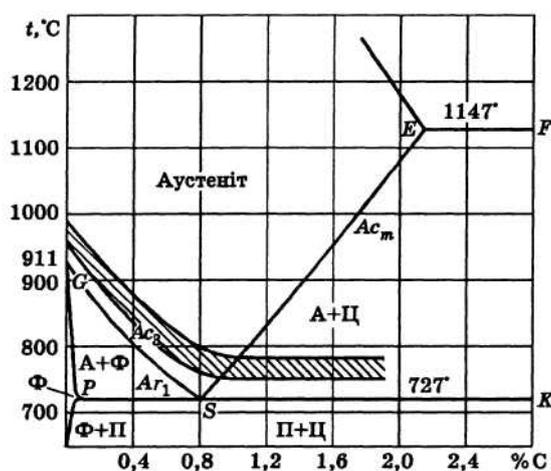
Мал. 1. Графік термічної обробки

Основою для вивчення процесів термічної обробки є діаграми стану металевих

сплавів. Діаграма стану дає в стислій і наочній формі картину зміни будови і властивостей сплаву при зміні концентрації і температури компонентів, дозволяє визначити температуру плавлення, затвердіння і поліморфних (алотропічних) перетворень в сплавах і зв'язати структуру сплавів з його механічними, технологічними та іншими властивостями.

Діаграма стану показує, яким видом термічної обробки може підлягати сплав і в яких температурних інтервалах їх слід виконувати з метою отримання тієї чи іншої структури і властивостей.

Розрізняють чотири основних види термічного оброблення сталі: гартування, відпускання, відпалювання і нормалізація.



Мал. 2. Температурний інтервал нагрівання вуглецевих сталей при їх термічному обробленні

Термічній обробці - загартуванню - звичайно підлягають сплави, які зазнають фазових і алотропічних перетворень. Ці сплави здатні до зміцнення. Сплави, які не зазнають алотропічних перетворень, проходять термічну обробку тільки лише з метою отримання більш стабільної (рівноважної) структури.

При термічному обробленні сталей вводять поняття «критичні точки»:  $Ac_1$ ,  $Ac_2$ ,  $Ac_3$ ,  $Ac_4$ ,  $Ac_m$  - при нагріванні і  $Ar_1$ ,  $Ar_2$ ,  $Ar_3$ ,  $Ar_4$ ,  $Ar_m$  - при охолодженні. Критичними точками називаються температурні точки на діаграмі стану, в яких виникають або закінчуються перетворення в сплаві. Температури, які відповідають вказаним точкам, називаються критичними температурами. Ці точки відкрив Д.К. Чернов (1868 р.). Як відомо, за температур, що відповідають цим точкам, у процесі нагрівання і охолодження відбуваються фазові перетворення, а отже, зміцнення або

зміцнення сталей. Взагалі термічне оброблення сплавів проводять з метою зміцнення (гартування) або знеміцнення (відпалювання, нормалізація, відпускання).

Температура нагрівання для гартування вуглецевих сталей визначається положенням критичних точок  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ .

При нагріванні сталі вище критичної точки  $A_{c1}$  перліт перетворюється в аустеніт. Для перетворення перліту в аустеніт необхідна присутність різниці вільних енергій  $F$ . Вільна енергія аустеніту повинна бути меншою вільної енергії перліту, це можливо тільки при деякому нагріванні сталі вище критичної точки  $A_{c1}$ .

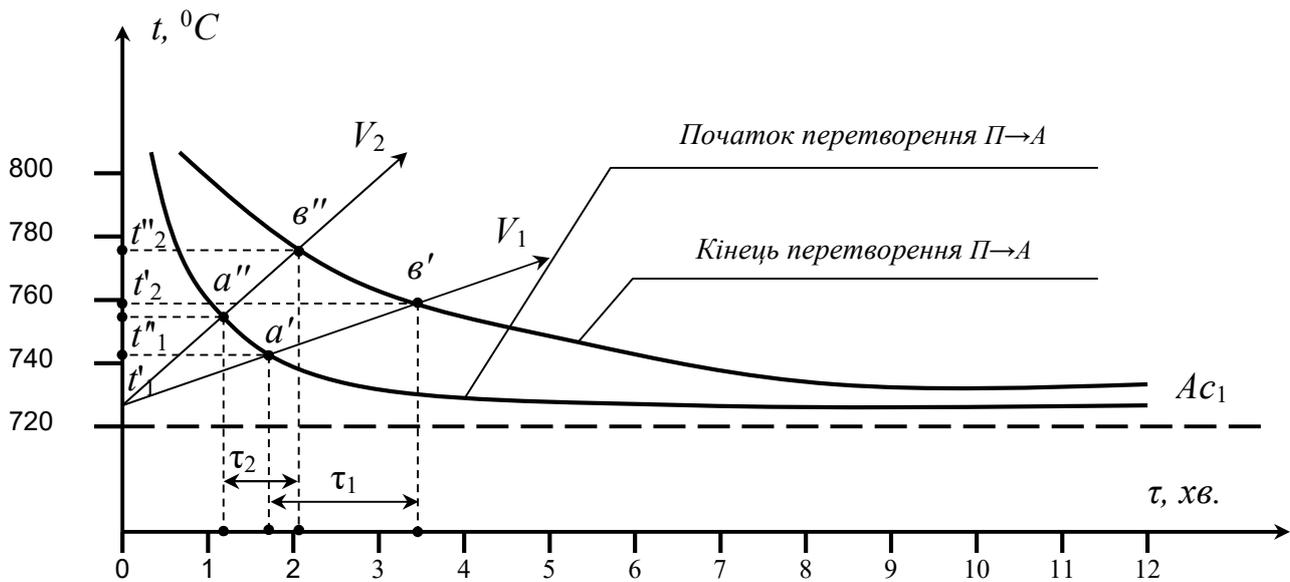
При цьому, чим більше буде ступінь перегрівання, тим інтенсивніше буде відбуватися перетворення перліту в аустеніт.

При перетворенні перліту в аустеніт із двох фаз фериту - який містить вуглецю 0,025%, і цементиту, який містить вуглецю 6,67%, утворюється одна фаза - аустеніт із змістом вуглецю 0,8%.

Зародок аустеніту виникає на кордоні розділу кристалів фериту і цементиту, де найбільша ймовірність утворення ділянок, які містять 0,8% вуглецю. Ріст аустенітних зерен, що утворились, проходить за рахунок алотропічного перетворення  $\alpha$ -заліза в  $\beta$ -залізо, тобто перебудова кристалічної ґратки ОЦК в ГЦК. При подальшому безперервному нагріванні сталі від температури  $A_{c1}$  до  $A_{c3}$  і  $A_{c1}$  до  $A_{cm}$  відбувається розчинення фериту доевтектоїдної сталі і цементиту заевтектоїдної сталі в аустеніті. Процес розчинення цементиту протікає повільніше, чим перетворення фериту. Це призводить до того, що в деякий період часу після повного перетворення фериту будуть існувати дві фази: аустеніт і цементит. При збільшенні часу витримки цементит повністю розчиняється в аустеніті. Однак, утворений аустеніт буде неоднорідний за концентрацією вуглецю.

Ділянки аустеніту, які прилягали раніше до цементитних пластинок, в порівнянні з ділянками, які прилягали до фериту, будуть збагачені вуглецем. Для отримання однорідного за складом аустеніту по всьому об'єму потрібно не тільки перейти через точку закінчення перетворення аустеніту, але і дати додатковий час витримки. Перетворення перліту в аустеніт при дуже повільному нагріванні відбувається при сталій температурі  $A_{c1}$  і час перетворення досягає 1000-1200 с. При підвищенні швидкості нагрівання перетворення перліту в аустеніт здійснюється в

деякому інтервалі температур, що добре видно із діаграми ізотермічного перетворення перліту в аустеніт, яка зображена на мал. 3.



Мал. 3. Діаграма ізотермічного перетворення перліту в аустеніт

Діаграма показує, що чим швидше йде процес нагрівання, тим швидше відбувається перетворення перліту в аустеніт та при високій температурі яка дорівнює 850 °С. Тривалість перетворення дорівнює декільком секундам, а при нагріванні вище цієї температури, швидкість перетворення перліту в аустеніт така велика, що експериментально не може бути визначена.

Основним елементом технологічного процесу термічного оброблення сталі є час нагрівання. Загальний час нагрівання складається: з часу нагрівання заготовки (деталі) до заданої температури аустенітизації для отримання аустенітної структури; часу витримки при температурі аустенітизації; часу охолодження з потрібною швидкістю залежно від виду термічного оброблення.  $\tau_{заг} = \tau_n + \tau_{\epsilon} + \tau_o$

$\tau_n$  - залежить від нагрівальної здатності середовища, маси, розмірів і форми деталі та від закладання їх у піч (табл. 1).;  $\tau_n = B \cdot (1-2)$  хв.;

B - товщина зразка в мм.

$\tau_{\epsilon}$  - залежить від швидкості фазових перетворень, які визначаються ступенем перегрівання вище критичної точки та дисперсності структури.  $\tau_{\epsilon} = 0,1 \cdot \tau_n$ , хв.

$\tau_o$  - залежить від виду термічної обробки.

Питома тривалість нагрівання визначається в хв на 1 мм товщини або діаметру

тіла. Нагрівання деталей проводять в лабораторних умовах звичайно в пічці безперервної дії з повітряною атмосферою та продуктами горіння. Печі автоматизовані, що дозволяє підтримувати необхідну температуру нагрівання.

Таблиця 1. Приблизні норми часу нагрівання і витримування заготовок із вуглецевих сталей при гартуванні

Умови і методи нагрівання	Тривалість нагрівання, с/мм, поперечного перерізу заготовки		
	круглого	квадратного	прямокутного
Муфельна піч (600...650 °С)	55...60	80...90	100...110
Муфельна піч (800...900 °С)	45...50	65...70	85...95
Полуменева піч (800...900 °С)	40...45	55...80	80...90
Соляна ванна (800...950 °С)	12...15	15...18	18...22
Соляна ванна (1300 °С)	6...8	8...10	10...12
Електроіндукційне нагрівання	0,5...0,8	0,6...0,9	0,6...1,0

Для нагрівання виробів до 900 °С використовують електричні камери або муфельні печі (мал. 4) з дротяними нагрівальними елементами електроопору, які найбільше застосовують у лабораторіях навчальних закладів. Щоб нагріти вироби, їх завантажують на черен 4 муфеля 2, який ізольований від корпусу печі 1. Тепло в муфелі утворюється завдяки нагріванню елементів електроопору 3. Муфель закривається дверцятами 8. Температуру в муфелі регулюють реостатом 6, пересовуючи ручки реостата 7. Для контролю температури в отвір 12 вставляють термометр.

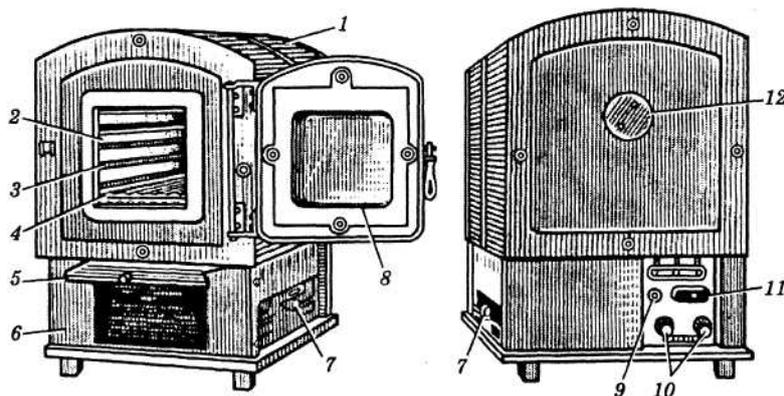
Для нагрівання вище ніж 900 °С використовують електропечі з карборундовими або вугільними нагрівальними елементами.

При нагріванні сталей та інших металів велику увагу необхідно приділяти захисту їх від окислення та зневуглицювання, які тим небезпечніші, чим вище температура нагрівання.

До складу атмосфери печі входять O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O та ін. В будь-якій захисній атмосфері, щоб вона не окислювала, не зневуглицювала, потрібне певне співвідношення компонент.

Зневуглицювання дуже різко знижує границю, що особливо шкідливо для пружин, ресор, зубчастих коліс. Окислення (тобто утворення окалини) викликає викривлення геометричної форми виробу та погіршує якість поверхні. Шар окалини також є тепловою ізоляцією та знижує швидкість нагрівання сталевих виробів.

Щоб уникнути утворення окалини на поверхні заготовки, використовують соляні електрованни, в яких досягають температур до 1350 °С (табл. 2).



Мал. 4. Муфельна піч: 1 - корпус; 2 - муфель; 3 - нагрівальний елемент; 4 - черен печі; 5 - висувний стіл; 6 - реостат; 7 - ручки реостата; 8 - дверцята; 9, 10, 11 - клеми для електрошнура; 12 - отвір для термопари

Таблиця 2. Склад соляних нагрівальних ванн для гартування і відпускання сталевих виробів

Складові ванн	Хімічна формула	Масова частка, %	Температура плавлення, °С	Температура нагрівання, °С
Селітра калієва + селітра натрієва	$KNO_3 + NaNO_2$	50+50	220	245...500
Селітра натрієва	$NaNO_2$	100	317	325...600
Сіль + кальцинована сода	$NaCl + Na_2CO_3$	50 + 50	560	590...900
Кухонна сіль	$NaCl$	100	801	830...1100
Хлорид барію	$BaCl_2$	100	962	1100...1350

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

### ГАРТУВАННЯ СТАЛІ

**Мета роботи:** 1. Вивчити сутність і призначення термічної обробки і розібратися в технології основних видів обробки вуглецевих сталей.

2. Оволодіти методикою виконання досліджень по вивченню впливу температури нагрівання на структуру і властивості вуглецевих сталей.

3. Вміти призначати режим термічної обробки сталі - для заданого складу.

4. Встановити зв'язок між твердістю, структурою, діаграмою стану і режимом термічної обробки сталей.

**Прилади та матеріали:** печі муфельні електричні типу МП-2У з регулятором температури, баки з гартувальним середовищем; прилади для вимірювань твердості - твердомір ТК-2; зразки вуглецевих сталей різного складу; шліфувальний папір дрібнозернистий; терпуг; кліщі кузнечні; металеві плити і годинник.

### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Гартуванням називається термообробка, яка складається з нагрівання доевтектоїдних сталей вище критичної точки  $A_{c3}$ , евтектоїдних і заевтектоїдних сталей вище  $A_{c1}$ , на 30-50°C, витримки при даній температурі та подальшого охолодження з швидкістю більше критичної (мінімальна швидкість охолодження, яка забезпечує перетворення переохолодженого аустеніту в мартенсит) для досягнення найбільшої твердості (табл. 1). При швидкості охолодження більше критичної вуглець не встигає виділитися з кристалічної ґратки (у відповідності з її перебудовою з  $\gamma$ -заліза в  $\alpha$ -залізо); в результаті чого утворюється однофазний пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі, який отримав назву мартенсит. При цьому спостерігається значне викривлення просторової ґатки, утворюється висока щільність порогів дислокацій, порушується рівність міжатомних сил і в сталі накопичується значна внутрішня потенціальна енергія. Сталь набуває високої твердості, але її пластичність при цьому падає. В залежності від температури нагрівання сталі розрізняють наступні види гартувань.

Повне гартування - нагрівання сталі вище критичної точки  $A_{c3}$  на 30...50 °C з подальшим охолодженням з швидкістю більше критичної. Структура сталі при цьому складається із дрібногольчатого мартенситу, а при зміні вуглецю більше

0,6%, крім мартенситу, є невелика кількість залишкового аустеніту. Повне гартування застосовується тільки для доєвтектоїдних сталей.

Таблиця 1. Орієнтовні режими термічного оброблення і твердість конструкційних вуглецевих сталей

Марка сталі	Температура нагрівання під гартування, °С	Охолоджувальне середовище	Температура відпускання, °С	Твердість після гартування і відпускання, HRC
35	840...880	Вода	300...400	50...40
			400...500	40...30
			500...600	30...23
40	820...860	Вода	200...300	52...48
			300...400	48...41
			400...500	40...33
			500...600	33...22
45	810...840	Вода	200...300	54...50
			300...400	50...41
			400...500	41...33
			500...600	33...24
			600...700	24...15
50	800...840	Вода	180...200	55...50
			380...400	48...40
			500...550	33...24
			560...620	24...20
60	785...820	Вода — олива	400 550...620	40...35 24...18
70	770...815	Вода — олива	400 610...670	46...39 27...22
У7	750...760	Вода — олива	160...200	63...60
			200...300	60...54
			300...400	54...43
			400...500	43...35
У8	750...760	Вода — олива	160...200	64...60
			200...300	65...60
			300...400	55...45
			500...600	35...27
У9	750...760	Вода — олива	160...200	64...62
			200...300	62...56
			300...400	56...46
			400...500	46...37
			500...600	37...28
У10	760...780	Вода — олива	160...200	64...62
У12	760...780	Олива	160...200	65...62
			200...300	62...57

При нагріванні доєвтектоїдних сталей між лініями  $A_{c1}$  та  $A_{c1}$  утворюється

структура, яка складається з аустеніту та фериту, і тому після гартування в цій області температур структура складається із мартенситу та фериту. Таке гартування називається неповним. Наявність фериту призводить до зниження твердості загартованої сталі і не викликає помітного збільшення ударної в'язкості. Подібний технологічний процес термічної обробки - *брак виробництва*.

Перегрівання сталі, тобто нагрівання її до температур, які перевищують температури критичної точки  $A_{c3}$  на 150...200 °С, спричинює ріст зерен аустеніту, що збільшує схильність сталі до появи деформації і утворення тріщин при гартуванні. Структура такої сталі складається із крупногольчатого мартенситу і має знижену ударну в'язкість.

Неповне гартування застосовується для заевтектоїдних сталей; нагрівання сталі вище критичної точки  $A_{c1}$  на 30...50 °С з подальшим охолодженням з швидкістю більше критичної. Структура доевтектоїдної сталі після неповного гартування складається із мартенситу, вторинного цементиту і залишкового аустеніту. Цементит має високу твердість і не знижує твердість загартованої сталі; аустеніт, навпаки, м'якіший за мартенсит і знижує загальну твердість. Гартування заевтектоїдних сталей з температур, які перевищують лінію  $A_{cm}$ , веде до отримання крупногольчатого мартенситу з великою кількістю залишкового аустеніту. Така структура створює в сталі підвищені внутрішні напруження, тріщини і знижену ударну в'язкість. Підвищення змісту вуглецю в доевтектоїдних сталях значно знижує лінії початку і кінця мартенситних перетворень (мал. 2). Кінець мартенситного перетворення потрапляє в область від'ємних температур, що призводить до збільшення кількості залишкового аустеніту при гартуванні

Залежно від призначення деталей охолодження при гартуванні із аустенітного стану проводять з різними швидкостями. Для цього використовують різні середовища, що мають неоднакову охолоджувальну здатність вода, водні розчини солей, лугів, кислот, мастило (табл. 2).

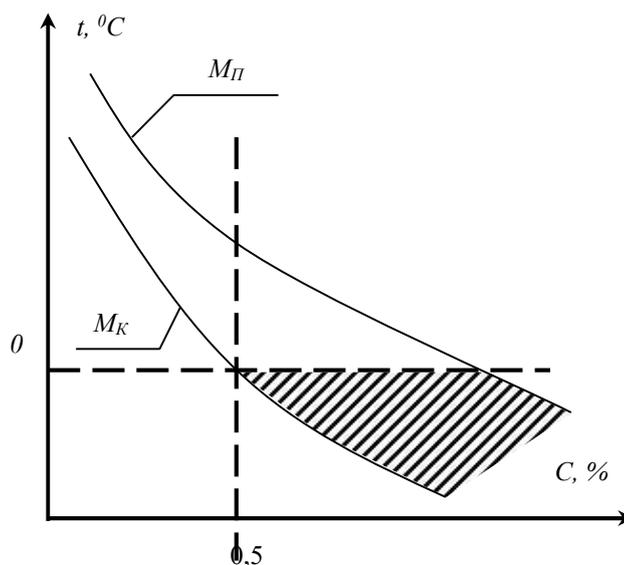
Для гартування деталей машин й інструменту, виготовлених із вуглецевих сталей, як охолоджувальне середовище використовують воду, а для дрібних виробів завтовшки або діаметром 3...5 мм — машинну оливу. У воді загартовують вуглецеві сталі, які містять більше 0,3 %С. При меншому змісті вуглецю ці сталі практично не

загартовують, так як швидкість охолодження сталі навіть у воді менше необхідної критичної швидкості гартування.

Таблиця 2. Швидкість охолодження сталі в різних середовищах

Гартувальне середовище	Швидкість охолодження $v$ , °C/с, в інтервалі температур $t$ , °C		Гартувальне середовище	Швидкість охолодження $v$ , °C/с, в інтервалі температур $t$ , °C	
	650...550	300...200		650...550	300...200
Вода при 18 °C	600	270	10%-й розчин $\text{Na}_2\text{CO}_3$ при 18 °C	800	270
Вода при 28 °C	500	270			
Вода при 50 °C	100	270	Вода дистильована	250	200
Вода при 75 °C	3030	200			
10%-й розчин $\text{NaCl}$ у воді при 18 °C	1200	300	Емульсія оливи у воді	70	200
			Мильна вода	30	200
10%-й розчин $\text{NaOH}$ при 18 °C	1100	300	Мінеральна олива	150	30

Аустеніт тільки частково перетворюється в мартенсит або ферито-цементитну суміш. Масто охолоджує метал повільніше, ніж вода, і в ньому звичайно загартовують високовуглецеві та леговані сталі, які мають невелику критичну швидкість гартування.



Мал. 2. Залежність положення ліній мартенситних перетворень від концентрації вуглецю

Для доевтектоїдної сталі застосовують повне гартування, при якому

нагрівання здійснюється на 30-50 °С вище  $A_{c3}$ . витримка при цій температурі і наступне охолодження зі швидкістю більше критичної. Структура після гартування буде складатися із дрібногольчатого мартенситу. При нагріванні доєвтектоїдних сталей між критичними температурами  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  відбувається часткова перекристалізація сталі. Перліт повністю переходить в аустеніт і частково зберігається ферит після гартування сталі з температур, які лежать між точками  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ , структура сталі буде складатися із мартенситу і фериту, який знижує твердість і погіршує інші механічні властивості в загартованому стані.

Перегрівання сталі до температур, які значно перевищують критичну точку  $A_{c3}$ , сприяє росту аустенітного зерна, що збільшує схильність сталі до деформації і утворення тріщин в процесі гартування. Структура такої сталі буде складатися з крупногольчатого мартенситу, який має знижену ударну в'язкість.

Для заєвтектоїдних сталей оптимальна температура гартування знаходиться в інтервалі між  $A_{c1}$  і  $A_{cm}$ . Нагрівання сталі вище критичної  $A_{c1}$ , на 30-50 °С, витримка при даній температурі і наступне охолодження зі швидкістю вище критичної називається неповним гартуванням. Неповне гартування застосовується тільки для заєвтектоїдних сталей. Для заєвтектоїдних сталей гартування з температурою вище  $A_{c1}$  є неповним гартуваннями. Структура доєвтектоїдної сталі після гартування буде складатися із мартенситу і залишкового аустеніту, заєвтектоїдної - із мартенситу, вторинного цементиту та залишкового аустеніту. Цементит вторинний має високу твердість, а відповідно, не буде знижувати твердість загартованої сталі.

Нагрівання заєвтектоїдних сталей вище  $A_{c3}$  небезпечне і непотрібне, так як воно не підвищує твердість і, навпаки, твердість навіть декілька знижується внаслідок збільшення структури залишкового аустеніту. При такому нагріванні росте зерно аустеніту, збільшується можливість виникнення великих гартувальних напружень, інтенсивніше знеуглецьовується сталь на поверхні.

## **ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ**

1. Підготувати обладнання, прилади та зразки.
2. Виміряти твердість сталених зразків до термічної обробки ( в вихідному стані).
3. Провести нагрівання і охолодження зразків по заданих режимах та

визначити їх твердість після термообробки.

4. Підготувати мікрошліфи і дослідити мікроструктуру вуглецевих сталей після термічної обробки.

5. Дати характеристику сталі у вихідному стані, замалювати діаграму "твердість-температура гартування" і дати опис перетворень, які викликали зміну твердості, із замалюванням макроструктур після термообробки.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яка марка сталі Ст3; Сталь У13; Сталь 45 не підлягає гартуванню?
2. До якої температури нагрівають доевтектоїдні сталі при гартуванні?
3. Яка мета гартування?
4. Яка структура Сталі У7 після гартування?
5. Від чого залежать температурні інтервали мартенситного перетворення?
6. З якої структурної складової утворюється сорбіт?
7. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі 70?
8. Яку назву має пересичений твердий розчин вуглецю у  $Fe_\alpha$ ?
9. Який фактор найбільш впливає на утворення крупногільчатого мартенситу?
10. Як впливає надлишковий цементит на загальну твердість загартованої сталі?
11. Яка марка сталі Сталь 20; Сталь У10; Сталь 85 не підлягає гартуванню?
12. До якої температури нагрівають перлітну сталі при гартуванні?
13. Яка структура Сталі У8 після гартування?
14. У яких з сталей Сталь 35; Сталь 50; Сталь У7; Сталь У8 після гартування більша кількість аустеніту залишкового?
15. Від чого залежить кількість вуглецю в мартенситі?
16. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі У 10?
17. Яка структура Сталі 40 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
18. Яким методом визначається твердість загартованої сталі?
19. У яких сталях кінець мартенситного перетворення потрапляє в область від'ємних температур?
20. З яким вмістом вуглецю сталі підлягають гартуванню?
21. Яка марка сталі Сталь Ст5; Сталь 60 не підлягає гартуванню ?
22. Скільки сталі (етапів) має процес гартування?
23. Яка структура Сталі У12 після гартування?
24. Яка з структур сорбіт; тростит; бейніт; мартенсит найбільш пластична?
25. Яка структура утворюється внаслідок перетворення аустеніту при сталій температурі  $700^\circ C$ ?
26. Чим пояснюється висока твердість мартенситу?
27. Яка структура Сталі 60 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
28. На якій лінії лежать критичні точки  $A_{c1}$  діаграми стану?
29. Який недолік загартованих сталей?
30. У яких з сталей Сталь 35; Сталь 55; Сталь 65; Сталь 45 температура гартування вища?
31. Яка марка сталі Сталь 08; Сталь У11А; Сталь У 13А не підлягає гартуванню?
32. З якою швидкістю відбувається охолодження при гартуванні?

33. Яка структура Сталі 20 після гартування?
34. З яких фаз складається сорбіт?
35. Нижче якої температури відбувається переохолодження аустеніту при гартуванні?
36. Яка з двох сталей У7 і У8 більш тверда після гартування?
37. Яка структура Сталі 70 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
38. На якій лінії лежать критичні точки  $A_{c3}$  діаграми стану?
39. У якої з сталей Сталь 45; Сталь У8; Сталь У12 температура Мп вища?
40. У яких з сталей Сталь 60; Сталь 80; Сталь 50; Сталь 70 температура гартування вища?
41. Яка марка сталі Сталь Ст6; Сталь У10А; Сталь 50 не підлягає гартуванню?
42. Яка структура Сталі 45 після гартування?
43. Від чого залежать розміри мартенситних кристалів?
44. Як змінюються пластичні властивості сталей після гартування?
45. Що спільного у троститі і сорбіту?
46. До якої температури треба нагрівати Сталь 35, щоб після гартування отримати тільки мартенсит?
47. Яку алотропічну форму має мартенсит?
48. Яка швидкість охолодження сталі при гартуванні у воді?
49. У яких з сталей Сталь 30; Сталь 40 температура гартування вища?
50. З яким вмістом вуглецю у сталей після гартування структура складається з мартенситом?
51. Яка марка сталі Сталь 80; Сталь 15; Сталь 60 не підлягає гартуванню ?
52. Що відбувається в аустеніті в процесі витримки його при 700 °С до початку його розкладання?
53. З якої структурної складової утворюється бейніт?
54. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі 40?
55. Як визначається температура гартування заевтектоїдної сталі?
56. Скільки атомів заліза в елементарній просторовій ґратці мартенситу?
57. Як впливає аустеніт залишковий на загальну твердість загартованої сталі?
58. Яка з структур загартованої сталі має найвищу твердість?
59. Як впливають легуючі елементи на положення С-подібних кривих?
60. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі 60?
61. Яка марка сталі Сталь У12А; Сталь У7; Сталь 10 не підлягає гартуванню ?
62. До якої температури нагрівають заевтектоїдні сталі при гартуванні?
63. Яка структура Сталі У10 після гартування?
64. Яка структура має найвищу твердість?
65. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
66. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі У12?
67. Яка структура Сталі 50 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
68. Як з структур найбільш тверда?
69. У яких сталях Сталь 25; Сталь 45; Сталь У7; Сталь У8 після гартування кількість аустеніту залишкового найбільша?
70. У яких з сталей Сталь У7; Сталь У8; Сталь У10; Сталь У12 температура гартування вища?
71. Яка марка сталі Сталь 70; Сталь 30; Сталь 40 не підлягає гартуванню ?

72. З яким вмістом вуглецю у сталей після гартування структура складається з мартенситу і аустеніту залишкового?
73. Яку структуру буде мати Сталь 40 після неповного гартування?
74. Які сталі не підлягають гартуванню?
75. Чим відрізняється сорбіт від троститу?
76. До якої температури треба нагрівати Сталь 45, щоб після гартування отримати тільки мартенсит?
77. Для яких сталей можливо неповне гартування?
78. Яка швидкість охолодження сталей при гартуванні у мастилі?
79. У якої з сталей Сталь У9; Сталь У13; Сталь У11; Сталь У7 температура гартування вища?
80. З якої кількості фаз складається мартенсит?
81. Яка марка сталі Сталь 65Г; Сталь Ст2; Сталь У8 не підлягає гартуванню ?
82. Чому дорівнює термін витримки при гартуванні?
83. Яка кристалічна ґратка у мартенситу?
84. З яких фаз складається тростит?
85. Яка структура буде у сталі У12 після гартування з температурою вище  $A_{c_m}$ ?
86. До якої температури треба нагрівати Сталь У8, щоб після гартування отримати крупноігольчастий мартенсит?
87. На якій лінії лежать критичні точки  $A_{c_m}$  діаграми стану?
88. У якої з сталей Сталь 20; Сталь 40; Сталь 60; Сталь 80 температура Мп вища?
89. У яких з сталей температура гартування вища?
90. Яка структура Сталі 30 після гартування?
91. Яка марка сталі Сталь Ст1; Сталь 55; Сталь 65 не підлягає гартуванню ?
92. З яким вмістом вуглецю у сталей після гартування структура складається з мартенситу і аустеніту залишкового і цементиту надлишкового?
93. З якої структурної складової утворюється мартенсит?
94. Яка термічна операція потрібна після гартування сталі?
95. Які механічні властивості має мартенсит?
96. При якому складі вуглецю у сталі можна отримати після гартування мартенсит і цементит?
97. Що змінюється при гартуванні сталі?
98. При якій швидкості охолодження після гартування утворюється мартенсит?
99. У яких з сталей Сталь У8А; Сталь У10А; Сталь 55; Сталь 35 температура гартування вища?
100. У якому середовищі швидкість охолодження найменша?
101. Яка марка сталі Сталь 25; Сталь 35; Сталь 45 не підлягає гартуванню?
102. З якої структурної складової утворюється тростит?
103. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі 50?
104. Як визначається температура гартування заевтектоїдної сталі?
105. Який фактор найбільш впливає на критичну швидкість гартування сталі?
106. Як впливає ферит на загальну твердість загартованої сталі?
107. Як залежить твердість загартованої сталі від збільшення вмісту вуглецю?
108. У якої з структур твердість вища?
109. Як впливає вміст вуглецю на положення С-подібних кривих?
110. Від чого залежить твердість загартованої сталі?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №2

### ВІДПУСКАННЯ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ СТАЛІ

**Мета роботи:** ознайомитися з обладнанням для проведення відпускання і визначення ударної в'язкості; з'ясувати вплив різних режимів відпускання на властивості загартованої сталі.

#### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для загартованої на мартенсит сталі при високій твердості характерні низькі ударна в'язкість, пластичність і границя пружності, високі внутрішні напруження. Тому така сталь малоприсадатна для використання.

Відпускання полягає в нагріві загартованої сталі, структура якої складається з тетрагонального мартенситу і залишкового аустеніту, до температур нижчій  $A_{c1}$ , витримці при цій температурі і подальшому охолодженні. Так як мартенсит є перенасиченим твердим розчином вуглецю в  $Fe_{\alpha}$ , то структура загартованої сталі є нестабільною і при відпусканні протікають процеси, що приводять до рівноважного стану сталі, що, очевидно, досягатиметься виділенням вуглецю з мартенситу і залишкового аустеніту.

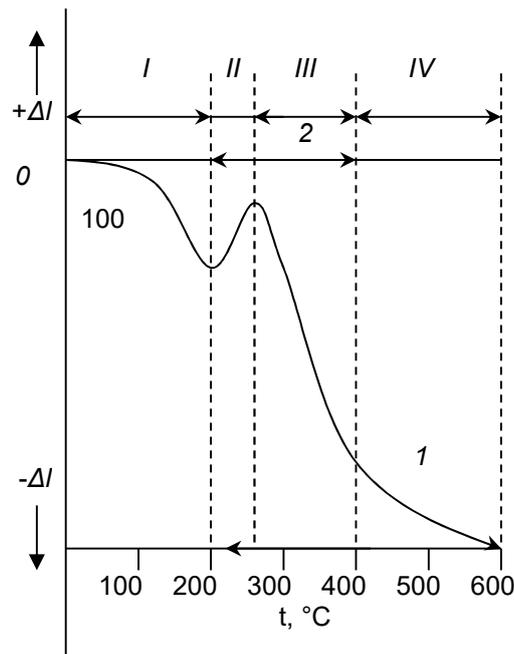
Дилатометричні дослідження процесів, що протікають при відпусканні загартованої вуглецевої сталі виявляють три температурні інтервали зміни довжини зразків: зменшення при 70-150 °С, збільшення при 150-300 °С і знову зменшення довжини при 300-400 °С (мал. 1).

Дилатометричні дослідження – це дослідження зміни довжини зразка при нагріві та охолодженні. Використання диференціальної схеми приладу — ділатометра дозволяє усунути розширення зразка, пов'язане із зміною температури, і фіксувати тільки зміни, пов'язані з перетвореннями.

З дилатометричними даними корелюють результати вимірювання електроопору, магнітної індукції і інших властивостей. Відповідні перетворення при відпустці називаються першим, другим і третім.

Так як початкова структура складається з мартенситу і аустеніту, а питомий об'єм мартенситу вищий, ніж у аустеніту, то при перетворенні мартенситу об'єм зменшуватиметься (стиснення зразка), а при перетворенні аустеніту —

збільшуватися (розширення зразка). Таким чином перше і третє перетворення пов'язані із змінами стану мартенситу, а друге — із зміною стану аустеніту.



Мал. 1. Дилатометрична крива відпускання вуглецевої сталі (1,2 % С):

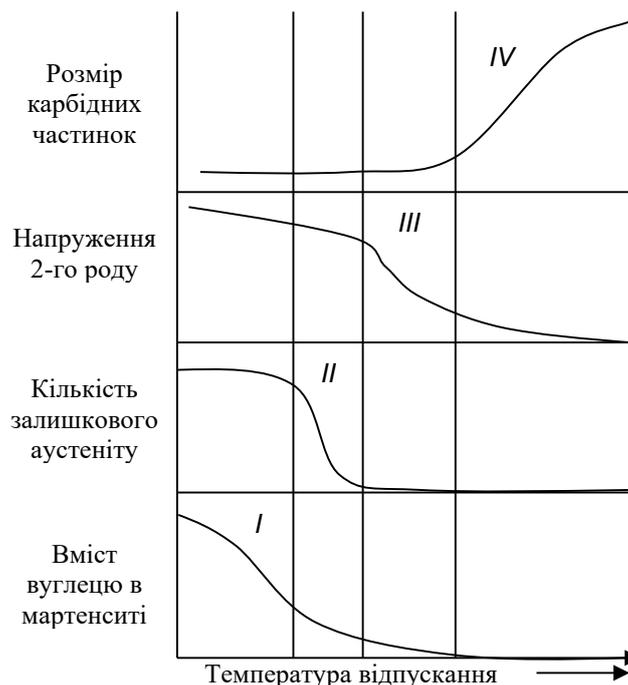
1- загартованої; 2 – відпаленої

Велику роль в з'ясуванні суті процесів, що протікають при відпустці, виконують рентгеноструктурні дослідження. Було встановлено, що перше перетворення пов'язане з розпадом мартенситу, друге з розпадом залишкового аустеніту і третє з дораспадом мартенситу і карбідоутворенням (мал. 2). Подальші дослідження, проведені із залученням найрізноманітніших методів дослідження показали, що розподіл процесів, що протікають при відпустці на три стадії досить умовно; крім того, в температурні інтервали значні поправки можуть вносити легуючі елементи.

До теперішнього часу встановлено, що в мартенситі ще до початку першого перетворення відбуваються внутрішньофазові зміни, пов'язані з перерозподілом атомів вуглецю, які можуть переходити з одних міжвузлів в інші, переміщатися до дефектів ґрат, утворювати мікроскопичення — кластери. Ці процеси протікають досить швидко при кімнатній температурі і навіть декілька нижчі за неї (-40 °С). Кластери з атомів вуглецю розміром 4-6 нм мають у своєму розпорядженні в кристалах мартенситу визначений, закономірним чином, утворюючи так звану модульовану або регулярну структуру, і є зародками, тобто підготовленими місцями

для карбідів.

Перша стадія розпаду при відпустці полягає у виділенні вуглецю з мартенситу, при цьому разом з твердим розчином початкової концентрації по вуглецю, в якому не відбулося виділення карбідів, з'являється мартенсит, що містить значно менше вуглецю (0,25-0,35 %); тому ця стадія розпаду називається двофазною. Швидкість першої, двофазної стадії розпаду збільшується при зменшенні вмісту в сталі вуглецю. В процесі першого перетворення при відпусканні загартованої сталі утворюється  $\epsilon$ -карбід з гексагональними щільноупакованими ґратами з параметрами  $a=0,273$  нм,  $b=0,433$  нм. Хімічний склад (формула)  $\epsilon$ -карбіду  $Fe_{2,3}C$ . Низькотемпературний  $\epsilon$ -карбід виділяється у вигляді тонких пластин або стержнів. Процес розпаду протікає не за рахунок укрупнення частинок  $\epsilon$ -карбіду, а за рахунок збільшення їх числа. Ґрати  $\epsilon$ -карбіду закономірно орієнтовані по відношенню до ґрат початкового мартенситу. Виділення  $\epsilon$ -карбіду відбувається переважно в бездвойникових ділянках мартенситних кристалів.



Мал. 2. Криві процесів, які відбуваються при відпусканні

На другій стадії відпустки (200-300 °С) основним процесом є розпад залишкового аустеніту. У основних рисах процес аналогічний бейнітному перетворенню. Продуктом розпаду залишкового аустеніту є гетерогенна суміш, що складається з пересиченого  $\alpha$ - твердого розчину і фази карбіду. Разом з розпадом залишкового аустеніта, при 200-300 °С тетрагональність ґрат мартенситу продовжує

зменшуватися, що свідчить про подальше виділення вуглецю з мартенситу. Мартенсит має тетрагональну ґратку ( $c/a > 1$ ) до 270-300 °С. При 200-300 °С продуктом карбідоутворення є не  $\epsilon$  - карбід, а цементит з ромбічними ґратами ( $a=0,4517$  нм,  $b=0,5079$  нм,  $c=0,673$  нм). Утворення цементита може протікати як шляхом перебудови ґрат  $\epsilon$  - карбіду в ґрати цементита, так і безпосереднім виділенням цементита з мартенситу. У останньому випадку цементит виділяється на двійниках в мартенситном кристалі. Цементит має формулу  $Fe_3C$  і виділяється у вигляді пластин, закономірно орієнтованих по відношенню до мартенситу. Із збільшенням температури відпустки збільшується розмір цементитних пластин і їх частка. Для сталей з Mn, значно вище кімнатної, частковий розпад мартенситу з виділенням карбідів може протікати безпосередньо при гартуванні— цей процес називається самовідпуском.

До початку третього перетворення (300 °С) фазовий склад сталі складається з відпущеного маловуглецевого ( $\% C \approx 0,1$ ) мартенситу з кубічними ґратами і пластинок цементита. При третьому перетворенні відбувається повний дораспад мартенситу (вміст вуглецю в ньому стає рівним 0,01 %, тобто рівним вмісту вуглецю в рівноважному фериті) і підростання (коагуляція) цементитних пластин. У міру підростання цементитних пластин відбувається зрив когерентності ґрат цементита і мартенситу, завдяки чому зменшуються внутрішні напруження.

При відпусканні змінюються структура загартованої сталі (як результат дифузійних процесів) та її властивості, підвищується ударна в'язкість, границя пружності, пластичність, знижуються внутрішні напруження та твердість. Відпущена сталь в порівнянні з невідпущеною менш напружена і крихка. В залежності від температури нагрівання розрізняють наступні види відпускання, низьке, середнє, високе.

Низьке відпускання - загартовані вироби нагрівають і витримують протягом заданого часу в інтервалі температур 150...200 °С. Структура загартованої сталі до відпускання складається з тетрагонального мартенситу або тетрагонального мартенситу і залишкового аустеніту, причому залишковий аустеніт характерний для високовуглецевих сталей. В процесі низького відпускання атоми вуглецю дифундують з ґратки тетрагонального мартенситу і утворюють високодисперсний

карбід заліза. Концентрація вуглецю в гратці мартенситу поступово знижується, що призводить до зниження твердості тетрагонального мартенситу. При цьому утворюється відпущений мартенсит, який являє собою сукупність твердого розчину вуглецю (пересиченого) в  $\alpha$ -залізі і високодисперсного, який не відділився від нього, карбиду заліза. Така структура забезпечує майже ту ж твердість і стійкість до спрацювання, як і після гартування, але при цьому знижується залишкове напруження, підвищуються ударна в'язкість і пластичність. Низькотемпературному відпусканню підлягають різальний та вимірювальний інструмент, а також деталі машин, які поверхнево загартовані або загартовані після цементації і ціанування.

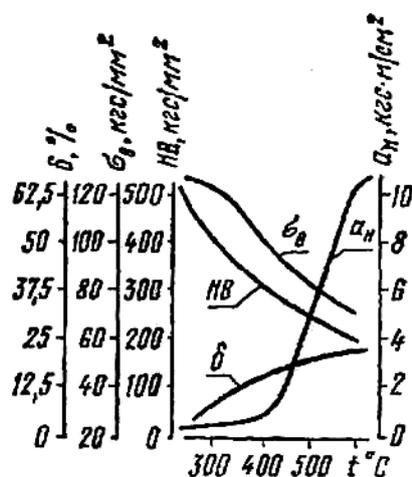
Середнє відпускання - загартовані вироби нагрівають і витримують протягом визначеного часу при температурах 350...500 °С. У вказаному інтервалі температур закінчується дифузійне перетворення залишкового аустеніту у відпущений мартенсит, карбіди повністю відокремлюються від гратки мартенситу, укрупнюється карбідно-феритна суміш і спостерігається подальше зниження твердості. Закінчується дифузія вуглецю з мартенситу, і зменшуються залишкові напруження. Структура середньовідпущеної сталі складається з тростита відпускання, який являє собою дуже дрібнодисперсну суміш фериту з цементитом. В результаті середнього відпускання сталь має підвищену міцність та пружність при твердості HB 450...500. Середньому відпусканню підлягають загартовані вироби, які повинні мати максимальні пружні властивості при відносно високій твердості: пружини, ресори, ударний інструмент - зубила, штампи та ін.

Високе відпускання - загартовані вироби нагрівають протягом заданого часу в інтервалі температур 500...650 °С. Процес супроводжується укрупненням цементитних часток у феритній основі. З укрупненням цементиту знижується твердість до HB 250...300, внутрішні напруження, а пластичність і ударна в'язкість значно зростає. В результаті високого відпускання утворюється структура, яка називається сорбітом відпускання. Високому відпусканню підлягають деталі, які сприймають ударні і знакозмінні навантаження: шатуни двигунів, напіввісі, вісі автомобілів та тракторів, гвинти, пальці, вали та багато інших деталей. Гартування з подальшим високим відпусканням частіше називають поліпшенням сталі.

Час витримки при відпусканні залежить від температури відпускання та

розміру деталей. Він повинен бути достатнім для закінчення процесів дифузії в загартованій сталі. В супротивному випадку ефективність відпускання знижується. Час витримки при відпусканні, особливо легуваних сталей, декілька більший часу витримки при нагріванні під гартування. При низьких температурах витримка більша, ніж при високих. Охолодження вуглецевих сталей після відпускання можна проводити з будь-якою швидкістю, оскільки воно не викликає в сталі яких-небудь додаткових структурних перетворень (температура нагрівання - нижче фазових перетворень). Однак надмірно швидке охолодження може викликати утворення термічних напружень (особливо в деталях складної форми). Тому звичайно сталі охолоджують на повітрі.

На мал. 3 показаний графік зміни механічних властивостей сталі 40 (твердості НВ, міцності  $\sigma_B$ , пластичності  $\delta$  та ударної в'язкості  $a_H$ ) в залежності від температури відпускання нагрівання при відпусканні особливо впливає на зміну ударної в'язкості сталі.



Мал. 3. Механічні властивості сталі марки 40 в залежності від температури відпускання

Під ударною в'язкістю розуміють роботу, яка витрачається при динамічному руйнуванні нагрітого зразка і віднесена до площі поперечного перерізу в місці надрізу. Значення ударної в'язкості  $a_H$  визначають за формулою:

$$a_H = A/F,$$

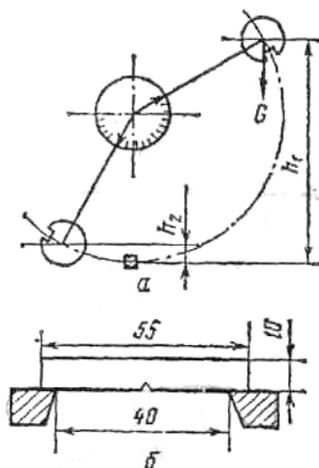
де: А - робота, яка витрачається на руйнування зразка;

F - площа поперечного перерізу зразка.

Так як більшість деталей машин, виготовлені з сталі, працюють в умовах

значних динамічних та ударних навантаженого ударна в'язкість виступає важливою характеристикою сталі. Випробування на ударну в'язкість проводять на маятниковому копрі. Схема його дії та стандартний зразок для випробування показані на мал. 4 а, б.

Маятник піднімають на деяку висоту  $h_1$  і закріплюють в цьому положенні затискувачем. Потім встановлюють зразок надрізом у бік, протилежний удару бійка. При звільненні затискувача маятник падає, руйнує зразок і піднімається на висоту  $h_2$ . Робота, яка витрачається на руйнування зразка, дорівнює  $A=(h_1-h_2) \cdot G$ , де  $G$  - вага маятника (тобто  $G=m \cdot g$ , де  $m$  – маса маятника,  $g$  – прискорення вільного падіння).



Мал. 4. Випробування зразків на ударну в'язкість: а - схема маятникового копра; б - схема становлення зразка.

На приладі значення роботи визначають по шкалі Ударна в'язкість сталі залежить від конструкції деталі, якості поверхні, хімічного складу сталі та її макро- і мікроструктури. Наявність в деталях різних переходів в перерізі, надрізів, виточок, вирізів і т.д. викликає концентрацію в них напружень, що значно знижує в'язкість сталі. Ударна в'язкість зменшується також при наявності на поверхні деталей ризок, подряпин, слідів механічної обробки та інших дефектів. У металів і сплавів, які мають волокнисту будову, що утворилася в результаті обробки металів (тиском), ударна в'язкість зразків з поперечний волокон складає 50...60 % ударної в'язкості зразків з повздовжнім волоконом.

Різний хімічний склад сталі і різні види застосованої термічної або хіміко-термічної обробки також значно змінюють значення ударної в'язкості.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Визначити за довідковими даними режим термічної обробки (гартування і відпускання) зразків із сталі 40 і У8 Виміряти площу перерізу зразків в місці надрізу.
2. Провести гартування зразків і їх відпускання (низьке, середнє, високе).
3. Виміряти твердість зразків на приладі Роквелла, ударну в'язкість на маятниковому копрі.

### **ЗМІСТ ЗВІТУ**

В звіт необхідно ввести: опис видів відпускання, перетворень при них отриманих механічних властивостях відпущеної сталі і мету застосування відпускання, протокол дослідних даних; графік зміни твердості і ударної в'язкості в залежності від температури відпускання. У висновках необхідно вказати, як впливає температура відпускання на твердість і ударну в'язкість сталей 40 та У8, пояснити причини їх зміни в процесі відпускання.

### **КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.**

1. З якої структурної складової утворюється сорбіт?
2. Яка структура Сталі 40 після низького відпускання?
3. Яка структура Сталі 40 після середнього відпускання?
4. Яка структура Сталі 35 після високого відпускання?
5. Яка структура Сталі У10 після низького відпускання?
6. Яка структура Сталі У10 після середнього відпускання?
7. Яка структура Сталі У10 після високого відпускання?
8. З яких фаз складається перліт?
9. Яка з структур має найвищу твердість?
10. З яких фаз складається тростит відпущений?
11. Яка структура Сталі 50 після низького відпускання?
12. Яка структура Сталі 50 після середнього відпускання?
13. Яка структура Сталі 45 після високого відпускання?
14. Яка структура Сталі У12 після низького відпускання?
15. Яка структура Сталі У12 після середнього відпускання?
16. Яка структура Сталі У12 після високого відпускання?
17. Яка структура Сталі 60 після низького відпускання?
18. Яка структура Сталі 60 після середнього відпускання?
19. Яка структура Сталі 55 після високого відпускання?
20. Яка структура Сталі У9А після низького відпускання?
21. Яка структура Сталі У9А після середнього відпускання?
22. Яка структура Сталі У10А після високого відпускання?

23. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
24. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
25. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
26. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
27. Яка структура Сталі У12А після високого відпускання?
28. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
29. Яка структура Сталі 80 після низького відпускання?
30. Яка структура Сталі У13А після низького відпускання?
31. Яка структура Сталі У13А після середнього відпускання?
32. Яка структура Сталі У9А після високого відпускання?
33. Яка структура Сталі У11А після середнього відпускання?
34. Яка з структур найбільш пластична?
35. Яка структура утворюється внаслідок перетворення аустеніту при сталій температурі 700 °С?
36. Яка структура Сталі 55 після низького відпускання?
37. Яка структура Сталі 55 після середнього відпускання?
38. Яка структура Сталі 50 після високого відпускання?
39. Яка структура Сталі У13 після низького відпускання?
40. Яка структура Сталі У13 після середнього відпускання?
41. Яка структура Сталі У13 після високого відпускання?
42. Яка структура Сталі 65 після низького відпускання?
43. Яка структура Сталі 60 після високого відпускання?
44. Яка структура Сталі У10А після середнього відпускання?
45. Яка структура Сталі У11А після високого відпускання?
46. З якої структурної складової утворюється мартенсит відпущений?
47. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
48. Яка структура Сталі 75 після низького відпускання?
49. Яка структура Сталі 75 після середнього відпускання?
50. Яка структура Сталі 70 після високого відпускання?
51. Яка структура Сталі У13А після високого відпускання?
52. З якої структурної складової утворюється мартенсит відпущений?
53. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
54. Яка з структур має найвищу твердість?
55. З яких фаз складається сорбіт?
56. Яка структура Сталі 80 після середнього відпускання?
57. Яка структура Сталі 80 після високого відпускання?
58. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
59. Яка з структур має найвищу твердість?
60. Яка з структур найбільш тверда?
61. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?

62. Яка структура Сталі У7 після неповного гартування і низького відпускання?
63. Яка структура Сталі 40 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  та низького відпускання?
64. З яких фаз складається сорбіт відпущений?
65. Яка структура Сталі 45 після низького відпускання?
66. Яка структура Сталі 45 після середнього відпускання?
67. Яка структура Сталі 40 після високого відпускання?
68. Яка структура Сталі У11 після низького відпускання?
69. Яка структура Сталі У11 після середнього відпускання?
70. Яка структура Сталі У11 після високого відпускання?
71. Яка структура Сталі У10А після середнього відпускання?
72. З яких фаз складається тростит?
73. Яка структура Сталі У12А після низького відпускання?
74. Яка структура Сталі У12А після середнього відпускання?
75. З якої структурної складової утворюється перліт?
76. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
77. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
78. Яка з структур загартованої сталі має найвищу твердість?
79. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при охолодженні сталі нижче  $A_{r1}$ ?
80. Яка структура найбільш пластична?
81. У якої з структур твердість вища?
82. З якої структурної складової утворюється тростит?
83. У якої з структур твердість вища?
84. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
85. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
86. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
87. Яка з структур має найвищу твердість?
88. Яка з структур найбільш тверда?
89. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
90. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
91. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
92. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
93. З якої структурної складової утворюється бейніт?
94. Яка структура Сталі 65 після середнього відпускання?
95. Яка структура Сталі 60 після високого відпускання?
96. Яка структура Сталі У10А після низького відпускання?
97. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
98. Яка термічна операція потрібна після низького відпускання сталі?
99. Яка термічна операція потрібна після середнього відпускання сталі?

100. Яка термічна операція потрібна після високого відпускання сталі?

### ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

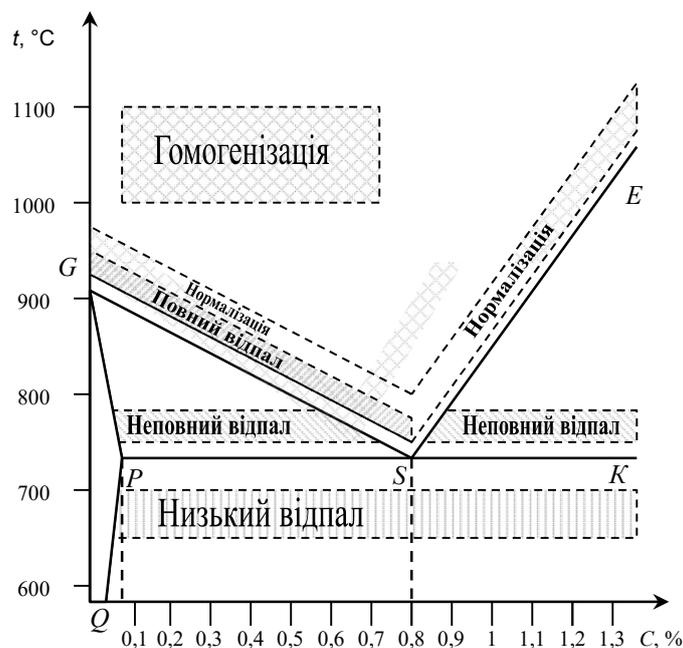
## ВІДПАЛ І НОРМАЛІЗАЦІЯ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

**Мета роботи:** ознайомитися з обладнанням для термічної обробки сталей; вивчити технологію нормалізації і відпускання вуглецевих сталей; визначити вплив швидкості охолодження на твердість вуглецевих сталей після термічної обробки.

### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Термічною обробкою** сталей називається технологічний процес, який складається з нагрівання сталі до певної температури, витримки та подальшого охолодження з заданою швидкістю. При термічній обробці отримують необхідні властивості сталі, змінюючи їх структуру без зміни хімічного складу.

Будь-який режим термічної обробки може бути представлений графічно в координатах температура-час. Температура нагрівання вуглецевої сталі орієнтовно в залежності від змісту вуглецю вибирається по діаграмі залізо-цементит, по довідковим даним і уточнюється експериментальним шляхом. Час визначається розрахунком, по довідковим даним і дослідом. Основні види термічної обробки - відпал, нормалізація, гартування і відпускання. В даній роботі розглядається тільки відпал, нормалізація і гартування, тобто, ті види термообробки, які здійснюються за рахунок перетворень аустеніту при охолодженні.

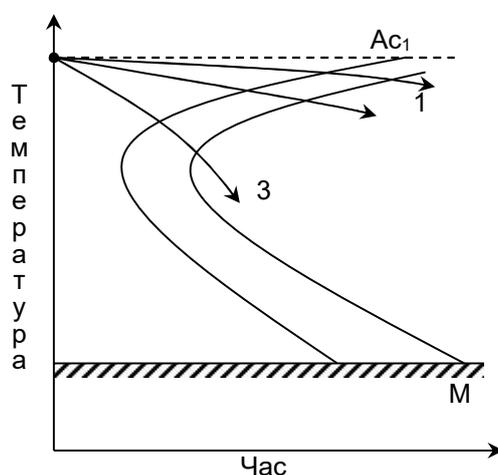


Мал. 1. Температурні інтервали термічної обробки сталі

**Відпалом** сталі називають термічну обробку, при якій доєвтектоїдну сталь

нагрівають вище критичної точки  $A_{c3}$ , а заевтектоїдну вище  $A_{c1}$  на  $30-50^{\circ}\text{C}$  (мал. 1) і після витримки повільно охолоджують в печі. При цьому отримують найбільш рівноважні структури: ферит з перлітом, перліт або перліт з цементитом. Основне призначення відпалу - перекристалізація зерна сталі, зниження твердості та зняття внутрішніх напружень.

**Нормалізацією** сталі називають нагрівання доевтектоїдних сталей вище критичної точки  $A_{c3}$ , евтектоїдних і заевтектоїдних сталей - вище критичної точки  $A_{cT}$  на  $30-50^{\circ}\text{C}$  з нетривалою витримкою та наступним охолодженням на повітрі. Після нормалізації вуглецеві сталі мають ту ж структуру, що і при відпалі, але перлитні суміші отримуються більш дрібнодисперсними, так як розпадання аустеніту відбувається при великих ступенях переохолодження (Мал. 2).



Мал. 2. Криві охолодження для: 1 – відпалу, 2 – нормалізації, 3 – одинарної термічної обробки, накладена на діаграму ізотермічного розпаду аустеніту

Мета нормалізації - перекристалізація зерна сталі, зняття внутрішніх напружень, підготовка сталі до подальшої пластичної деформації, механічної або термічної обробки. Нормалізація - дешевий і простий вид термічної обробки вуглецевих сталей, які містять менше  $0,5-0,6\% \text{C}$ , при підготовці їх до обробки різанням і може замінити відпал. В заевтектоїдних сталях нормалізація з температури вище  $A_{cT}$  призначена для усунення цементитної сітки.

Основна мета відпалу: перекристалізація сталі та усунення внутрішніх напруг або виправлення структури.

Обидві ці задачі виконуються простим повним відпалом (мал. 1), що полягає в нагріві сталі вище за верхню критичну точку з подальшим повільним

охладжуванням. Феррито-перлитова структура переходить при нагріві в аустенітну, а потім при охолодженні аустеніт перетворюється назад у ферит і перлит, тобто відбувається повна перекристалізація.

Структура, що складається з крупних зерен перлиту і фериту, яка часто буває після виливки або кування, після такого відпалу перетворюється на структуру з дрібних зерен фериту і перлиту.

Іноді феритні зерна мають вид голок — така структура називається відманштентова.

Якщо немає необхідності змінити розташування феритної складової, якщо початкова структура не дуже крупнозерниста, і не має характеру відманштентової структури, то достатньо провести нижчий нагрів - вищий  $A_{c1}$ , але нижчий  $A_{c3}$ . При цьому відбудеться лише перекристалізація перлітної складової, але не феритній. Це буде так званий неповний відпал (мал. 1). Неповний відпал більш економічна операція, ніж повний, Тому що нагрів в цьому випадку здійснюється до нижчих температур.

Якщо початкова структура нормальна і немає необхідності в перекристалізації, а вимагається тільки зменшити внутрішні напруження, то нагрів під відпал обмежують ще нижчими температурами, нижче за критичну точку. Це буде низький відпал (мал. 1). Якщо початковий стан має структури (бейніт, мартенсит), то таку операцію правильніше називають високим (пом'якшувальним) відпустканням.

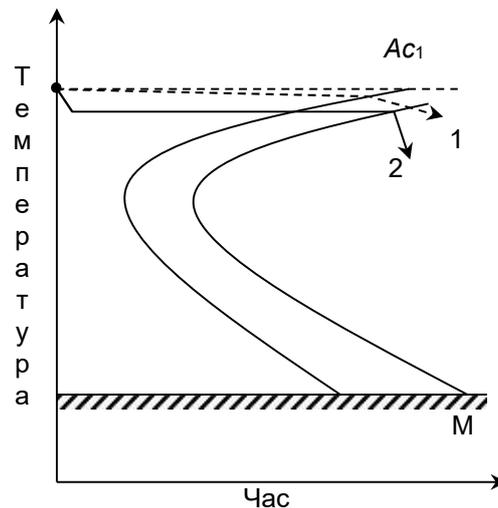
Лита сталь звичайно характеризується неоднорідністю складу, дендритною і зональною ліквіацією. Нагріваючи до високих температур і витримка при них приводять до усунення або пом'якшення дендритної неоднорідності. Така операція називається гомогенізацією, або дифузійним відпалом. В результаті високого нагріву (звично до 1000-1100 °C) і тривалої витримки спостерігається сильне зростання зерна, і тому після такої обробки структура виходить крупнозерниста і потрібна додаткова операція термічної обробки для виправлення структури (звичний відпал).

Якщо дифузійний відпал був застосований до злитків, які піддаватимуться пластичній деформації (плющенню, куванню), то необхідність в подальшому відпалі

відпадає, Тому що крупнозерниста структура виправиться пластичною деформацією.

Неповний відпал заевтектоїдних сталей називають також сфероїдизацією, тому що це - основний спосіб отримання зернистого перлиту. Вище було відмічено, що для отримання зернистого перлиту нагрів повинен не на багато перевершувати критичну точку  $A_{c1}$  інакше виходить пластинчастий перлит. Структурою зернистого перлиту повинні володіти інструментальні сталі, Тому що це забезпечує хорошу оброблювану ріжучим інструментом і малу схильність до перегріву при гарті.

При відпалі швидкість охолодження повинна бути така, щоб встигли відбутися перетворення аустеніту при малому ступені переохолодження. Практично швидкість охолодження не повинна бути більше 50-100 °C/ч, що досягається охолодженням в печі.



Мал. 3. Криві ізотермічного відпалу: 1- простий відпал, 2 – ізотермічний відпал

У заводській практиці з метою економії часу частіше проводять так званий ізотермічний відпал. Для цього сталь, нагріта вище за верхню (або тільки нижню) критичну точку, охолоджується швидко (точніше з будь-якою швидкістю) до температури, що лежить на 50-100 °C нижче рівноважної точки  $A_{c1}$  і при цій температурі витримується стільки, скільки необхідно для повного розпаду аустеніту (мал. 3). Оскільки температуру контролювати легше, ніж швидкість охолодження, такий відпал дає стабільніші результати. В даний час ізотермічний відпал застосовують частіше, ніж відпал з безперервним охолодженням, особливе для легованих сталей, Тому що це скорочує тривалість операції.

Нормалізація, природно, - дешевша термічна операція, ніж відпал, Тому що

печі використовують тільки для нагріву і витримки при температурі нормалізації, охолодження здійснюється на повітрі, поза піччю.

для низковуглецевих нелегованих сталей різниця у властивостях між відпаленим і нормалізованим станами практично відсутній і рекомендується ці сталі піддавати не відпалу, а нормалізації. Для середньовуглецевих сталей (0,3-0,5 % C) відмінність у властивостях нормалізованої і відпаленої сталі значніше; в цьому випадку нормалізація не може замінити відпалу. Але для цих сталей нормалізацією часто замінюють дорожчу операцію поліпшення, що полягає в подвійній обробці: гартування + відпустка при високій температурі. Нормалізація в цьому випадку додає сталі в порівнянні з відпаленим станом вищу міцність, але в порівнянні з поліпшеним станом нормалізована сталь має дещо меншу пластичність і в'язкість. Для невідповідальних деталей нормалізація дає достатньо задовільні механічні властивості; для відповідальних деталей слід все ж таки застосовувати поліпшення.

### **ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Виміряти твердість зразків до термічної обробки на приладі Бринеля.
2. Визначити по довідковим даним режими термічної обробки сталей 40 і У8 (відпалу, нормалізації і гартування).
3. Завантажити зразки у піч і після заданої витримки послідовно, по одному, охолодити у воді, масилі та на повітрі. Зразки підлягають відпалу до лабораторного заняття.
4. Виміряти твердість зразків після термічної обробки на приладі Роквелла.

### **ЗМІСТ ЗВІТУ**

В звіт необхідно ввести: опис видів термообробки та їх практичне застосування, ділянку діаграми стану залізо-цементит для сталей і вказати на ньому області оптимальних температур нагрівання для відпалу, нормалізації і гартування; протокол результатів випробувань (зведена таблиця); графік зміни твердості сталей 40 і У8 в залежності від виду термообробки (швидкості охолодження). У висновках вказати, як впливають швидкість охолодження і температура гартування на твердість сталей 40 і У8, коли і чому отримаємо найвищу твердість.

### **КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. Яка мета відпалу?
2. Чому дорівнює термін витримки при відпалі?

3. Яка структура Сталі 80 після відпалу?
4. З яких фаз складається перліт?
5. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 40?
6. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 40?
7. Яка з двох сталей У7 чи У8 більш тверда після відпала?
8. До якої температури треба нагрівати Сталь 45, щоб після відпалу отримати структуру ферит + перліт?
9. Як впливає цементит надлишковий на загальну твердість нормалізованої сталі?
10. Яка структура Сталі 80 після нормалізації?
11. До якої температури нагрівають доевтектоїдні сталі при нормалізації?
12. Яка структура Сталі 45 після відпалу?
13. Яка структура Сталі 45 після нормалізації?
14. З яким вмістом вуглецю у сталей після відпалу структура складається з перліту?
15. З якої кількості фаз складається перліт?
16. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 60?
17. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 60?
18. Яка структура буде у Сталі У12 А після відпалу з температури вище  $A_{c1}$ ?
19. До якої температури треба нагрівати Сталь У10, щоб після відпалу отримати структуру перліт + цементит?
20. Як впливає ферит на загальну твердість нормалізованої сталі?
21. До якої температури нагрівають заевтектоїдні сталі при нормалізації?
22. Яка структура Сталі У8А після відпалу?
23. Яка структура Сталі У8А після нормалізації?
24. З яким вмістом вуглецю у сталей після нормалізації структура складається з перліту + ферит?
25. Від чого залежить кількість вуглецю в перліті?
26. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У10А?
27. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У9?
28. Як визначається температура відпалу заевтектоїдної сталі?
29. До якої температури треба нагрівати Сталь 45, щоб після нормалізації отримати зернистий перліт?
30. Що змінюється при нормалізації сталі?
31. Скільки стадій (етапів) має процес нормалізації?
32. Яка структура Сталі 20 після відпалу?
33. Яка структура Сталі 20 після нормалізації?
34. З яким вмістом вуглецю у сталей після нормалізації структура складається з перліту + цементит?
35. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при охолодженні сталі нижче  $A_{r1}$ ?
36. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У9?
37. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У10А?

38. Як визначається температура відпалу доевтектоїдної сталі?
39. На якій лінії діаграми стану Fe – C лежать критичні точки  $A_{c3}$ ?
40. Яким методом визначається твердість відпаленої сталі?
41. З якою швидкістю відбувається охолодження при нормалізації?
42. Яка структура Сталі 50 після відпалу?
43. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
44. Що відбувається у аустеніті в процесі витримки його при нормалізації?
45. Які сталі не підлягають відпалу?
46. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У 13?
47. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У12А?
48. Як визначається температура відпалу перлітної сталі?
49. До якої температури треба нагрівати Сталь У8, щоб після відпалу отримати зернистий перліт?
50. Яка структура Сталі 65 після відпалу?
51. Яка з двох сталей У7 чи У8 більш м'яка після відпалу?
52. Яка структура Сталі 50 після відпалу?
53. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
54. З яким вмістом вуглецю у сталей після нормалізації структура складається з перліту?
55. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
56. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 60?
57. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 60?
58. Як змінюються пластичні властивості сталей після відпалу?
59. На якій лінії діаграми стану Fe – C лежать в критичній точки  $A_{c3}$ ?
60. Яким методом визначається твердість відпаленої сталі?
61. Яка структура Сталі 80 після нормалізації?
62. З яким вмістом вуглецю сталі не підлягають відпалу?
63. До якої температури нагрівають доевтектоїдні сталі при відпалі?
64. Яка структура Сталі 30 після відпалу?
65. Яка структура Сталі 30 після нормалізації?
66. З яким вмістом вуглецю у сталей після відпалу структура складається з перліту + ферит?
67. Як змінюються пластичні властивості сталей після відпалу?
68. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 50?
69. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 50?
70. Яка з двох сталей У7 чи У8 більш м'яка після нормалізації?
71. До якої температури нагрівають заевтектоїдні сталі при відпалі?
72. Яка структура Сталі У7 після відпалу?
73. Яка структура Сталі У7 після нормалізації?
74. З яким вмістом вуглецю у сталей після відпалу структура складається з перліту + цементиту?
75. З якої структурної складової утворюється перліт?

76. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 70?
77. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 70?
78. Яка структура буде у Сталі У12 А після нормалізації з температури вище  $A_{c_m}$ ?
79. До якої температури треба нагрівати Сталь У10, щоб після нормалізації отримати зернистий перліт?
80. Як впливає цементит надлишковий на загальну твердість відпаленої сталі?
81. Скільки стадії (етапів) має процес відпалу?
82. Яка структура Сталі У10 після відпалу?
83. Яка структура Сталі У10 після нормалізації?
84. З яким вмістом вуглецю у сталей після нормалізації структура складається з перліту?
85. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c_1}$ ?
86. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У12А?
87. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У10А?
88. Як визначається температура нормалізації заевтектоїдної сталі?
89. Що змінюється при відпалі сталі?
90. На якій лінії діаграми стану Fe – C лежать критичні точки  $A_{c_m}$ ?
91. З якою швидкістю відбувається охолодження при відпалі?
92. Яка структура Сталі У12 після відпалу?
93. Яка структура Сталі 20 після нормалізації?
94. Що відбувається у аустеніті в процесі витримки його при відпалі?
95. Яка структура утворюється в наслідок перетворення аустеніту при сталій температурі 700 °С?
96. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У11?
97. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У11?
98. Як визначається температура нормалізація доевтектоїдної сталі?
99. На якій лінії діаграми стану Fe – C лежать критичні точки  $A_{c_1}$ ?
100. Чому дорівнює термін витримки при відпалі?
101. Яка структура має найвищу твердість?
102. Яка термічна операція потрібна після відпалу?
103. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 45?
104. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 45?
105. Яка з двох сталей У7 чи У8 більш тверда після нормалізації?
106. До якої температури треба нагрівати Сталь У8, щоб після нормалізації отримати зернистий перліт?
107. Яка структура найбільш пластична?
108. Яка термічна операція потрібна після нормалізації ?
109. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У 13?
110. Яка структура утворюється в наслідок перетворення аустеніту при сталій температурі 700 °С?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

### ВИВЧЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМІЧНО ОБРОБЛЕНИХ СТАЛЕЙ

**Мета роботи:** вивчити особливості складових мікроструктур вуглецевих сталей, які отримані при різних режимах термічної обробки; встановити залежність між мікроструктурою термічно обробленої сталі та її механічними властивостями.

#### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Доевтектоїдна вуглецева сталь, нагріта вище  $A_{c3}$  на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  і загартована у воді з швидкістю більше критичної, як вказувалося вище, утворює пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі - мартенсит (мал. 1). Мартенсит має ігольчасту будову з розташуванням голок під кутом  $60$  або  $120^{\circ}$  одна до одної. Така будова обумовлена зсувами або зміщеннями деяких об'ємів металу по визначених площинах з одночасним перетворенням кристалічної ґратки заліза із гранецентрованої в об'ємноцентровану. Зсуви атомів металу при різкому охолодженні викликаються великими напруженнями в структурі, які виникають при різкому перепаді температур при гартуванні.

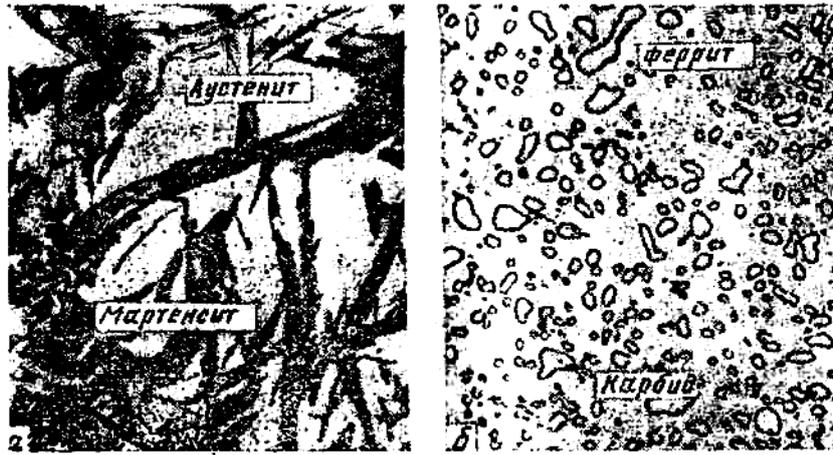


Мал. 1. Мікроструктура сталі марки 40 після термічної обробки: а - після гартування у воді; б - після неповного гартування; в - після гартування у мастилі; г- після гартування і високого відпускання. Травлення 4% розчином  $\text{HNO}_3$  в спирті,  $\times 500$

Правильно нагріта перед гартуванням сталь має після гартування структуру дрібноігольчатого мартенситу. Перегріта загартована сталь дає більш крупні голки мартенситу з декілька зниженою твердістю та підвищеною крихкістю. При неповному гартуванні доєвтектоїдних сталей (температура нагрівання вище  $A_{c1}$ , але

нижче  $A_{c3}$ ) утворюється структура, яка складається з мартенситу і фериту (мал. 1, б), останній на шліфі має вигляд світлих плям на голчатому фоні мартенситу. Така неоднорідна структура знижує твердість сталі, і тому неповне гартування не застосовується. Перегрівання і неповне гартування доєвтектоїдної сталі можна виправити повторним гартуванням з температурою нагрівання трохи вище  $A_{c3}$ . Якщо роздивитись шліф крупної деталі, яка загартована у воді, то на її поверхні можна побачити мартенсит. В глибині від поверхні до серцевини, де швидкість охолодження при гартуванні внаслідок обмеженої теплопровідності сталі або її недостатньої прогартованості була менше критичної, на фоні мартенситних голок буде видно структуру троститу, яка складається із дрібнодисперсної суміші фериту з цементитом. Тростит на шліфі виглядає темними включеннями між голками мартенситу (мал. 1, в). Подібна структура утворюється у вуглецевих сталей при вартуванні в масилі, яке повільніше охолоджує деталі, чим вода. Після неповного гартування заєвтектоїдної сталі структура складається з мартенситу, залишкового аустеніту і вторинного цементиту (мал. 2, а). Вторинний цементит в цій структурі сприяє підвищенню твердості, але робить сталь більш крихкою. Сталь після гартування має високу напруженість і крихкість. Щоб знизити напруженість і крихкість після гартування, сталеві деталі підлягають низькому, середньому або високому відпусканню. При низькому відпусканні середньовуглецевих сталей (температура нагрівання  $150...200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) утворюється відпущений кубічний мартенсит. У високовуглецевої сталі після низької відпускання, крім відпущеного мартенситу, є також включення залишкового аустеніту. Світлі голки мартенситу гартування у відпущеному мартенситі стають темними, так як він сильніше протравлюється. Залишковий аустеніт виявляється на шліфі у вигляді світлих полів між темними голками мартенситу.

При середньому відпусканні (температура нагрівання  $350...500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) утворюється дрібнодисперсна суміш фериту з цементитом, яка називається троститом відпускання. Частинки цієї суміші такі дрібні, що майже не розрізняються в оптичному мікроскопі. Вони ще зберігають орієнтацію по мартенситу. Тростит відпускання травиться сильніше мартенситу і під мікроскопом виглядає більш темним.



Мал. 2 Мікроструктура сталі марки У12: а - після гартування; б - після відпалу на зернистий перліт. Травлення 4% розчином  $\text{HNO}_3$  в спирті  $\times 500$

При високому відпусканні (температура нагрівання  $500\dots 650\text{ }^\circ\text{C}$ ) суміш фериту з цементитом стає крупніша, чим у тростита. При такому відпусканні відбувається часткова сфероїдизація карбідних пластинок і утворюється структура сорбіт відпускання (див мал. 1, 2), який на мікросліфі більш світлий, ніж тростит, так як він менш напружений і тому слабкіше протравлюється. Сорбіт відпускання, як і тростит відпускання, нерідко зберігає мартенситну орієнтацію. Слід відзначити, що на відміну від сорбіту і троститу гартування, які мають пластинчасту будову, тростит і сорбіт відпускання мають зернисту будову.

Якщо проводити неповний відпал (нагрівання трохи вище  $A_{c1}$  або якщо проводити декілька послідовних нагрівань та охолоджень вище і нижче лінії  $A_{c1}$ ), то процес сфероїдизації цементиту пройде більш інтенсивно і утворюється структура зернистого перліту (мал. 2, б). На фоні фериту буде видно зерна сфероїдизованого цементиту. Така структура особливо важлива для інструментальних сталей, так як вона забезпечує добру оброблюваність різальним інструментом і малу схильність до перегрівання при гартуванні.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Вивчити на металомікроскопі та замалювати мікроструктури сталі 40, яка підлягала повному і неповному гартуванню у воді, сталі У12, яка загартована у воді, сталі 40, яка підлягала повному гартуванню і низькому, середньому, високому відпусканню; сталі У8, відпаленої на зернистий перліт.

2. Дати опис мікроструктур.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яка структура Сталі У7 після гартування?
2. З якої структурної складової утворюється сорбіт?
3. Яку назву має пересичений твердий розчин вуглецю у  $Fe_\alpha$ ?
4. Яка структура Сталі 40 після низького відпускання?
5. Яка структура Сталі 40 після середнього відпускання?
6. Яка структура Сталі 35 після високого відпускання?
7. Яка структура Сталі У10 після низького відпускання?
8. Яка структура Сталі У10 після середнього відпускання?
9. Яка структура Сталі У10 після високого відпускання?
10. З яких фаз складається перліт?
11. Яка структура Сталі У8 після гартування?
12. Яка структура Сталі 40 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
13. З яких фаз складається сорбіт відпущений?
14. Яка структура Сталі 45 після низького відпускання?
15. Яка структура Сталі 45 після середнього відпускання?
16. Яка структура Сталі 40 після високого відпускання?
17. Яка структура Сталі У11 після низького відпускання?
18. Яка структура Сталі У11 після середнього відпускання?
19. Яка структура Сталі У11 після високого відпускання?
20. Яка структура Сталі У10А після середнього відпускання?
21. Яка структура Сталі У10 після гартування?
22. Яка з структур має найвищу твердість?
23. Яка структура Сталі 50 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
24. З яких фаз складається тростит відпущений?
25. Яка структура Сталі 50 після низького відпускання?
26. Яка структура Сталі 50 після середнього відпускання?
27. Яка структура Сталі 45 після високого відпускання?
28. Яка структура Сталі У12 після низького відпускання?
29. Яка структура Сталі У12 після середнього відпускання?
30. Яка структура Сталі У12 після високого відпускання?
31. Яка структура Сталі 60 після низького відпускання?
32. Яка структура Сталі 60 після середнього відпускання?
33. Яка структура Сталі 55 після високого відпускання?
34. Яка структура Сталі У9А після низького відпускання?
35. Яка структура Сталі У9А після середнього відпускання?
36. Яка структура Сталі У10А після високого відпускання?
37. Яка структура Сталі 80 після нормалізації?
38. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
39. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
40. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
41. Яку структуру буде мати Сталь 40 після неповного гартування?

42. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
43. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
44. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
45. Яка структура Сталі У12А після високого відпускання?
46. Яка структура Сталі 80 після нормалізації?
47. Яка структура Сталі 30 після відпалу?
48. Яка структура Сталі 30 після нормалізації?
49. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
50. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
51. Яка структура Сталі 80 після низького відпускання?
52. Яка структура Сталі У13А після низького відпускання?
53. Яка структура Сталі У13А після середнього відпускання?
54. Яка структура Сталі У9А після високого відпускання?
55. Яка структура Сталі У11А після середнього відпускання?
56. Яка структура Сталі 50 після відпалу?
57. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
58. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
59. Яка структура Сталі У7 після відпалу?
60. Яка структура Сталі У7 після нормалізації?
61. Яка структура Сталі У12 після гартування?
62. Яка з структур найбільш пластична?
63. Яка структура утворюється внаслідок перетворення аустеніту при сталій температурі 700 °С?
64. Яка структура Сталі 60 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
65. Яка структура Сталі 55 після низького відпускання?
66. Яка структура Сталі 55 після середнього відпускання?
67. Яка структура Сталі 50 після високого відпускання?
68. Яка структура Сталі У13 після низького відпускання?
69. Яка структура Сталі У13 після середнього відпускання?
70. Яка структура Сталі У13 після високого відпускання?
71. Яка структура Сталі 65 після низького відпускання?
72. Яка структура Сталі 60 після високого відпускання?
73. Яка структура Сталі У10А після середнього відпускання?
74. Яка структура Сталі У11А після високого відпускання?
75. Яка структура Сталі 80 після відпалу?
76. З яких фаз складається перліт?
77. Яка структура Сталі 80 після нормалізації?
78. З якої структурної складової утворюється мартенсит відпущений?
79. Яка структура Сталі 45 після відпалу?
80. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
81. Яка структура Сталі 75 після низького відпускання?
82. Яка структура Сталі 75 після середнього відпускання?

83. Яка структура Сталі 70 після високого відпускання?
84. Яка структура Сталі У13А після високого відпускання?
85. З якої структурної складової утворюється мартенсит відпущений?
86. Яка структура Сталі 45 після відпалу?
87. Яка структура Сталі 45 після нормалізації?
88. Яка структура буде у Сталі У12 А після відпалу з температури вище  $A_{c1}$ ?
89. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
90. Яка з структур має найвищу твердість?
91. Яка структура Сталі 40 після гартування?
92. З яких фаз складається сорбіт?
93. Яка структура Сталі 70 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
94. Яка структура Сталі 80 після середнього відпускання?
95. Яка структура Сталі 80 після високого відпускання?
96. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
97. Яка з структур має найвищу твердість?
98. Яка з структур найбільш тверда?
99. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
100. Яка структура Сталі 30 після гартування?
101. З яких фаз складається тростит?
102. Яка структура Сталі 30 після гартування?
103. Яка структура Сталі У12А після низького відпускання?
104. Яка структура Сталі У12А після середнього відпускання?
105. Яка структура Сталі У7 після відпалу?
106. Яка структура Сталі У7 після нормалізації?
107. З якої структурної складової утворюється перліт?
108. Яка структура буде у Сталі У12 А після нормалізації з температури вище  $A_{cm}$ ?
109. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
110. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
111. З якої структурної складової утворюється мартенсит?
112. Яка з структур загартованої сталі має найвищу твердість?
113. Яка структура Сталі 20 після відпалу?
114. Яка структура Сталі 20 після нормалізації?
115. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при охолодженні сталі нижче  $A_{r1}$ ?
116. Яка структура Сталі 50 після відпалу?
117. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
118. Яка структура найбільш пластична?
119. Яка структура Сталі 50 після відпалу?
120. У якій з структур твердість вища?
121. Яка структура Сталі 50 після відпалу?
122. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
123. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?

124. З якої структурної складової утворюється тростит?
125. У якої з структур твердість вища?
126. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
127. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
128. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
129. Яка з структур має найвищу твердість?
130. Яка з структур найбільш тверда?
131. Яка структура Сталі 45 після гартування?
132. Яка структура буде у сталі У12 після гартування з температурою вище  $A_{c_m}$ ?
133. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
134. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
135. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
136. Яка структура Сталі У8А після відпалу?
137. Яка структура Сталі У8А після нормалізації?
138. Яка структура Сталі У10 після відпалу?
139. Яка структура Сталі У10 після нормалізації?
140. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
141. З якої структурної складової утворюється бейніт?
142. Яка структура Сталі 65 після середнього відпускання?
143. Яка структура Сталі 60 після високого відпускання?
144. Яка структура Сталі У10А після низького відпускання?
145. Яка структура Сталі У12 після відпалу?
146. Яка структура Сталі 20 після нормалізації?
147. Яка структура Сталі 65 після відпалу?
148. Яка структура має найвищу твердість?
149. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c_1}$ ?
150. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА 5

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГАРТОВАНОСТІ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ТОРЦЕВОГО ГАРТУВАННЯ

**Мета роботи:** ознайомитися з методикою визначення прогартуваності сталі методом торцевого гартування; навчитися визначати критичні діаметри для сталей при гартуванні в різних середовищах.

*Для виконання роботи потрібні:* стандартні круглі зразки вуглецевих і низьколегованих сталей (40, У8А, 40Х, 40ХН та ін.), муфельна піч, термоелектричний пірометр, пристрої для запобігання від знеуглецьовування сталі під час нагрівання зразка, установка для торцевого гартування зразків, твердомір Роквелла, годинник, кліщі, номограми для визначення прогартуваності сталі.

#### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Прогартуваність** - здатність сталі загартуватися на певну глибину, тобто в результаті гартування отримувати мартенситну або трооститно-мартенситну структуру. Це одна з найважливіших характеристик сталі, яка визначає зміну механічних властивостей за перерізом виробу.

Нескрізна прогартуваність пояснюється тим, що при гартуванні на певній глибині деталь охолоджується зі швидкістю, меншою за критичну швидкість охолодження.

Для конструкційних сталей зручно визначати прогартуваність за товщиною шару, який має мартенситну і напівмартенситну структуру, тобто структуру з 50 % мартенситу і 50 % трооститу. Твердість мартенситу і трооститу залежить переважно від вмісту вуглецю, а також від наявності легувальних елементів. Отже, твердість напів-мартенситної зони буде відомою, якщо відома масова частка вуглецю в досліджуваній сталі (табл. 1).

Для інструментальних заєвтектоїдних сталей у загартуваному стані твердість напівмартенситного шару не можна визначити вмістом вуглецю, оскільки в структурі є м'яка складова (залишковий аустеніт). Тому прогартуваність інструментальних сталей визначають за товщиною загартуваного шару з мартенситною структурою, твердість якої становить 60 HRC.

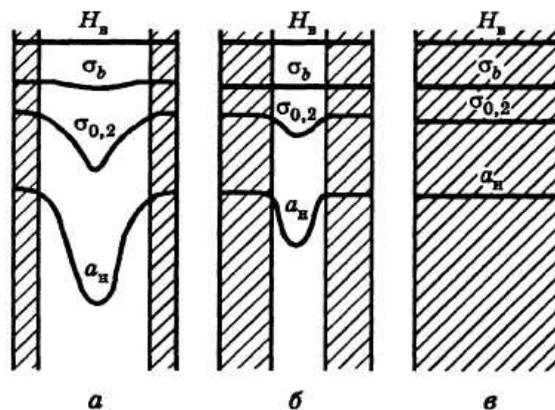
Таблиця 1. Твердість шару із напівмартенситною структурою загартованої сталі

Масова частка вуглецю в сталі, %	Твердість сталі, HRC	
	вуглецевої	легованої
0,28...0,32	35	40
0,33...0,42	40	45
0,43...0,52	45	50
0,53...0,62	50	55
0,80	53	53
0,90	55	56

Для сталей із наскрізною прогартованістю механічні властивості (мал. 1 в) після гартування і відпускання будуть однаковими по всьому перерізу виробу, тоді як для сталей з неповною прогартованістю ці властивості будуть різними (мал. 1 а, б).

Для деталей, які працюють в умовах підвищених напружень і значних динамічних навантажень, потрібно підбирати сталі з високою прогартованістю. Вона залежить від хімічного складу сталі, розмірів аустенітного зерна і деталі та умов гартування.

Прогартованість сталі збільшується з підвищенням температури гартування, яка зумовлює ріст зерна аустеніту, а для заевтектоїдних сталей, крім того, ще й за рахунок більш повного розчину карбідів і насичення аустеніту вуглецем і легувальними елементами за винятком кобальту.



Мал. 1. Вплив глибини гартування на механічні властивості загартованих і відпущених сталей різної прогартованості: а, б - нескрізна прогартованість; в - наскрізна прогартованість

Прогартованість сталі залежить також від охолоджувальної здатності середовища, в якому виконують гартування. Зі збільшенням інтенсивності охолодження прогартованість сталі зростає.

Прогартованість сталі визначають методом торцевого гартування, охолоджуючи водою торець спеціального зразка (мал. 2 б). Структура сталі зразків перед випробуванням має відповідати структурі після нормалізації.

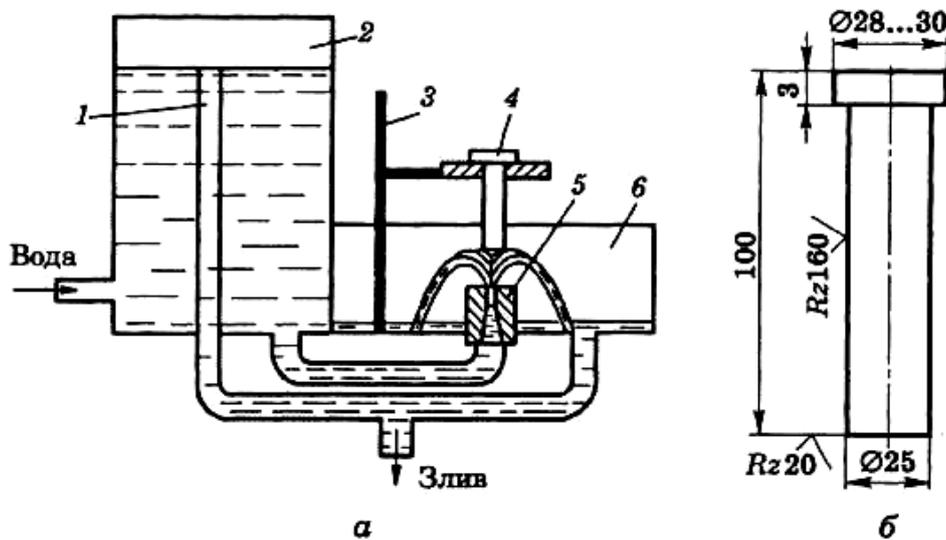


Рис. 2. Установка для торцевого гартування: а - при визначенні прогартованості сталі; б - сталевий зразок; 1 – вимірювальна трубка для утворення постійного напору води; 2 - бак; 3 - штатив; 4 - зразок; 5 - сопло; 6 - зливний резервуар

Температури аустенізації зразків із сталей різних груп залежно від масової частки вуглецю наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Температури аустенізації вуглецевих і деяких низьколегованих сталей

Сталі	Масова частка вуглецю, %	Температура аустенізації, °С
Вуглецеві, марганцеві, хромисті, хромомолібденові, хромонікелеві (з масовою часткою хрому до 1,25 і нікелю до 2%), нікелемолібденові	0,20	900
	0,26	870
	0,37	840
	0,55	820
Силіцієві, силіціємарганцеві, хромосиліціємарганцеві та хромомолібденованадієві	0,15	900
	0,25	880
	0,45	870

Зразки нагрівають у соляній ванні або в муфельній печі. Час витримання зразка при досягненні температури аустенізації становить 30 хв.

Зразки гартують у спеціальній установці (рис. 2 а), розміщеній на такій відстані від печі (ванни), щоб час їх перенесення до початку охолодження не перевищував 5 с.

### **ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

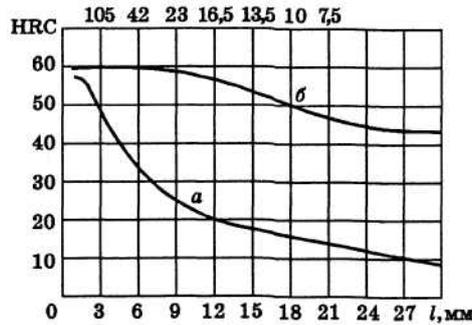
1. Зашліфувати зразки для дослідження з двох діаметрально протилежних

сторін і заміряти їх твердість.

2. Нагріти зразки до температур аустенізації з подальшим гартуванням стандартних зразків із сталей 40, 40X і У8А.

3. Користуючись табл. 2, визначити твердість напівмартенситної зони для заданих марок сталей.

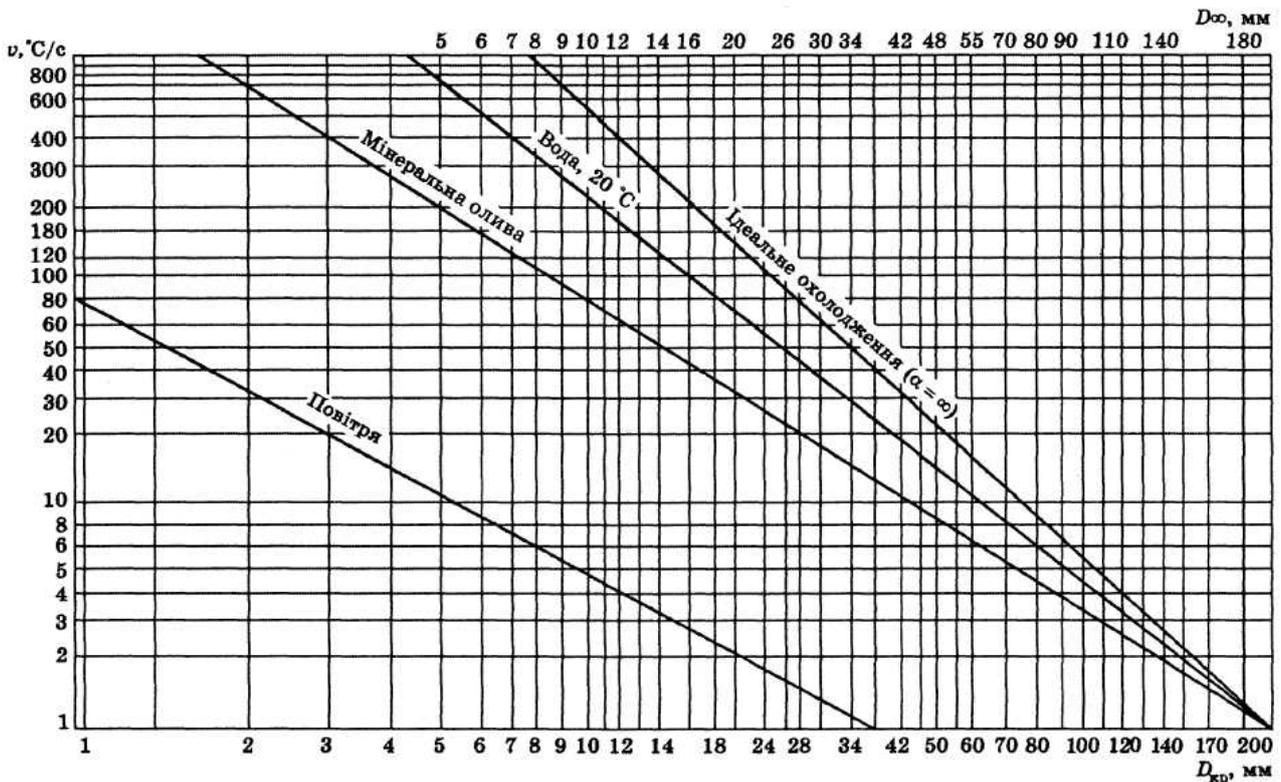
4. Визначити прогартуваність досліджуваних сталей, побудувавши криву прогартуваності, як це по казано на мал. 3.



Мал. 3. Зміна твердості за довжиною зразка після торцевого гартування сталей: а - з низькою прогартуваністю; б - з високою прогартуваністю

5. Користуючись номограмою (мал. 4), визначити критичні діаметри при охолодженні сталі у воді  $D_{кр.в.}$ , оливі  $D_{кр.о.}$  і на повітрі  $D_{кр.п.}$ .

6. Результати досліджень занести в протокол (табл. 3).



Мал. 4. Номограма для визначення прогартуваності сталі

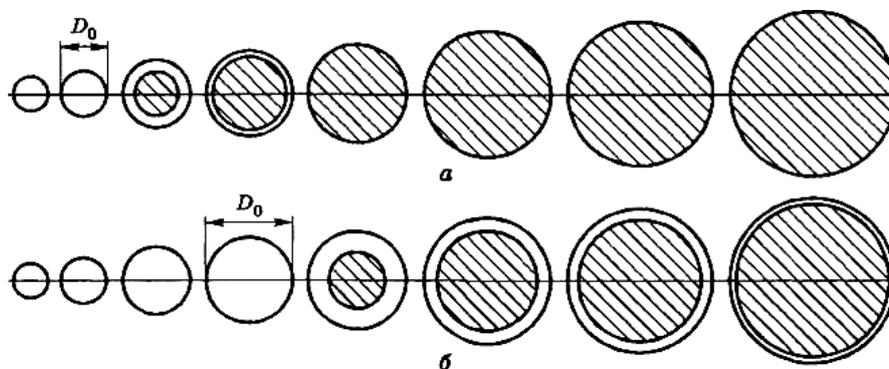
Перед проведенням експерименту попередньо налагоджують установку (див. мал. 2 а) на холодному зразку. При цьому регулюють висоту стовпа води, що подається із бака 2 через сопло 5 на торець зразка 4, який підвішений на штативі 3 з відповідною точністю його потрапляння на торець зразка. Струмінь води має охолоджувати тільки торець зразка і не змочувати його циліндричну поверхню. Зразок 4 витримують під струменем води до повного охолодження (не менше ніж 10 хв).

Вимірювання твердості загартованих зразків на твердомірі Рок-велла починають від торця в осьовому напрямку через кожні 1,5мм (16 вимірювань), а потім через 3мм. Закінчують вимірювання, якщо твердість не змінюється.

Прогартованість визначають відстанню (у міліметрах) від торця до напівмартенситної зони.

Для практичного оцінювання прогартованості сталей застосовують критичний діаметр  $D_k$ .

Критичний діаметр сталі — це максимальний діаметр циліндричного прутка, який прогартовується наскрізь у певному охолоджувальному середовищі (мал. 5).



Мал. 5. Прогартованість круглого прокату різних розмірів при охолодженні в оливі (а) і воді (б) (заштрихована зона - незагартована)

Вуглецеві сталі при гартуванні з нагріванням до прийнятих температур і при охолодженні у воді прогартовуються наскрізь у деталях перерізом до 15 мм.

Леговані сталі з високим вмістом легувальних елементів можуть прогартовуватися в перерізі до 200...300 мм при менш інтенсивному охолодженні (олива, повітря). Щоб критичний діаметр не залежав від охолоджувального середовища, вводять поняття «ідеальний критичний діаметр»  $D_\infty$ . Він відповідає максимальному перерізу прутка, який прогартовується наскрізь в ідеальному

охолоджувальному середовищі з нескінченно великою швидкістю охолодження ( $\alpha=\infty$ ).

Користуючись номограмою (див. мал. 4), з досить високою точністю можна визначити прогартованість для виробів простої геометричної форми (циліндр, куля, квадрат, паралелепіпед), якщо відомий один із критичних діаметрів залежно від охолоджувального середовища.

Наприклад, нам відомий ідеальний критичний діаметр, який становить 100мм. Для визначення реальних критичних діаметрів при охолодженні у воді  $D_{кр.в.}$ , в оливі  $D_{кр.о.}$  чи на повітрі  $D_{кр.п.}$  із точки 100 мм, що лежить на верхній шкалі абсцис, спочатку опустити перпендикуляр на лінію ідеального охолодження ( $\alpha=\infty$ ), а потім із точки перетину провести вліво горизонтальну пряму до перетину з нахиленими лініями «вода, 20 °С», «мінеральна олива» і «повітря». Опустивши із точок перетину перпендикуляр на нижню шкалу абсцис, знайти значення критичних діаметрів сталі залежно від охолоджувального середовища. У цьому разі вони матимуть такі значення:  $D_{кр.в.}=90\text{мм}$ ;  $D_{кр.о.}=70\text{мм}$ ;  $D_{кр.п.}=10\text{мм}$ .

Цю пробу виконують гартуванням з охолодженням водою із торця спеціального зразка, розміри якого показано на мал. 1 б.

Таблиця 3. Протокол визначення прогартованості сталей

Марка сталі	Відстань від загартованого торця, мм	Середнє значення твердості, HRC	Твердість напівмартенситної зони, HRC	Прогартованість сталі, мм	Критичний діаметр при гартуванні, мм		
					$D_{кр.в.}$	$D_{кр.о.}$	$D_{кр.п.}$

### ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Провести експеримент з різними сталями для визначення їх прогартованості.
4. Результати експерименту занести в протокол (табл. 2.26).
5. Висновки.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке загартованість і прогартованість сталей?
2. Що розуміють під глибиною загартованості сталі?
3. Чинники, які визначають прогартованість сталі.
4. Як визначають прогартованість сталей методом торцевого гартування?
5. Що таке критичний діаметр сталі? Його значення для різних сталей.

### **Контрольні питання для захисту модуля: “Термічна обробка”**

1. Яка марка сталі Сталь Ст3; Сталь У13; Сталь 45 не підлягає гартуванню ?
2. Яка мета гартування ?
3. Від чого залежать температурні інтервали мартенситного перетворення?
4. Який фактор найбільш впливає на утворення крупногольчатого мартенситу?
5. Яка мета середнього відпускання ?
6. Яка структура Сталі 45 після середнього відпускання?
7. Яка структура Сталі У11 після низького відпускання?
8. З яких фаз складається сорбіт відпущений?
9. Яка мета відпалу?
10. Яка структура Сталі 80 після відпалу?
11. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 40?
12. Як впливає цементит надлишковий на загальну твердість нормалізованої сталі?
13. Яка структура Сталі 40 після середнього відпускання?
14. Яка структура Сталі 35 після високого відпускання?
15. Яка структура Сталі У10 після низького відпускання?
16. Яка марка сталі Сталь 20; Сталь У10; Сталь 85 не підлягає гартуванню ?
17. Яка структура Сталі У8 після гартування?
18. Від чого залежить кількість вуглецю в мартенситі?
19. У яких сталях кінець мартенситного перетворення потрапляє в область від’ємних температур?
20. Яка мета високого відпускання ?
21. Яка структура Сталі 45 після середнього відпускання?
22. Яка структура Сталі У11 після низького відпускання?
23. З яких фаз складається тростит відпущений?
24. Яка структура Сталі 80 після нормалізації?
25. До якої температури нагрівають доевтектоїдні сталі при відпалі?
26. Яка структура Сталі 30 після нормалізації?
27. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 50?
28. З яких фаз складається сорбіт відпущений?
29. Яка структура Сталі 45 після низького відпускання?
30. Яка структура Сталі 45 після середнього відпускання?
31. Яка марка сталі Сталь У12А; Сталь У7; Сталь 10 не підлягає гартуванню ?
32. Яка структура Сталі У10 після гартування?
33. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
34. У яких сталях після гартування кількість  $A_{залиш}$  найбільша?
35. Після якої термічної обробки виконується низьке відпускання?
36. Яка структура Сталі 50 після середнього відпускання?
37. Яка структура Сталі У12 після низького відпускання?
38. Які сталі не підлягають високому відпусканню?

39. До якої температури нагрівають доєвтектоїдні сталі при нормалізації?
40. Яка структура Сталі 45 після нормалізації?
41. З якої кількості фаз складається перліт?
42. До якої температури треба нагрівати Сталь У10, щоб після відпалу отримати структуру перліт + цементит?
43. Яка структура Сталі 50 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
44. З яких фаз складається тростит відпущений?
45. Яка структура Сталі 50 після низького відпускання?
46. Яка марка сталі Сталь Ст5; Сталь 60 не підлягає гартуванню ?
47. Яка структура Сталі У12 після гартування?
48. Яка структура утворюється внаслідок перетворення аустеніту при сталій температурі 700 °С?
49. Який недолік загартованих сталей?
50. Після якої термічної обробки виконується середнє відпускання?
51. Яка структура Сталі 55 після середнього відпускання?
52. Яка структура Сталі У13 після низького відпускання?
53. У якому середовищу швидкість охолодження після відпускання найменша?
54. До якої температури нагрівають заєвтектоїдні сталі при відпалі?
55. Яка структура Сталі У7 після нормалізації?
56. З якої структурної складової утворюється перліт?
57. До якої температури треба нагрівати Сталь У10, щоб після нормалізації отримати зернистий перліт?
58. Яка структура утворюється внаслідок перетворення аустеніту при сталій температурі 700°С?
59. Яка структура Сталі 60 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
60. Яка структура Сталі 60 після низького відпускання?
61. Яка марка сталі Сталь 70; Сталь 30; Сталь 40 не підлягає гартуванню ?
62. Яку структуру буде мати Сталь 40 після неповного гартування?
63. Чим відрізняється сорбіт від троститу?
64. У якої з сталей температура гартування вища?
65. Після якої термічної обробки виконується високе відпускання?
66. Яка структура Сталі 60 після середнього відпускання?
67. Яка структура Сталі У9А після низького відпускання?
68. Чим пояснюється висока твердість мартенситу відпущеного?
69. До якої температури нагрівають заєвтектоїдні сталі при нормалізації?
70. Яка структура Сталі У8А після нормалізації?
71. Від чого залежить кількість вуглецю в перліті?
72. До якої температури треба нагрівати Сталь 45, щоб після нормалізації отримати зернистий перліт?
73. Яка структура Сталі 55 після високого відпускання?
74. Яка структура Сталі У9А після низького відпускання?
75. Яка структура Сталі У9А після середнього відпускання?
76. Яка марка сталі Сталь 08; Сталь У11А; Сталь У 13А не підлягає гартуванню ?
77. Яка структура Сталі 40 після гартування?
78. Нижче якої температури відбувається переохолодження аустеніту при гартуванні?

79. У якої з сталей температура  $M_p$  вища?
80. Яка температура низького відпускання?
81. Яка структура Сталі 65 після середнього відпускання?
82. Яка структура Сталі У10А після низького відпускання?
83. До якої температури треба нагрівати Сталь 45, щоб після відпускання отримати тростит відпущений?
84. Скільки стадії (етапів) має процес відпалу?
85. Яка структура Сталі У10 після нормалізації?
86. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
87. Що змінюється при відпалі сталі?
88. Яка структура Сталі У10А після середнього відпускання?
89. Яка структура Сталі У11А після високого відпускання?
90. Яка структура Сталі 80 після відпалу?
91. Яка марка сталі Сталь 65Г; Сталь Ст2; Сталь У8 не підлягає гартуванню ?
92. Яка кристалічна ґратка у мартенситу?
93. Яка структура буде у сталі У12 після гартування з температурою вище  $A_{c_m}$ ?
94. У яких з сталей Сталь 75; Сталь 85; Сталь 25; Сталь 15 температура гартування вища?
95. Яка температура середнього відпускання?
96. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
97. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
98. Що відбувається з аустенітом залишковим в температурному інтервалі 200-300 °С?
99. Скільки стадії (етапів) має процес нормалізації?
100. Яка структура Сталі 40 після нормалізації?
101. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при охолодженні сталі нижче  $A_{r1}$ ?
102. На якій лінії діаграми стану Fe – С лежать критичні точки  $A_{c3}$ ?
103. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
104. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
105. Яка структура Сталі У12А після високого відпускання?
106. Яка марка сталі Сталь Ст3; Сталь У10А; Сталь 50 не підлягає гартуванню ?
107. Від чого залежать розміри мартенситних кристалів?
108. Що спільного у троститу і сорбіту?
109. У яких з сталей Сталь 20; Сталь 30; Сталь 40 температура гартування вища?
110. Яка температура високого відпускання?
111. Яка структура Сталі 75 після середнього відпускання?
112. Яка структура Сталі У12А після низького відпускання?
113. З якої структурної складової утворюється мартенсит відпущений?
114. З якою швидкістю відбувається охолодження при відпалі?
115. Яка структура Сталі 20 після нормалізації?
116. Яка структура утворюється в наслідок перетворення аустеніту при сталій температурі 700 °С?
117. На якій лінії діаграми стану Fe – С лежать критичні точки  $A_{c1}$ ?
118. Яка структура Сталі 70 після високого відпускання?
119. Яка структура Сталі У13А після високого відпускання?

120. З якої структурної складової утворюється мартенсит відпущений?
121. Яка марка сталі Сталь Ст1; Сталь 55; Сталь 65 не підлягає гартуванню ?
122. З якої структурної складової утворюється мартенсит?
123. Які механічні властивості має мартенсит?
124. У яких з сталей Сталь У8А; Сталь У10А; Сталь 55; Сталь 35 температура гартування вища?
125. Скільки стадій (етапів) має процес відпускання?
126. Яка структура Сталі 80 після середнього відпускання?
127. Яка структура Сталі У10А після низького відпускання?
128. Від чого залежить кількість вуглецю в мартенситі відпущеному?
129. З якою швидкістю відбувається охолодження при нормалізації?
130. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
131. Які сталі не підлягають відпалу?
132. До якої температури треба нагрівати Сталь У8, щоб після відпалу отримати зернистий перліт?
133. Яка структура Сталі У13А після середнього відпускання?
134. Яка структура Сталі У9А після високого відпускання?
135. Яка структура Сталі У11А після середнього відпускання?
136. Яка марка сталі Сталь 80; Сталь 15; Сталь 60 не підлягає гартуванню ?
137. З якої структурної складової утворюється бейніт?
138. Як визначається температура гартування заевтектоїдної сталі?
139. Як впливають легуючі елементи на положення С-подібних кривих?
140. Яка структура Сталі 75 після високого відпускання?
141. Які механічні властивості має мартенсит відпущений?
142. Яким методом визначається твердість сталі після низького відпускання?
143. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
144. Яка структура має найвищу твердість?
145. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 45?
146. Яка з двох сталей У7 чи У8 більш тверда після нормалізації?
147. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У 13?
148. Яка структура Сталі 70 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
149. Яка структура Сталі 80 після середнього відпускання?
150. Яка структура Сталі 80 після високого відпускання?
151. Яка марка сталі Сталь 25; Сталь 35; Сталь 45 не підлягає гартуванню?
152. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі 50?
153. Який фактор найбільш впливає на критичну швидкість гартування сталі?
154. Як впливає вміст вуглецю на положення С-подібних кривих?
155. Яка структура Сталі 35 після високого відпускання?
156. Яка структура Сталі У10 після середнього відпускання?
157. Яка структура Сталі У10 після високого відпускання?
158. З яким вмістом вуглецю у сталей після низького відпускання структура складається з мартенситу відпущеного + аустеніт залишкового?
159. Яка з двох сталей У7 чи У8 більш м'яка після відпалу?
160. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
161. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
162. На якій лінії діаграми стану Fe – С лежать критичні точки  $A_{c3}$ ?

163. Яка структура Сталі У12А після низького відпускання?
164. Яка структура Сталі У12А після середнього відпускання?
165. Яка структура Сталі У7 після відпалу?
166. Яка структура Сталі У7 після гартування?
167. З якої структурної складової утворюється сорбіт?
168. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі 70?
169. Яку назву має пересичений твердий розчин вуглецю у  $Fe_\alpha$ ?
170. Яка структура Сталі 40 після високого відпускання?
171. Яка структура Сталі У10 після середнього відпускання?
172. Яка структура Сталі У10 після високого відпускання?
173. З яким вмістом вуглецю у сталей після низького відпускання структура складається з мартенситу відпущеного + аустеніт залишкового + цементит надлишковий?
174. З яких фаз складається перліт?
175. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 40?
176. Яка з двох сталей У7 чи У8 більш тверда після відпала?
177. До якої температури треба нагрівати Сталь 45, щоб після відпалу отримати структуру ферит + перліт?
178. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
179. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
180. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
181. У яких з сталей Сталь 35; Сталь 50; Сталь У7; Сталь У8 після гартування більша кількість аустеніту залишкового?
182. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі У 10?
183. Яка структура Сталі 40 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
184. Яким методом визначається твердість загартованої сталі?
185. Яка структура Сталі 45 після високого відпускання?
186. Яка структура Сталі У12 після середнього відпускання?
187. Яка структура Сталі У12 після високого відпускання?
188. Як змінюються пластичні властивості сталей після низького відпускання?
189. Яка структура Сталі 30 після відпалу?
190. З яким вмістом вуглецю у сталей після відпалу структура складається з перліту + ферит?
191. Як змінюються пластичні властивості сталей після відпалу?
192. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 50?
193. Яка структура Сталі 20 після відпалу?
194. Яка структура Сталі 20 після нормалізації?
195. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при охолодженні сталі нижче  $A_{r1}$ ?
196. Яка з структур мартенсит; бейніт; цементит; тростит має найвищу твердість?
197. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі У12?
198. Яка структура Сталі 50 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
199. Як з структур найбільш тверда?
200. Яка структура Сталі 50 після високого відпускання?
201. Яка структура Сталі У13 після середнього відпускання?
202. Яка структура Сталі У13 після високого відпускання?

203. Як змінюються пластичні властивості сталей після середнього відпускання?
204. З яким вмістом вуглецю у сталей після відпалу структура складається з перліту?
205. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 60?
206. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 60?
207. Яка структура буде у Сталі У12 А після відпалу з температури вище  $A_{c1}$ ?
208. Яка структура Сталі 60 після високого відпускання?
209. Яка структура Сталі У10А після низького відпускання?
210. Яка структура Сталі У10 після відпалу?
211. Яка з структур найбільш пластична?
212. Чим пояснюється висока твердість мартенситу?
213. Яка структура Сталі 60 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?
214. На якій лінії лежать критичні точки  $A_{c1}$  діаграми стану?
215. Яка структура Сталі 55 після високого відпускання?
216. Яка структура Сталі У9А після середнього відпускання?
217. Яка структура Сталі У10А після високого відпускання?
218. Як змінюються пластичні властивості сталей після високого відпускання?
219. З яким вмістом вуглецю у сталей після відпалу структура складається з перліту + цементиту?
220. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 70?
221. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 70?
222. Яка структура буде у Сталі У12 А після нормалізації з температури вище  $A_{cm}$ ?
223. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
224. З якої структурної складової утворюється тростит?
225. У якій з структур твердість вища?
226. Які сталі не підлягають гартуванню?
227. До якої температури треба нагрівати Сталь 45, щоб після гартування отримати тільки мартенсит?
228. Для яких сталей можливо неповне гартування?
229. Яка швидкість охолодження сталей при гартуванні у мастилі?
230. Яка структура Сталі 60 після високого відпускання?
231. Яка структура Сталі У10А після середнього відпускання?
232. Яка структура Сталі У11А після високого відпускання?
233. До якої температури треба нагрівати Сталь 45, щоб після відпускання отримати тростит відпущений?
234. З яким вмістом вуглецю у сталей після нормалізації структура складається з перліту + ферит?
235. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У10А?
236. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У9?
237. Як визначається температура відпалу заевтектоїдної сталі?
238. Яка структура Сталі У9 після середнього відпускання?
239. Яка структура Сталі У9 після високого відпускання?
240. З яких фаз складається перліт?
241. З яких фаз складається сорбіт?
242. Яка з двох сталей У7 і У8 більш тверда після гартування?
243. Яка структура Сталі 70 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?

244. На якій лінії лежать критичні точки  $A_{c3}$  діаграми стану?
245. Яка структура Сталі 65 після високого відпускання?
246. Яка структура Сталі У11А після середнього відпускання?
247. Яка структура Сталі У12А після високого відпускання?
248. До якої температури треба нагрівати Сталь У12, щоб після відпускання отримати тростит відпущений?
249. З яким вмістом вуглецю у сталей після нормалізації структура складається з перліту?
250. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У12А?
251. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У10А?
252. Як визначається температура нормалізації заевтектоїдної сталі?
253. Яка структура Сталі У7 після середнього відпускання?
254. Яка структура Сталі У9 після високого відпускання?
255. Яка структура Сталі У10А після середнього відпускання?
256. З яких фаз складається тростит?
257. До якої температури треба нагрівати Сталь У8, щоб після гартування отримати крупногільчатий мартенсит?
258. На якій лінії лежать критичні точки  $A_{c_m}$  діаграми стану?
259. У якій з сталей Сталь 20; Сталь 40; Сталь 60; Сталь 80 температура  $M_p$  вища?
260. Яка структура Сталі 70 після високого відпускання?
261. Яка структура Сталі У12А після середнього відпускання?
262. Яка структура Сталі У13А після високого відпускання?
263. Чому дорівнює температурний інтервал відпускнуї крихкості другого роду?
264. З яким вмістом вуглецю у сталей після нормалізації структура складається з перліту + цементит?
265. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У9?
266. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У10А?
267. Як визначається температура відпалу доевтектоїдної сталі?
268. Яка структура Сталі У11 після низького відпускання?
269. Яка структура Сталі У9 після середнього відпускання?
270. Яка структура Сталі У7 після високого відпускання?
271. Як змінюються пластичні властивості сталей після гартування?
272. До якої температури треба нагрівати Сталь 35, щоб після гартування отримати тільки мартенсит?
273. Яку алотропічну форму має мартенсит?
274. Яка швидкість охолодження сталі при гартуванні у воді?
275. Яка структура Сталі 80 після високого відпускання?
276. Яка структура Сталі У13А після середнього відпускання?
277. Яка структура Сталі У9А після високого відпускання?
278. У яких з сталей після низького відпускання більша кількість аустеніту залишкового?
279. Що відбувається у аустеніті в процесі витримки його при відпалі?
280. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У11?
281. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У11?
282. Як визначається температура нормалізації доевтектоїдної сталі?
283. Яка структура Сталі У10 після низького відпускання?

284. Яка структура Сталі У9 після середнього відпускання?
285. Яка структура Сталі У11 після високого відпускання?
286. Яка термічна операція потрібна після гартування сталі?
287. З яким вмістом вуглецю у сталі можна отримати після гартування мартенсит і цементит?
288. Що змінюється при гартуванні сталі?
289. При якій швидкості охолодження після гартування утворюється мартенсит?
290. При якому вмісті вуглецю у сталей можна отримати після низького відпускання мартенсит відпущений і цементит надлишковий?
291. Яка з структур найбільш тверда?
292. Яку алотропічну форму має мартенсит відпущений?
293. У яких сталях після низького відпускання кількість аустеніту залишкового найбільша?
294. Що відбувається у аустеніті в процесі витримки його при нормалізації?
295. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі У 13?
296. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі У12А?
297. Як визначається температура відпалу перлітної сталі?
298. Яка структура Сталі 70 після середнього відпускання?
299. Яка структура Сталі 50 після нормалізації?
300. Яке перетворення відбувається в евтектоїдній сталі при нагріванні вище  $A_{c1}$ ?
301. Яка критична точка використовується при гартуванні Сталі 40?
302. Скільки атомів заліза в елементарній просторовій ґратці мартенситу?
303. Як впливає аустеніт залишковий на загальну твердість загартованої сталі?
304. Яка з структур загартованої сталі має найвищу твердість?
305. Яка структура Сталі 40 після низького відпускання?
306. Які сталі не підлягають низькому відпусканню?
307. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 45?
308. До якої температури треба нагрівати Сталь У8, щоб після нормалізації отримати зернистий перліт?
309. Яка структура найбільш пластична?
310. Яка термічна операція потрібна після нормалізації ?
311. Яка структура утворюється в наслідок перетворення аустеніту при сталій температурі 700 °С?
312. Яка з структур має найвищу твердість?
313. Яка структура Сталі У7 після нормалізації?
314. Яка структура Сталі У11А після низького відпускання?
315. Яка структура Сталі 30 після гартування?
316. Як визначається температура гартування заевтектоїдної сталі?
317. Як впливає ферит на загальну твердість загартованої сталі?
318. Як залежить твердість загартованої сталі від збільшення вмісту вуглецю?
319. У якої з структур твердість вища?
320. Від чого залежить твердість загартованої сталі?
321. Яка структура Сталі 45 після низького відпускання?
322. Які сталі не підлягають середньому відпусканню?
323. З яким вмістом вуглецю у сталей після нормалізації структура перліт?
324. Яка критична точка використовується при відпалі Сталі 60?

325. Яка критична точка використовується при нормалізації Сталі 60?
326. Як змінюються пластичні властивості сталей після відпалу?
327. Яким методом визначається твердість відпаленої сталі?
328. Яка структура Сталі 50 після гартування?
329. З яких фаз складається сорбіт?
330. Яка структура Сталі 75 після гартування з температури між  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ ?

## *Зміст*

Вступ.....	3
1. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 0. „Дослідження впливу температури нагрівання на... механічні властивості сталі ”.....	4
2. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1. „Гартування сталі ”.....	10
3. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2. „Відпускання загартованої сталі та його вплив на ударну в'язкість сталі ”.....	18
4. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3. „Відпал і нормалізація вуглецевих сталей”.....	28
5. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4. „Вивчення мікроструктури та властивостей термічно оброблених сталей”.....	36
6. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5. „Визначення прогартуваності сталей методом торцевого гартування ”.....	43
Контрольні питання для захисту модуля: “Термічна обробка”.....	49



Навчальне видання

# **КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

## **Модуль №2 «Термічна обробка»**

**Методичні рекомендації**

**Укладач: Полянський Павло Миколайович**

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 3,75.

Тираж 50. Зам. № \_\_\_\_.

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету.  
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013 р.