

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НУ «Запорізька політехніка»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт із дисципліни “Термічна  
обробка” (частина друга – “Технологія термічної обробки”)  
для студентів спеціальності  
132 “Матеріалознавство”  
усіх форм навчання

2022

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни “Термічна обробка” (частина друга – “Технологія термічної обробки”) для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство” усіх форм навчання /Укл.: І.М. Лазечний, В.Я. Грабовський, Ю.І. Кононенко, О.В. Лисиця, Д.А. Андріяненко. Комп’ютерна графіка Лисиця О.В., Трикоз Г.Г. – Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка» 2022. - 86 с.

Укладачі: І.М. Лазечний, к.т.н., доцент  
В.Я. Грабовський, к.т.н., доцент  
Ю.І. Кононенко, старш. викладач  
О.В. Лисиця, старш. викладач  
Д.А. Андріяненко, зав. лабораторією

Рецензент: О.В. Климов, к.т.н., доцент

Відповідальний  
за випуск: В.Ю. Ольшанецький, д.т.н., професор

Рекомендовано  
до видання НМК інженерно-  
фізичного факультету  
Протокол № 1  
від “13” вересня 2022 р.

Затверджено  
на засіданні кафедри ФМ  
Протокол № 1  
від «31» серпня 2022 р.

**ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b> .....	<b>4</b>
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1</b> .....	<b>5</b>
Термічна обробка чавунів	
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2</b> .....	<b>16</b>
Відпалення сталі	
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3</b> .....	<b>37</b>
Прогартуваність сталі	
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4</b> .....	<b>50</b>
Характеристика та вибір гартівних середовищ	
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5</b> .....	<b>66</b>
Азотування та алітування сталі	
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6</b> .....	<b>777</b>
Визначення основних параметрів технології термічної обробки виробів	
<b>ЛІТЕРАТУРА</b> .....	<b>855</b>
<b>Додаток А Правила техніки безпеки</b> .....	<b>866</b>

## ВСТУП

Методичні вказівки призначені допомогти студентам спеціальності 132 «Матеріалознавство» підготуватись та успішно виконати і захистити лабораторні роботи із дисципліни “Термічна обробка”. Дисципліна складається із двох тісно зв’язаних між собою частин: перша – “Теорія термічної обробки”, друга – “Технологія термічної обробки”.

Термічна (хіміко-термічна) обробка відіграє суттєву роль в технології виготовлення виробів і в багатьох випадках без її використання неможливе забезпечення конструкційної міцності, експлуатаційних властивостей, високих показників надійності та довговічності виробів.

Мета лабораторних робіт – поглибити та закріпити теоретичні знання, отримані при вивченні теорії термічної обробки; вивчити основи технології термічної обробки; навчитись використовувати знання, отримані при вивченні дисциплін “Металознавство”, “Машинобудівні матеріали”; навчитись призначати технологію термічної обробки конкретних виробів; розвивати здібності у виконанні досліджень, обробці, узагальненні та науковому аналізі отриманих результатів; розвивати навички роботи із лабораторним обладнанням та приладами.

При формуванні переліку лабораторних робіт враховані ідеї щодо їх змісту і суті, надані Бабицькою Г.М. та Ковалем А.Д. Укладачі методичних вказівок ці ідеї із вдячністю використали.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### Термічна обробка чавунів

**Мета роботи** - ознайомитись з практикою термічної обробки чавунів; вивчити види та призначення термічної обробки чавунів; дослідити вплив температури гартування на структуру і твердість ферито-перлітного чавуну, а також вплив часу нагрівання на структуру та твердість чавуну після нормалізації.

#### Загальні відомості

Сплави заліза з вуглецем (більше 2,14 %) та кремнієм (більше 1 %) називаються чавунами. Чавун не піддається ні холодній, ні гарячій пластичній деформації і тому вироби з чавуну можна виготовляти тільки литтям. В сучасному машинобудуванні виливки можуть складати 40...90 % загальної маси машин, металорізальних верстатів, прокатних станів тощо.

Для виготовлення деталей машин використовують сірі, ковкі та високоміцні чавуни. Загальною структурною ознакою цих залізобуглецевих сплавів є те, що металева основа (перлітна, ферито-перлітна, феритна) в них послаблена наявністю графітних включень. Вплив графіту на механічні властивості чавуну визначається кількістю та формою виділень. Оскільки графітна фаза м'яка (3...5 HB), крихка і має практично нульову міцність, то в металевій основі чавунів вона відіграє роль надрізів, тобто концентраторів напружень. У зв'язку з цим сірі чавуни, у котрих графіт має пластинчасту будову, характеризуються найбільш низькими властивостями міцності (пластичності практично нема) порівняно з чавунами ковкими (графіт пластівчастий) та високоміцними (графіт кулевидний), оскільки компактні виділення графіту, форма яких наближається до кулі, призводять до мінімальної концентрації напружень в металевій основі чавуну.

Чавуни піддають наступним видам термічної обробки: відпаленню, нормалізації, гартуванню та відпусканню. Застосовують також такі види хіміко-термічної обробки, як азотування та хромовання.

Застосування сучасних методів термічної та хіміко-термічної обробки для відливок із сірого чавуну підвищеної міцності (з дрібними завихреними пластинками графіту), модифікованого та

легованого чавунів дозволяють поліпшити властивості чавунів та розширити області використання виливок, а також в багатьох випадках замінити більш коштовні вироби зі сталі чавунними.

Кількість, форма, розміри і розподіл графітних включень в чавунах залежать як від хімічного складу, так і від багатьох металургійних факторів і формуються під час розливання та кристалізації чавуну.

Термічна обробка змінює структуру та властивості металевої основи чавуну, що відповідним чином впливає на формування властивостей виливок.

В залежності від складу чавуну, умов литва і призначення виробу термічну обробку здійснюють з метою:

- а) зняття внутрішніх напружень та запобігання коробленню при механічній обробці і експлуатації;
- б) зниження твердості виливок і поліпшення оброблення різанням завдяки графітизації у відбіленому шарі або у всьому об'ємі;
- в) підвищення міцності та зносостійкості відливок.

#### **Відпалення для зняття внутрішніх напружень**

Внаслідок графітизації, що викликає різке збільшення об'єму відливок за рахунок розчинення цементиту та появи графіту  $\{Fe_3C=Fe+C(I)\}$ , внутрішні ливарні напруження у відливках можуть досягати значного рівня навіть при повільному охолодженні у формах. Особливо високі напруження виникають у різнотовщинних відливках, в котрих утворюється різноманітна структура і які схильні до хімічної неоднорідності. Внутрішні напруження у відливках викликають короблення, а іноді тріщини, які можуть виникати, зокрема, у процесі механічного оброблення.

Для зняття внутрішніх напружень застосовують відпалення при температурах 500...550°C; час витримки при цій температурі повинен дорівнювати 6...8 годин. Нагрівання відливок зазвичай виконують уповільнено, в залежності від складності форми та напружень у структурі зі швидкістю 30...150°C/год. Охолоджують відливки з піччю також уповільнено зі швидкістю 10...30°C/год. до 300...400°C. При підвищенні температури відпалення внутрішні напруження суттєво знижуються при меншій витримці, але при температурах вище 550°C починає активно розвиватись графітизація, тобто відбувається

розчинення евтектоїдного цементиту. Зменшення кількості зв'язаного вуглецю призводить до зниження твердості, міцності та зносостійкості чавуну.

У відливках з неоднорідною структурою, що складається з трооститу, мартенситу та залишкового аустеніту, у процесі відпалення, окрім зняття напружень, відбувається коагуляція та сфероїдизація карбідної фази, структура металевіт основи стає однорідною у всьому об'ємі і утворюється сорбіт. Внаслідок цього значно покращуються механічні властивості відливок, тобто зменшується ламкість, а твердість стає однаковою по всьому перетину.

### **Відпалення для усунення відбілення у відливках**

Відбілення - це утворення на поверхні вилівок структури білого чавуну, яка характеризується тим, що увесь вуглець знаходиться у зв'язаному стані, тобто у цементиті (карбідах). Відбілення зазвичай виникає у тих частинах відливка, які більш швидко охолоджуються: у тонких перетинах та на поверхні, наприклад, при литті у металеві форми). У зв'язку з цим підвищується твердість, зростає крихкість та різко погіршується оброблення різанням.

Для усунення відбілення застосовують відпалення при температурах 850...950°C. Витримка за таких температур повинна бути у межах 0,5...5 годин в залежності від хімічного складу чавуну. Під час ізотермічної витримки біля 900°C відбувається процес графітизації (перша стадія, рис. 1.1). Механізм графітизації складається з розчинення цементиту вторинного (карбідів) у аустеніті до граничного насичення аустеніту вуглецем, а потім при охолодженні у виділенні з аустеніту вільного вуглецю у вигляді графіту пояснюється підвищеним вмістом в чавунах кремнію у кількості 1,5...3 %, який сприяє графітизації. Після завершення витримки відливки з сірого чавуну охолоджують зі швидкістю 200°C/год. до 500°C, а потім на повітрі. Відливки з легованих чавунів, в залежності від ступеню стійкості аустеніту, охолоджують більш уповільнено зі швидкістю 10...50°C/год. Для хромонікелевих та хромомарганцевих чавунів з більшою стійкістю переохолодженого аустеніту застосовують ізотермічне відпалення для перетворення аустеніту у перліт, зниження твердості та поліпшення оброблення різанням.

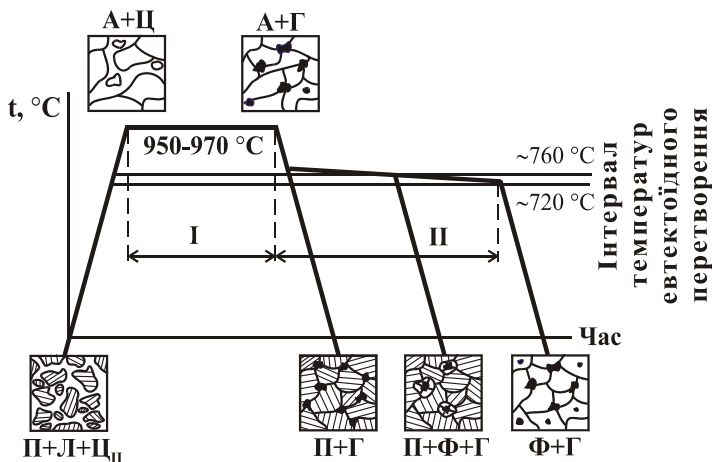


Рисунок 1.1 – Графік графітизаційного відпалення

### Нормалізація відливок

Усунення відбілення та зменшення твердості відливок із сірих чавунів також успішно досягається при нормалізації. Нормалізація економічно більш вигідна, але застосовують її для відливок порівняно простої конфігурації. Режим нормалізації: нагрівання 900...950°C, витримка 30...40 хвилин, що достатньо для нелегованого чавуну, і охолодження на повітрі. Металева основа чавуну після нормалізації утворюється більш дисперсною, оскільки перетворення аустеніту, порівняно з відпаленням, відбувається при менших температурах за рахунок більш швидкого охолодження. З цієї причини кількість структурно вільного фериту у металевій основі значно зменшується. У зв'язку з цим нормалізація підвищує твердість та зносостійкість виливок. Нормалізацію застосовують для підвищення кількості зв'язаного вуглецю у структурі ферито-перлітного або феритного чавунів, тобто для підвищення в них перлітної складової. При температурах нормалізації 850...950°C відбувається часткове розчинення графіту, що призводить до насичення аустеніту вуглецем.

У випадку нормалізації чавуну з вихідною структурою фериту або фериту та перліту утворюється структура однорідного перліту або

сорбітоподібного перліту з підвищеними значеннями твердості та міцності.

### **Гартування та високотемпературне відпускання**

Гартуванню зазвичай піддають попередньо відпалені відливки невеликих розмірів з високоякісного перлітного, модифікованого або легованого чавунів з перлітною, ферито-перлітною і феритною металевою основами.

Внаслідок гартування з наступним відпусканням можна отримати у виробках структуру металевої основи у виді сорбіту або трооститу. При цьому, завдяки розчиненню при нагріванні у аустеніті деякої кількості графіту, можна збільшити у структурі відпущеного чавуну кількість зв'язаного вуглецю. Після гартування вуглець частково знаходиться у мартенситі, підвищує загартовуваність чавуну, а при наступному відпусканні він виділяється у виді цементиту, що входить до складу структур перлітного типу.

При гартуванні чавуну відбуваються структурні перетворення подібні тим, що спостерігаються при гартуванні сталі. Але завдяки присутності у чавуні включень графіту гартування чавунів має деякі особливості, а саме:

- гартування відбувається з двофазного аустенітно-графітного стану;
- при нагріванні відбувається часткове розчинення графіту у аустеніті, в зв'язку з чим, незважаючи на різну вхідну структуру чавуну (перлітну, перлітно-феритну, феритну), перетворенню при охолодженні піддається аустеніт із вмістом вуглецю, близьким до евтектоїдної концентрації;
- у зонах, віддалених від місць контакту аустеніту з графітом, що розчиняється, вміст вуглецю буде знижений;
- ліквіація вуглецю при нагріванні перед гартуванням повністю не зникає.

Гартування з відпусканням відливок з чавуну застосовують з метою підвищення їх міцності, твердості та зносостійкості. При гартуванні відливки нагрівають до температур, вище інтервалу температур евтектоїдного перетворення (рис. 1.2). Враховуючи це, температура гартування для чавунів знаходиться у інтервалі 820...950°C, при яких в рівновазі знаходяться аустеніт та графіт.

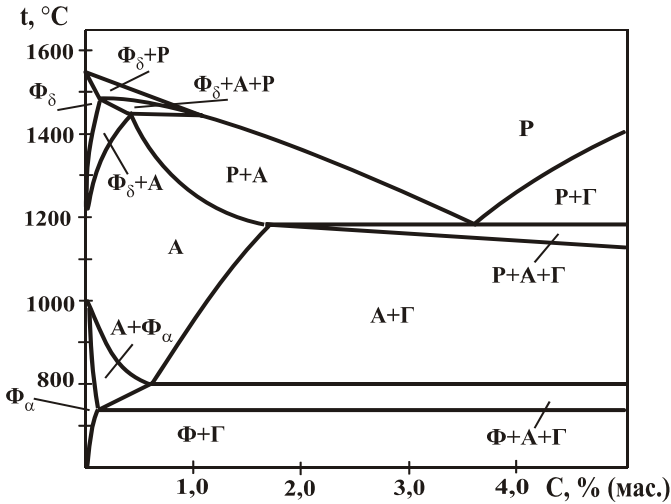


Рисунок 1.2 - Діаграма стану Fe-Si-C (~2 % Si)

Для перлітних чавунів температура гартування лежить вище евтектоїдного інтервалу на 40...60°C і складає 820...860°C. Гартування з таких температур забезпечує перехід в аустеніт вуглецю у кількості, близькій до евтектоїдної, надає чавуну добру загартовуваність і достатньо високу міцність після відпускання. Гартування перлітних чавунів з більш високих температур призводить до росту зерна аустеніту і більшого вмісту вуглецю у твердому розчині. Це сприяє одержанню у загартованому стані крупногочастого мартенситу та більшої кількості залишкового аустеніту і, як наслідок, зниженню твердості.

Чавун з ферито-перлітною та феритною матрицями нагрівають при гартуванні до більш високих температур для розчинення більшої кількості графіту і отримання після термічної обробки більш високих твердості та міцності. Для ферито-перлітних чавунів інтервал температур гартування - 850...900°C, для феритних - 880...950°C.

Тривалість витримки при температурі гартування тим більша, чим більше фериту та менше перліту у структурі чавуну. Відповідно цьому вона складає: для перлітного чавуну - 15...30 хвилин; для ферито-перлітного - 30...40 хвилин; для феритного - 1,5...2,0 години.

Охолодження відливок виконують у воді або олії в залежності від хімічного складу чавуну, розмірів та конфігурації виробів.

Твердість відливок після гартування вхідного перлітного або ферито-перлітного чавунів зазвичай знаходиться в межах 480...550 HB (50...56 HRC), феритного чавуну – близько 500 HB (52 HRC). Менша твердість чавунів після гартування порівняно зі сталлю пояснюється наявністю у чавуні графіту, що має низьку твердість (3...5 HB).

Відливки після гартування піддають відпусканню для отримання структур трооститу або сорбіту в залежності від необхідної твердості. Температура відпускання може бути 350...600°C, твердість - 250...400 HB (25...40 HRC).

Відливки з високоміцного чавуну складної конфігурації і тонкого перерізу (10...20 мм) для зниження напружень та зменшення деформації піддають ізотермічному гартуванню за режимами: нагрівання 830...900°C, витримка, охолодження у розплаві солей із температурою 250...400°C, а далі, після витримки, охолодження на повітрі.

Структура чавуну після ізотермічного гартування складається з бейніту, залишкового аустеніту та графіту. Твердість, міцність та зносостійкість ізотермічно загартованого чавуну вище порівняно з властивостями чавуну після поліпшення (гартування та високотемпературного відпускання) зі структурою трооститу або сорбіту. Крім того, при ізотермічному гартуванні у відливках утворюються менші внутрішні напруження і внаслідок цього спостерігається менше жолоблення виробів.

### **Завдання на підготовку до лабораторної роботи**

Вивчити призначення на технологію гартування, відпускання, графітизаційного відпалення, відпалення для зняття напружень, нормалізації чавунів. Звернути увагу на особливості фазового складу, структурних перетворень у чавунах, використати при цьому діаграму Fe-C-Si. Повторити визначення та властивості фаз у залізвуглецевих сплавах.

Підготувати табл. 1.1 та 1.2.

Питання теорії та практики термічної обробки чавунів вивчити із використанням літератури: [1] с. 174-180; [2] с. 204-206; [3] с. 147-155; [4] с. 196-198 [6] с. 228-243; [8] с. 193-203.

### Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Сірі модифіковані чавуни, високоміцні та ковкі чавуни, їх структурні особливості та властивості.
2. Види та цілі термічної обробки чавунів.
3. Що має змінити термічна обробка чавунів - будову графітних включень чи структуру металевої основи ?
4. Відпалення для зняття внутрішніх напружень відливок, його режим. Які структурні перетворення можливі у процесі такого відпалення ?
5. Що називають відбіленням чавуну ? У чому проявляється негативний вплив відбілення на властивості чавуну ?
6. Режим відпалення для усунення відбілення у чавунах, головні структурні перетворення, що відбуваються при цьому відпаленні.
7. Нормалізація відливок з чавуну, цілі та режими нормалізації.
8. Гартування чавунів, його цілі та головні особливості.
9. Користуючись діаграмою *Fe-C-Si (~2% Si)* пояснити, які структурні перетворення відбуваються у сірому чавуні при нагріванні 650...1000°C (у кожній позначеній температурній точці).
10. Які температури гартування є оптимальними для перлітного, ферито-перлітного та феритного чавунів ? Що визначає вибір температур гартування для вказаних чавунів ?
11. В яких межах знаходиться твердість загартованих чавунів ? Чому значення твердості для загартованих чавунів нижче, ніж у сталі з евтектоїдним вмістом вуглецю ?
12. Яке відпускання використовують для загартованих відливок з чавуну ? Режим відпускання, структура та властивості чавуну після відпускання.
13. Ізотермічне гартування чавунів, його режим та переваги перед гартуванням у воді (олії).

### Матеріали, прилади, інструменти та обладнання

Термічні електричні печі, твердомір типу ТК-2, гартувальний бак з водою, наждачний верстат для зачищення зразків, шліфувальний та полірувальний верстати для виготовлення мікрошліфів, 4 %-ний розчин азотної кислоти у етиловому спирті для виявлення

мікроструктури чавунів, металографічні мікроскопи ММ-7 для дослідження мікроструктури, зразки ковких ферито-перлітних чавунів - 11 штук.

### Вказівки з техніки безпеки

Загальні вимоги з техніки безпеки при виконанні лабораторної роботи – додаток А.

### Порядок виконання роботи

Заміряти твердість 1...2 зразків до гартування на приладі ТК-2 по шкалі HRB і отримані значення твердості занести у табл. 1.1.

Досліджувані зразки (6 шт.) загартувати з вказаних температур у воді, заміряти твердість кожного зразка після гартування (не менше трьох замірів на одному зразку) і середні значення твердості занести у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Твердість та мікроструктура зразків до та після гартування

Найменування чавуну	Твердість до гартування, HRB	нагрівання при гартуванні,	Температура гартування, °C	Твердість після гартування, HRC	Характеристика мікроструктури
		40	650		
			750		
			850		
			900		
			950		
			1000		

Досліджувані зразки (4 шт.) нормалізувати за режимами, вказаними в табл. 1.2. Заміряти твердість зразків після нормалізації і середні значення твердості занести у табл. 1.2. Приготувати мікрошліфи одного зразка чавуну до термічної обробки та всіх 10 зразків після термічної обробки, дослідити їх мікроструктуру, для кожного зразка дати коротку характеристику мікроструктури (структурні складові, їх кількісне співвідношення при візуальному

визначенні на площині мікрошліфа) та занести отримані дані у таблиці.

Таблиця 1.2 - Твердість та мікроструктура зразків після нормалізації

Найменування чавуну	Твердість до нормалізації, HRB	Температура нормалізації та умови охолодження	Час нагрівання, хвилин	Твердість після нормалізації, HRC	Характеристика мікроструктури
		900°C, повітря	15		
			45		

### Зміст звіту

Коротко описати види та мету термічної обробки чавунів, вказати з яких міркувань підходять до вибору оптимальної температури гартування (або нормалізації) для перлітного або ферито-перлітного чавунів.

Зарисувати діаграму *Fe-C-Si* (~2%), провести на діаграмі лінію, що відповідає хімічному складу чавуна з 2,5-3,0 % C. На лінії сплаву позначити точками ( $t_1, t_2, \dots, t_6$ ) досліджувані температури гартування.

За отриманими експериментальними даними твердості побудувати графіки залежності "*Твердість (HRC) - температура гартування*" та "*Твердість (HRB) - тривалість витримки*" (нормалізація 900°C). За результатами виконаних досліджень зробити висновки щодо впливу температури гартування на структуру та властивості дослідженого чавуну, а також впливу часу нагрівання на структуру та твердість чавуну після нормалізації (900°C). Необхідно розкрити сутність перетворень, що відбуваються при підвищених температурах нагрівання при гартуванні та при збільшенні часу витримки чавуну при нагріванні 900°C і нормалізації.

Зарисувати мікроструктуру чавуну до термічної обробки, позначити структурні складові.

За отриманими результатами досліджень структури та твердості вибрати оптимальні режими гартування та нормалізації для дослідженого чавуну. Мікроструктуру зразків, що відповідають оптимальному режиму, зарисувати, позначити структурні складові і дати характеристику з точки зору відповідності отриманих структур вимогам, що висуваються до гартування та нормалізації чавунів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Відпалення сталі

**Мета роботи** - ознайомитись з практикою відпалення II роду (з фазовою перекристалізацією); вивчити призначення та режими різних видів відпалення, а також встановити їх вплив на зміну структури і твердості перегрітої доєвтектоїдної сталі та гарячедеформованої заєвтектоїдної сталі.

### Загальні відомості

**Відпаленням II роду** називають операцію термічної обробки, при якій заготовки зі сталі нагрівають вище критичних точок  $A_{c1}$  або  $A_{c3}$ , витримують при цих температурах для завершення фазової перекристалізації, а потім охолоджують уповільнено з піччю для отримання рівновагової структури та зниження твердості.

У технологічному процесі виготовлення металевих виробів відпалення являє собою попередню операцію термічної обробки і застосовується для виливок, поковок, штамповок та прокату перед їх механічним обробленням різанням або тиском.

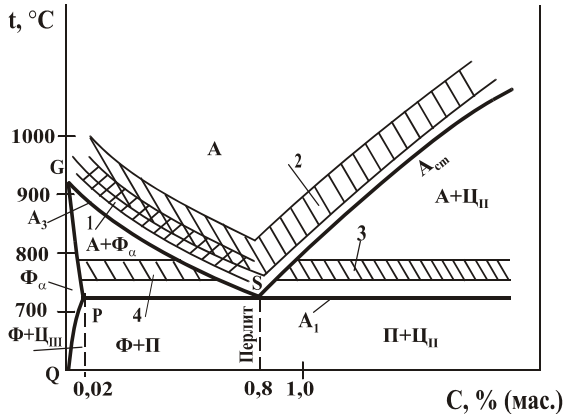
В залежності від температури нагрівання заготовок розрізняють наступні 4 види відпалення, які позначені на рис. 2.1 відповідними смугами.

Мета відпалення полягає в наступному:

- зменшити твердість виливок та заготовок після гарячої пластичної деформації (поковок, штамповок, прокату) перед їх наступною обробкою різанням (токарною, фрезерною, свердлінням та інше);

- усунути недоліки структури від попередньої гарячої обробки металу (лиття, гарячої деформації, зварювання), тобто зняти напруження, подрібнити зерно аустеніту, зменшити структурну неоднорідність та забезпечити виділення надлишкових фаз фериту і цементиту у рівноваговій формі;

- підготувати структуру до подальшої (основної) термічної обробки.



- 1 - повне відпалення для доєвтектоїдних сталей з нагріванням вище точки  $A_{c3}$  та наступним уповільненим охолодженням з піччю;
- 2 - відпалення нормалізаційне (нормалізація) з нагріванням для доєвтектоїдних сталей вище точки  $A_{c3}$ , а заєвтектоїдних сталей вище точки  $A_{cm}$  та наступним охолодженням на спокійному повітрі;
- 3 - неповне відпалення заєвтектоїдних сталей з нагріванням вище точки  $A_{c1}$  та охолодженням з піччю;
- 4 - неповне або сфероїдизаційне відпалення для доєвтектоїдних та заєвтектоїдних сталей з нагріванням вище точки  $A_{c1}$  та охолодженням з піччю.

Рисунок 2.1 - Температурний розподіл видів відпалення сталей на діаграмі  $Fe-Fe_3C$

Внаслідок подрібнення зерна, зняття внутрішніх напружень та зменшення структурної неоднорідності відпалення сприяє деякому підвищенню міцності, пластичності та в'язкості металу у порівнянні з відповідними характеристиками після лиття, кування, зварювання та прокатки. Тому відпалення в деяких випадках, наприклад, для багатьох крупних відливок, є кінцевою термічною обробкою, оскільки після нього у виробів практично відсутні залишкові напруження і деформація виробів незначна.

### Структура та властивості перегрітої сталі

Тривале нагрівання доєвтектоїдної та заєвтектоїдної сталей при температурах, що значно перебільшують точки  $A_{c3}$  або  $A_{c_{cm}}$ , призводить до утворення крупного дійсного зерна аустеніту, яке залишається в сталі після охолодження її до кімнатної температури. Таке нагрівання називають перегріванням сталі, якщо отримується надто велике дійсне зерно аустеніту в межах номерів 1...4 за шкалою ГОСТ 5639-82. Перегріта сталь характеризується крупнокристалічним зламом та зниженою в'язкістю.

Величина дійсного зерна аустеніту, що отримана при певній температурі нагрівання, визначається в доєвтектоїдній сталі за феритною сіткою (рис. 2.2, а), а в заєвтектоїдній сталі за сіткою цементиту (рис. 2.2, б) навколо перлітних колоній.

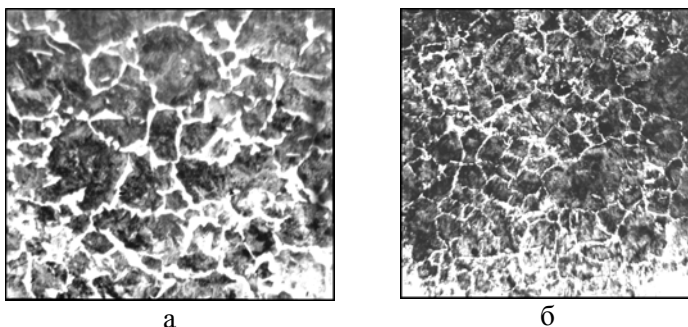


Рисунок 2.2 - Зерно аустеніту в доєвтектоїдній сталі 45 (а) та в заєвтектоїдній сталі У10 (б),  $\times 100$

Перегріта сталь характеризується так званою відманштеттовою структурою, тобто виділенням фериту в доєвтектоїдній сталі (рис. 2.3, а) або цементиту в заєвтектоїдній сталі (рис. 2.3, б), що мають голчасту будову.

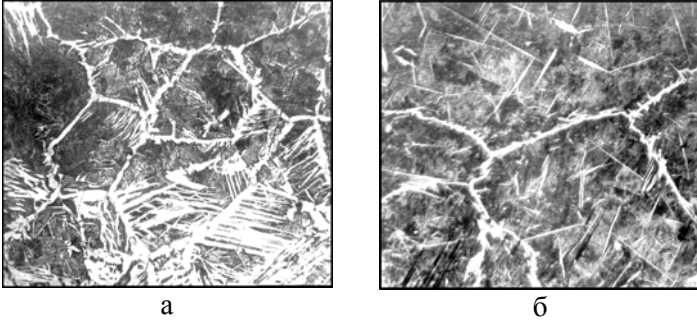


Рисунок 2.3 - Мікроструктура перегрітої сталі із відманштетговою структурою в доевтектоїдній (а) та заевтектоїдній (б) сталях,  $\times 100$

Відманштетгова структура виникає у випадку високої температури нагрівання та наступного пришвидшеного охолодження сталі до кімнатної температури на повітрі. Утворення фериту відбувається перетворенням аустеніту за механізмом зсуву в умовах дифузійного відведення атомів вуглецю.

Величина зерна аустеніту сталі не суттєво впливає на стандартний комплекс механічних властивостей при випробуванні на статичне розтягування ( $\sigma_B$ ;  $\sigma_{0,2}$ ;  $\delta$  та  $\psi$ ) та твердість. Однак з ростом зерна різко знижується ударна в'язкість, зменшується робота розповсюдження тріщини та підвищується поріг холодноламкості, тобто сталь стає крихкою. Крупнозернистість знижує конструкційну міцність, викликає крихкість в зонах біля концентраторів напружень. Окрім того, чим крупніше зерно, тим більше сталь схильна до гартівних тріщин та деформації у процесі гартування. Крихкість особливо значно проявляється у заготовках з відманштетговою структурою.

Твердість перегрітої сталі, що охолоджена від високих температур на повітрі, підвищена порівняно з рівновагим станом, тобто після охолодження з піччю. Підвищення твердості тим більше, чим з більшою швидкістю відбувається охолодження заготовок. У випадку пришвидшеного охолодження перетворення аустеніту відбувається зі значним переохолодженням нижче критичної точки  $A_1$ ,

що сприяє утворенню структури ферито-цементитної суміші з підвищеною дисперсністю типу сорбіту або трооститу.

Процес перетворення аустеніту з різним переохолодженням відображено на діаграмі ізотермічного перетворення аустеніту сталі 45 (рис. 2.4).

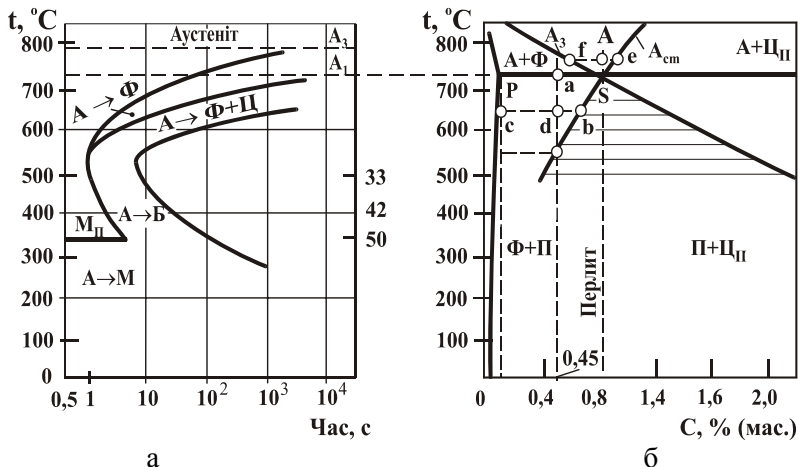


Рисунок 2.4 - Діаграма ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту сталі з 0,45 % С (а) та частина діаграми стану  $Fe-Fe_3C$  (б)

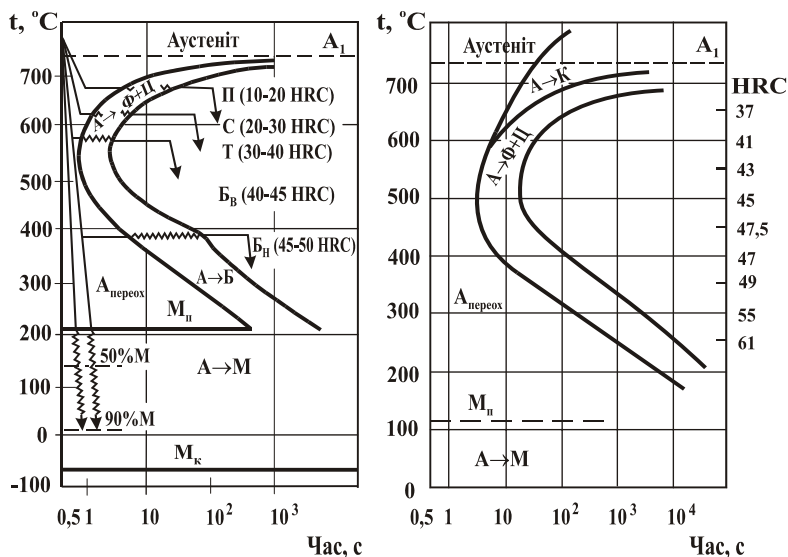
Початок виділення надлишкового фериту на діаграмі ізотермічного перетворення аустеніту визначається кривою між температурними точками  $A_3$  і  $A_1$  та нижче  $A_1$  на рис. 2.4, а. Кількість надлишкового фериту в доевтектоїдних сталях або цементиту (в заевтектоїдних сталях), зменшується з пониженням температури і при деякому переохолодженні розпад починається безпосередньо з утворення зародків евтектоїду або точніше, квазіевтектоїду, тобто структури евтектоїдного типу, але іншого складу, ніж перліт (евтектоїд).

При температурі 727°C (рівновагова точка  $A_1$ ) кількість фериту в доевтектоїдній сталі 45 визначається співвідношенням відрізків  $aS/PS$ . При переохолодженні приблизно до 650°C кількість надлишкового фериту стане меншою і відобразиться співвідношенням

*bd/cb*. При температурі біля 550°C кількість надлишкового фериту буде дорівнювати нулю.

У заштрихованому трикутнику (див. рис. 2.4, б) надлишкові фази (ферит або цементит) із аустеніту виділятися не будуть, а буде утворюватися квазіевтектоїд. Оскільки з пониженням температури кількість надлишкового фериту (цементиту), що виділяється, зменшується, то квазіевтектоїд, сорбіт або троостит у доевтектоїдних сталях містить вуглецю менше 0,8 %, а у заевтектоїдних більше 0,8 %. Конкретно в сталі 45 утворюється однорідна структура квазіевтектоїду, що містить вуглецю 0,45 % С.

Збільшення вмісту вуглецю у сталі призводить до збільшення кількості цементиту у квазіевтектоїді, що суттєво підвищує його твердість (див. рис. 2.4, а та рис. 2.5).



а

б

Рисунок 2.5 - Діаграми ізотермічного перетворення аустеніту евтектоїдної сталі із 0,8 % С (а) та заевтектоїдної сталі із 1,3 % С (б) (HRC позначає твердість продуктів перетворення аустеніту)

З рис. 2.4 та 2.5 видно, що ізотермічне перетворення аустеніту при 500...550°C відбувається з утворенням квазіевтектоїду. Твердість

квасієвтектоїду доєвтектоїдної сталі відповідає 33 HRC, евтектоїдної - 40 HRC, а заєвтектоїдної - 45 HRC.

Таким чином, при нерівноваговому перетворенні аустеніту утворюється переважно перлітна складова, що являє собою досить дисперсну суміш фериту та карбідів і надає сталі підвищену твердість.

Виходячи з викладеного можна зробити висновок, що особливістю перегрітої та швидко охолодженої сталі є крупнозернистість структури, підвищена твердість та крихкість. Тому головним завданням відпалення є подрібнення зерна аустеніту, зняття напружень, зниження твердості та крихкості, поліпшення оброблення різанням заготовок та підготовка структури до кінцевої термічної обробки.

### Подрібнення зерна аустеніту при відпаленні сталей

Зерно в сталі подрібнюється у процесі перетворення перліту у аустеніт. Утворення аустеніту при нагріванні є дифузійним процесом і відповідає головним положенням теорії кристалізації: відбувається зародження центрів аустеніту і їх ріст. Оскільки у перліті виникає зазвичай багато зародків, то після завершення перетворення утворюється дрібне зерно аустеніту і якщо сталь після завершення перетворення піддати охолодженню, то таким воно залишиться при кімнатній температурі.

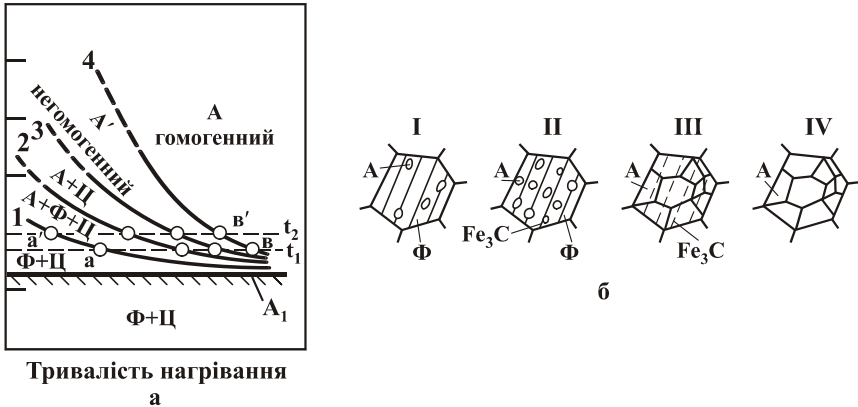
Розглянемо перетворення ферито-цементитної суміші (перліту) у аустеніт на прикладі евтектоїдної сталі, що відображено на рис. 2.6.

При нагріванні евтектоїдної сталі (0,8 % C) трохи вище критичної точки  $A_1$  (727°C) перліт (ферито-цементитна суміш) перетворюється у аустеніт. Перетворення складається з двох процесів: поліморфного  $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходу та розчинення у аустеніті цементиту:



Аустеніт при температурах трохи вище  $A_1$  містить 0,8% C. Утворення зародків аустеніту з таким вмістом вуглецю можливо завдяки флуктуаціям концентрації вуглецю у фериті. Зародки аустеніту утворюються на межах розділу фериту та цементиту (рис. 2.6, б), де наявність дефектів зменшує роботу їх утворення і більша вірогідність флуктуаційного виникнення у фериті ділянок критичного розміру з вмістом  $\sim 0,8$  % C. Утворений зародок аустеніту неоднорідний за вмістом вуглецю. В ділянках біля цементиту концентрація вуглецю у аустеніті вища (точка е на рис. 2.4, б). Під

впливом такого перепаду концентрацій відбувається дифузія атомів вуглецю у аустеніт в напрямку від межі з цементитом до ділянок, що межують з феритом. Це призводить до порушення рівноваги на міжфазних поверхнях поміж аустенітом та вказаними фазами. Встановлення рівноваги досягається за рахунок подальшого розчинення цементиту у аустеніті та переходу атомів вуглецю у ферит, що полегшує його перетворення у аустеніт.



- а - схема ізотермічного утворення аустеніту: 1 - початок перетворення перліту у аустеніт; 2 - кінець перетворення перліту у аустеніт; 3 - повне розчинення карбідів перліту у аустеніті; 4 - завершення гомогенізації аустеніту ( $A'$  - аустеніт негомогенний,  $A$  - аустеніт гомогенний);
- б - поступові стадії перетворення перліту в аустеніт.

Рисунок 2.6 - Перетворення ферито-цементитної структури у аустеніт при нагріванні евтектоїдної сталі

Після зникнення меж між феритом та цементитом, де переважно зароджується аустеніт, спостерігається тільки ріст зерен аустеніту без виникнення нових зародків аустеніту. Зростання ділянок аустеніту внаслідок поліморфного  $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення відбувається швидше, ніж розчинення цементиту, тому після перетворення фериту у аустеніт у структурі сталі зберігається ще деяка кількість цементиту (рис. 2.6, б) і для його розчинення у аустеніті тривалість ізотермічної витримки повинна бути збільшена. Утворений внаслідок викладених

перетворень аустеніт неоднорідний за складом і для його гомогенізації потрібний ще додатковий час.

Як можна бачити із діаграми ізотермічного утворення аустеніту (рис. 2.6, а), процес перетворення перлиту у аустеніт різко інтенсифікується з підвищенням температури. Це пояснюється з одного боку пришвидшенням дифузійних процесів, а з іншого - збільшенням градієнту концентрації вуглецю у аустеніті.

При нагріванні доевтектоїдної або заевтектоїдної сталей процес аустенітизації ускладнюється перетворенням структурно-вільного фериту у аустеніті або розчиненням надлишкового цементиту. При цьому у доевтектоїдній сталі зародки аустеніту можуть виникати на межах феритних зерен (феритної сітки). В такому випадку дифузія вуглецю вздовж міжфазної межі полегшує розчинення цементиту у фериті, що призводить до перетворення фериту у аустеніт.

Чим більше у сталі вуглецю, тим швидше відбувається аустенітизація, що пояснюється збільшенням кількості цементиту, а, отже, і зростанням сумарної поверхні розділу між феритом та цементитом, де виникають зародки.

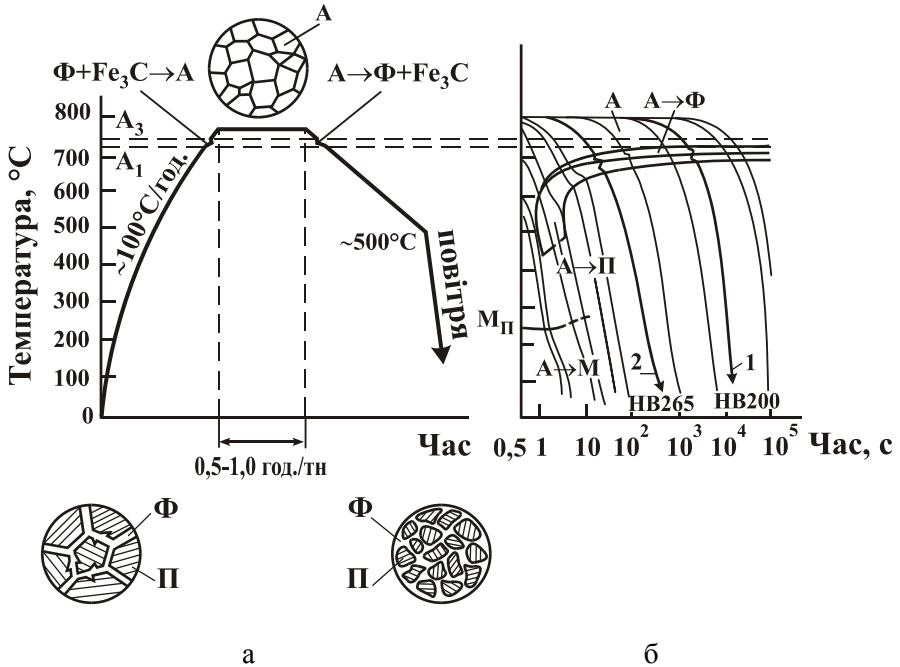
Швидкість перетворення ферито-цементитної структури у аустеніт, окрім температури нагрівання та кількості цементиту, залежить також від її вхідного стану. Чим дисперсніші пластини фериту та цементиту, тим більше виникає зародків аустеніту та менше шляхи дифузії, внаслідок чого швидше відбувається процес аустенітизації та утворюється більш дрібне зерно аустеніту.

Введення у сталь карбідоутворювачів (Cr, Mo, W, V та інших) затримує процес аустенітизації внаслідок утворення легованого цементиту або спеціальних карбідів, які розчиняються у аустеніті при підвищених температурах. Процес гомогенізації аустеніту також потребує більше часу, оскільки дифузійна рухомість атомів легувальних елементів в ґратці  $\gamma$ -заліза значно менша, ніж вуглецю. Тому при відпаленні легованих сталей збільшується витримка для завершення усіх фазових перетворень.

### **Повне відпалення**

Таке відпалення застосовують для литих та гарячедеформованих заготовок із доевтектоїдних сталей (див. рис. 2.1). Воно полягає у нагріванні заготовок вище критичної точки  $A_{c3} + (30 \dots 50)^\circ\text{C}$ ,

витримці при цій температурі для повного прогрівання та завершення фазових перетворень і наступному уповільненому охолодженні з піччю для утворення структури фериту та перліту. Схему такого відпалення наведено на рис. 2.7.



а - схема режиму відпалення;

б - термкінетична діаграма перетворення переохолодженого аустеніту із вказаною швидкістю охолодження при відпаленні (1) і нормалізації (2)

Рисунок 2.7 - Схема повного відпалення доєвтектоїдної сталі

При нагріванні та витримці при заданій температурі у сталі відбувається перетворення перліту та надлишкового фериту у аустеніт. У зв'язку з тим, що кількість зародків аустеніту, що утворюються у вхідній структурі, завжди досить велика, то в результаті фазової перекристалізації зерно аустеніту буде дрібним.

Необхідність у проведенні такого відпалення для відливок обумовлена тим, що при кристалізації утворюються переважно крупні зерна аустеніту, що є передумовою формування при наступному охолодженні грубих колоній перліту та фериту у структурі сталі. В деяких випадках утворюється відманштеттова структура, де ферит має голчасту орієнтовану будову.

У гарячедеформованих заготовках (поковки, штамповки, прокат) крупнозернистість виникає, якщо температура закінчення деформації надто висока і зерно аустеніту після закінчення деформації встигає вирости.

Окрім крупнозернистості литі та гарячедеформовані заготовки мають підвищену твердість, оскільки при пришвидшеному охолодженні на повітрі утворюється нерівновагова структура сорбіту або трооститу квазіевтектоїдного типу.

Крупнозернистість та підвищені напруження, що викликані пришвидшеним охолодженням заготовок на повітрі від високих температур, знижують ударну в'язкість сталі. При наступному гартуванні ці дефекти можуть викликати деформацію виробів або навіть утворення тріщин. Для усереднення хімічного складу, тобто забезпечення гомогенізації аустеніту, необхідно збільшувати час витримки при нагріванні перед гартуванням.

Лише подвійна перекристалізація (при відпаленні, а потім при гартуванні) можуть забезпечити подрібнення зерна аустеніту у готовому виробі та достатні міцність і в'язкість сталі.

Таким чином, повне відпалення заготовок є необхідним як для отримання рівновагової структури перліту, так і для подрібнення зерна аустеніту. Це забезпечує добре оброблення заготовок різанням та високі експлуатаційні властивості готових виробів.

Загальний час перебування виробів в печі при відпаленні визначається за формулою:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_n + \tau_g + \tau_o,$$

де  $\tau_n$  - час нагрівання до заданої температури відпалення;

$\tau_g$  - час витримки при відпаленні;

$\tau_o$  – тривалість охолодження.

Час нагрівання до заданої температури залежить від перетину та конфігурації виробів, способу їх укладання в печі та легованості сталі. Чим складніша форма та більша маса виробів і більш легована сталь (що зменшує її теплопровідність), тим повільніше потрібно їх нагрівати для запобігання виникнення в них внутрішніх напружень, які можуть призвести до деформації або утворення тріщин.

На металургійних заводах для прутків круглого або квадратного перетинів (проста форма) швидкість нагрівання не обмежують і встановлюють її максимально можливою за тепловою потужністю печі (частіше 100°C/год.); тривалість витримки може коливатись від 0,5 до 1 години на 1 тону металу, що нагрівають (див. рис. 2.7). Час витримки зазвичай складає 25...30 % від часу нагрівання.

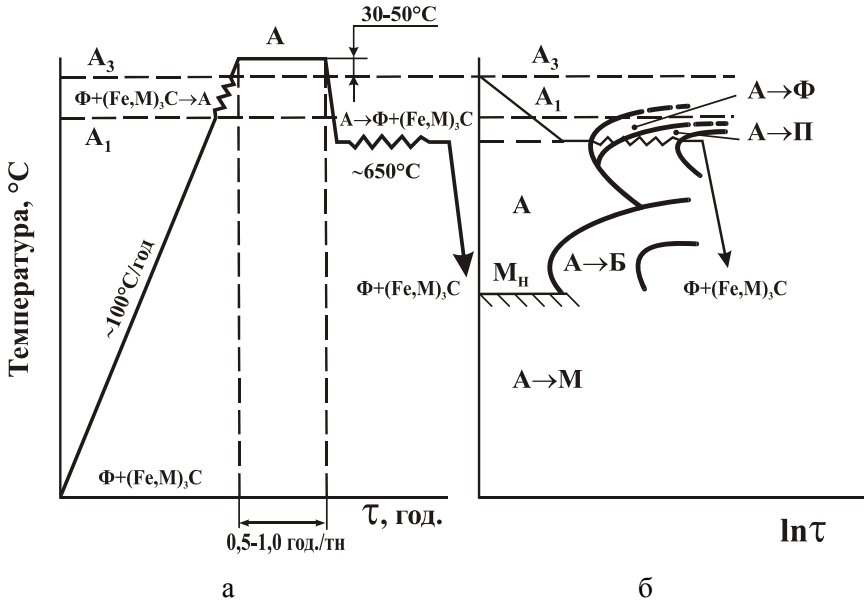
Швидкість охолодження при відпаленні залежить від стійкості переохолодженого аустеніту. Чим більш легована сталь та більша стійкість переохолодженого аустеніту, тим повільнішим повинно бути охолодження щоб забезпечити перетворення аустеніту на перліт, а не на сорбіт або троостит. У зв'язку з цим вироби з легованих сталей охолоджують значно повільніше ( $V_o=20...60$  °C/год.), ніж із вуглецевих ( $V_o=100...200$  °C/год.). Швидкість охолодження при відпаленні регулюється. Із піччю вироби охолоджуються до 500...600°C, а потім на повітрі. Тривалість охолодження у печі визначається за формулою:

$$\tau_o=(t_g-500)/V_o,$$

де  $t_g$  – температура відпалення.

### **Ізотермічне відпалення**

Це відпалення застосовують переважно для виробів із доевтектоїдних легованих марок сталей із значною стійкістю переохолодженого аустеніту. Нагрівання виконують вище критичної точки  $A_{c3}$ , потім швидко охолоджують (або переносять у другу піч) до температури, нижче точки  $A_{r1}$  (650...680°C). При цій температурі виконують ізотермічну витримку впродовж 3...6 год., яка потрібна для повного перетворення аустеніту на перліт. Після витримки виконують охолодження на повітрі (рис. 2.8).



а - графік відпалення;

б - діаграма ізотермічного перетворення аустеніту з кривою охолодження при ізотермічному відпаленні

Рисунок 2.8 - Схема ізотермічного відпалення

Переваги ізотермічного відпалення:

а) скорочується тривалість процесу для легованих сталей, які при повному відпаленні доводиться досить повільно охолоджувати із піччю;

б) утворюється більш однорідна ферито-перлітна структура у всьому перетині виробу (оскільки перетворення відбувається при постійній температурі), внаслідок чого забезпечується отримання однорідних властивостей у всьому об'ємі виробу.

### Відпалення нормалізаційне (нормалізація)

Цей вид термічної обробки застосовують для виробів із доєвтектоїдних та заєвтектоїдних сталей.

Нормалізація для виробів із доєвтектоїдних сталей полягає у нагріванні до температури, що перевищує точку  $A_{c3}$  на 40...50°C,

витримці для прогрівання садки та завершення фазових перетворень і наступному охолодженні на повітрі. Нормалізація забезпечує повну фазову перекристалізацію сталі та усуває крупнозернисту структуру, яка отримується у виливках, поковках, штампівках, прокаті.

Призначення нормалізації різне в залежності від хімічного складу сталі.

Для низьковуглецевих сталей із 0,1...0,3 % С нормалізацію застосовують замість повного відпалення. При нагріванні внаслідок фазової перекристалізації подрібнюється зерно аустеніту. Наступне пришвидшене охолодження на повітрі приводить до зміцнення сталі, підвищення її твердості внаслідок утворення у структурі більш дисперсної перлітної складової (квзіетектоїду). Це сприяє поліпшенню оброблення різанням маловуглецевих сталей з підвищеною кількістю фериту, оскільки при цьому зменшується налипання металу на різальний інструмент, полегшуються умови різання та поліпшується шорсткість.

Для відливок із середньовуглецевих сталей з 0,3...0,5 % С нормалізацію з високотемпературним відпусканням застосовують замість гартування та відпускання. В цьому випадку механічні властивості будуть дещо нижчі, але деталі будуть піддаватися меншому жолобленню порівняно із гартуванням. Вірогідність появи тріщин буде практично виключена, що особливо важливо для тонкостінних та складної конфігурації відливок.

Нормалізацію з наступним відпусканням (600...650°C) часто використовують для виправлення структури легованих сталей замість повного відпалення, оскільки тривалість цих двох операцій менша, ніж відпалення.

Нормалізація для заевтектоїдних сталей полягає у нагріванні до температури вище точки  $A_{cm}$  на 40...50°C, витримці та наступному пришвидшеному охолодженні на повітрі. Для високовуглецевих заевтектоїдних сталей нормалізацію застосовують для усунення цементитної (карбідної) сітки. Карбідна сітка утворюється при повільному охолодженні сталей в інтервалі критичних точок  $A_{r_{cm}} \dots A_{r1}$  внаслідок зменшення розчинності вуглецю у аустеніті з пониженням температури. Наявність суцільної карбідної сітки неприпустима, тому що різко зменшується в'язкість сталі.

Карбідна сітка утворюється у сортового прокаті інструментальних сталей після закінчення гарячої прокатки та наступного їх охолодження на спокійному повітрі. Для запобігання утворення сітки карбідів прокат належить охолоджувати на повітрі швидше, під вентилятором. Після нормалізації утворюється нерівновагова структура квазіевтектоїду з підвищеним вмістом вуглецю, яка має високу твердість. Кінцевою термообробкою для пом'якшення прокату є відпалення на зернистий перліт.

### **Неповне відпалення**

Таке відпалення застосовують для виробів із доевтектоїдних сталей. Нагрівають вироби вище критичної точки  $A_{c1}$ , але нижче  $A_{c3}$  з наступним охолодженням з піччю (рис. 2.1). При неповному відпаленні доевтектоїдних сталей відбувається часткова перекристалізація структури. Перліт повністю, а надлишковий ферит лише частково перетворюється у аустеніт. Тому неповне відпалення застосовують лише тоді, коли у вхідній структурі зерно дрібне, але вимагається знизити твердість сталі. Твердість литих та гарячедеформованих заготовок, що охолоджені на повітрі, зазвичай підвищена завдяки отриманню дисперсної ферито-цементитної суміші у перлітній складовій (сорбіті, трооститі).

Нагрівання заготовок вище точки  $A_{c1}$  та наступне охолодження з піччю забезпечує перетворення аустеніту на перліт, що знижує твердість та поліпшує оброблення їх різанням.

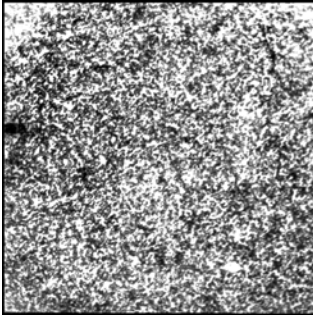
Неповне відпалення для конструкційних легованих сталей проводиться при температурі 750...770°C, з подальшим охолодженням із піччю зі швидкістю 30...60 °C/год. до 600°C, а потім на повітрі.

### **Сфероїдизаційне відпалення на зернистий перліт**

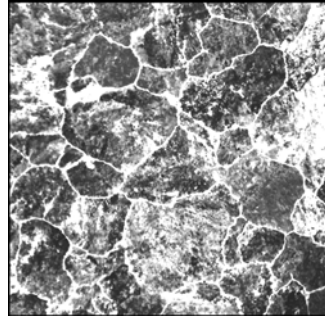
Це відпалення є неповним і застосовується для евтектоїдних та заевтектоїдних вуглецевих та легованих сталей. Нагрівання при такому відпаленні виконують вище критичної точки  $A_1$  на 10...30°C, що забезпечує практично повну перекристалізацію перліту у аустеніт.

Частинки цементиту (карбідів), що не розчинились при нагріванні та мікрооб'єми аустеніту з підвищеною концентрацією вуглецю (внаслідок недостатньо повної гомогенізації), являють собою безліч центрів зародження кристалів цементиту, що виділяються при

наступному охолодженні нижче точки  $A_1$  і приймають в цьому випадку зернисту форму (рис. 2.9, а). Якщо ж температура нагрівання перевищила вказані межі і відбулося розчинення значної кількості цементиту та пройшла більш повна гомогенізація аустеніту, то при охолодженні нижче точки  $A_1$  утворюються цементит пластинчастої форми та сітка цементиту (рис. 2.9, б). Така структура дефектна.



а



б

а - зернистий перліт;

б - пластинчастий перліт та цементитна сітка (температура відпалення завищена)

Рисунок 2.9 - Мікроструктура заевтектоїдної сталі після відпалення,  $\times 100$

Вказаний дефект можна виправити. Для цього заготовки треба нагріти вище критичної точки  $A_{cм}$  (для розчинення сітки) і охолоджувати на повітрі або у його струмені під вентилятором для попередження виділення цементиту по межах зерен аустеніту. Потім відпалення треба повторити.

Охолодження при сфероїдаційному відпаленні повільне. Воно повинне забезпечувати перетворення аустеніту на ферито-карбідну фазову суміш, сфероїдизацію та коагуляцію карбідів, що утворилися при охолодженні до 620...680°C. Частіше застосовують ізотермічне відпалення, яке потребує меншого часу. В такому випадку сталь повільно охолоджують (30...50°C/год.) до 620...680°C, потім роблять витримку при цій температурі впродовж 1...3 годин, що необхідно для

закінчення розпаду переохолодженого аустеніту та коагуляції карбідів. До 20°C вироби охолоджуються на повітрі.

Сталь із зернистим перлітом має більш низькі значення твердості та границі міцності і підвищену пластичність. Після відпалення на зернистий перліт евтектоїдна та заевтектоїдна сталі найкраще обробляються різанням, що робить можливим застосування більших швидкостей різання та досягнення низької шорсткості поверхні.

Окрім того, структура зернистого перліту при наступному гартуванні сталі забезпечує отримання дрібного та рівномірного зерна аустеніту, розширює інтервал температур гартування та зменшує схильність сталі до утворення тріщин. У результаті гартування утворюється дрібногочастий мартенсит з включеннями дисперсних рівномірно розподілених надлишкових карбідів, що підвищує зносостійкість інструменту.

### **Завдання на підготовку до лабораторної роботи**

Особливу увагу приділити вивченню теоретичних питань про рівновагові перетворення при нагріванні та охолодженні сплавів із поліморфними перетвореннями. Засвоїти сутність і призначення повного, неповного, сфероїдаційного відпалення, нормалізації. Знати причини виникнення таких дефектів структури, як відманштеттова структура, крупнозернистість, цементитна сітка, завищена твердість та технологічні методи їх усунення.

Підготувати табл. 2.1.

При підготовці до роботи скористатись літературою [1] с. 49-58; [2] с. 162-176; [3] с. 194-200; [4] с. 275-279; [6] с. 40-59; [7] с. 188-212; [9] с. 193-199; [10] с. 145-167.

### **Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовки студентів до роботи**

1. Що називають відпаленням II роду, його мета та призначення? Види відпалення та коротка їх характеристика.
2. У чому полягають особливості структури та властивостей перегрітої сталі?
3. Пояснити вплив швидкості охолодження на формування структури та властивостей у виливках та поковках сталі 45.

4. Що називається квазіевтектоїдом, умови його утворення, хімічний склад та властивості для доевтектоїдних та заевтектоїдних сталей ?
5. Пояснити механізм та кінетику перетворення  $P \rightarrow A$  при нагріванні сталей.
6. Чому при відпаленні виробів із легованих сталей збільшують час нагрівання та час витримки і зменшують швидкість охолодження порівняно з вуглецевими сталями ?
7. Повне відпалення, його призначення та характеристика параметрів (температури, часу нагрівання, витримки, швидкості охолодження).
8. Ізотермічне відпалення, його призначення та режими, переваги порівняно з повним відпаленням.
9. Нормалізація, її призначення та режими для доетектоїдних та заевтектоїдних сталей.
10. Неповне відпалення для доевтектоїдних сталей, його призначення та режими.
11. Сфероїдизаційне відпалення на зернистий перліт, його призначення та режими.
12. Яке порушення відбувається у режимі сфероїдизаційного відпалення, внаслідок якого після охолодження отримана структура пластинчастого перліту замість зернистого у заевтектоїдних сталях ?

### **Матеріали, інструменти, прилади та обладнання**

Термічні електричні печі; твердомір типу ТК-2; наждачний верстат для зачищення зразків; шліфувальні та полірувальні верстати для виготовлення мікрошліфів; 4 %-ний розчин азотної кислоти у етиловому спирті для виявлення мікроструктури сталі; металографічний мікроскоп МІМ-7 для дослідження мікроструктури; зразки сталі 45 (5 шт.) та сталі У12 (2 шт.).

### **Вказівки з техніки безпеки**

При виконанні лабораторної роботи дотримуватись правил безпеки, вказаних у додатку А.

### **Порядок виконання роботи**

Зразки сталі 45 (5 шт.) нагріти в печі при  $1100^{\circ}\text{C}$  впродовж 60 хв., а потім охолодити на повітрі. Після цього перегріті зразки сталі

45 у кількості 3 штук та 1 зразок сталі У12 після гарячої прокатки піддати відпаленню за режимами, наведеними у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Зміст та послідовність виконання роботи

Вид термічної обробки	Марка сталі, виділа обробка, кількість зразків	До термічної обробки		Режим термічної обробки	Після термічної обробки			
		HRC	Мікро та номер зерна		Твердість		Мікро, ×100 (зарисувати)	Номер зерна
					HRC	HV		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Підготовка зразків (перегрівання)	Сталь 45 (гарячекат.) 4 шт.			1100°C, 60хв., охолодж. на повітрі				
Повне відпалення	Сталь 45 (перегрів) 1шт			850°C, 30хв. охолод. з піччю до 600°C, повітря				
Нормалізація	"_ "_ "			850°C, 30хв., охолод. на повітрі				
Ізотермічне відпалення	"_ "_ "			950°C, 30хв., перенесен ня на 680°C, 30хв., охолод. на повітрі				

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ізотермічне відпалення	"—"—"			750°C, 30хв., перенесен ня на 680°C, 30хв., охолод. на повітрі				
Сфероїдизацій- не відпалення	Сталь У12 (гарячекат.) 1 шт.			Нагріван- ня 750°C, 30хв., охолод. 680°C, 30хв. (1р),				
				Нагріван- ня 750°C, 30хв., охолод. 680°C, 30хв., охолод. на повітрі (3р.)				

Всі зразки зачистити на наждачному верстаті і виміряти твердість на приладі ТК-2 за шкалою HRC (не менше трьох вимірів на одному зразку), середнє значення твердості занести у табл. 2.1.

Приготувати мікрошліфи, вивчити мікроструктуру сталі 45 після перегрівання та наступного відпалення (повного, ізотермічного) та нормалізації і зразків сталі У12 після гарячої прокатки та сфероїдизаційного відпалення. Дані про структури (структурні складові та номер зерна аустеніту) записати у табл. 2.1. Окремо зарисувати структури з позначенням структурних складових.

### Зміст звіту

Коротко описати сутність, призначення та мету відпалення II роду.

Зарисувати кут діаграми залізо-цементит до 2,14 % C та нанести на ній температурний розподіл видів відпалення (повного, неповного) та нормалізації з короткою їх характеристикою.

Коротко описати структурні особливості та властивості перегрітої сталі.

За отриманими експериментальними даними побудувати стовпчасті діаграми для сталі 45 "**Твердість, HRC - вид термообробки**" (перегрівання 1100°C, відпалення повне та ізотермічне, нормалізація) та для сталі У12 "**Твердість, HRC - вид обробки**" (гаряча прокатка, сфероїдизаційне відпалення)".

Мікроструктури сталей 45 та У12 після різноманітних видів термічної обробки зарисувати, позначити структурні складові, дати їх коротку характеристику.

За отриманими результатами досліджень зробити висновки щодо впливу на структуру та твердість видів відпалення. При цьому розкрити сутність перетворень, що відбуваються при нагріванні та охолодженні, при виконанні вказаних видів термічної обробки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### Прогартовуваність сталі

**Мета роботи** - ознайомитися з практикою визначення прогартовуваності методом торцевого гартування, а також дослідити вплив хімічного складу та гартівного середовища на прогартовуваність сталі.

#### Загальні відомості

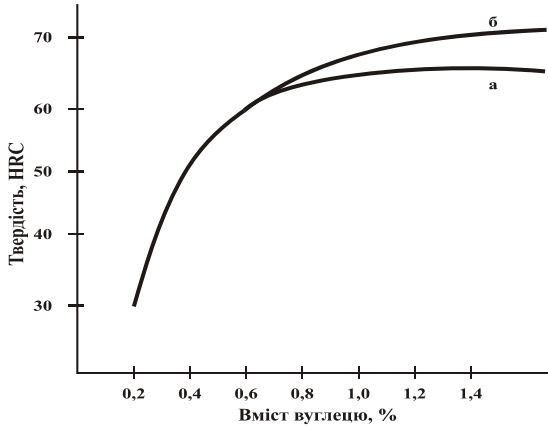
**Поняття прогартовуваності.** При гартуванні сталі важливі дві технологічні характеристики: загартовуваність та прогартовуваність, які є особливостями однієї сталі порівняно з іншими.

Під *загартовуваністю* розуміють здатність сталі одержувати певний рівень твердості при гартуванні її на мартенсит. Загартовуваність вимірюється в одиницях твердості і залежить, головним чином, від вмісту вуглецю в сталі. При цьому твердість мартенситу обумовлена вуглецем, розчиненим у ньому. Легувальні елементи чинять відносно невеликий вплив на загартовуваність (рис. 3.1).

Твердість загартованої сталі підвищується пропорційно вмісту в ній вуглецю до 0,7 % і досягає рівня 63...65 HRC. При вмісті вуглецю вище 0,7 % твердість загартованих сталей стабілізується. Це пояснюється тим, що гартування усіх заевтектійних вуглецевих сталей на практиці здійснюється від однієї температури (близько 780°C). Внаслідок цього вміст вуглецю в аустеніті при температурі гартування 0,8 % і в мартенситі після гартування буде однаковим.

Під *прогартовуваністю* розуміють здатність сталі одержувати в результаті гартування структуру мартенситу або троосто-мартенситу, а отже і високу твердість, на певну глибину по перетину деталі (зразка). Одиницею фізичної величини прогартовуваності є міліметр.

Прогартовуваність залежить від критичної швидкості гартування, тобто від хімічного складу сталі. Якщо дійсна швидкість охолодження (у воді, олії чи на повітрі) в серцевині виробу  $V_D$  буде перевищувати критичну швидкість гартування  $V_K$ , то сталь одержить мартенситну структуру у всьому перетині і тим самим виріб буде мати наскрізну прогартовуваність (рис. 3.2 -  $V_K'''$ ).



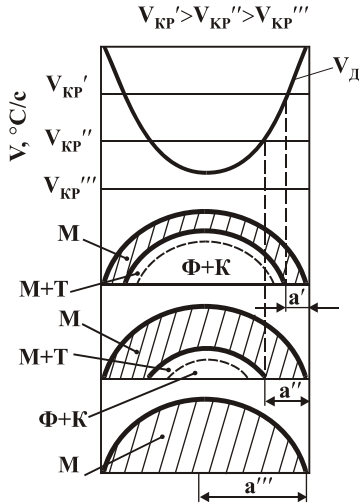
а - твердість загартованої сталі;  
 б - твердість мартенситу

Рисунок 3.1 - Вплив вмісту вуглецю на загартовуваність сталі

Якщо дійсна швидкість охолодження у серцевині буде меншою, ніж  $V_K$  ( $V'$  та  $V''$ ), то виріб загартується тільки на деяку глибину ( $a'$  та  $a''$ ) і прогартовуваність буде неповною. У цьому випадку в серцевині відбудеться перетворення аустеніту з утворенням пластинчастої ферито-карбідної структури (трооститу, сорбіту або перліту) (рис. 3.2).

За глибину загартованого шару (прогартовуваність) умовно приймається відстань від поверхні до напівмартенситної зони (50 % мартенситу + 50 % трооститу), тому в літературі приводяться дані про прогартовуваність в залежності від вмісту вуглецю в сталі для цієї зони (табл. 3.1 та рис. 3.3).

Діаметр заготовки, у центрі якої після гартування у даному охолоджувачі утворюється напівмартенситна структура, називають **критичним діаметром**  $D_{кр}$ . Величина критичного діаметра визначає розмір перетину виробу, що прогартовується наскрізь, тобто отримує високу твердість, а після відпускання - порівняно високі механічні властивості у всьому перетині.



$V_K'$  - критична швидкість гартування вуглецевої сталі;

$V_K''$  - теж саме низьколегованої сталі;

$V_K'''$  - високолегованої сталі

Рисунок 3.2 - Залежність прогартуваності сталі від значення критичної швидкості гартування  $V_K$ :  $a'$ ,  $a''$  та  $a'''$  - глибина загартованого шару

Таблиця 3.1 - Твердість сталі зі структурою 50% мартенситу і 50% трооститу в залежності від вмісту вуглецю

Вміст вуглецю, %	Твердість сталей, HRC		Вміст вуглецю, %	Твердість сталей, HRC	
	вуглецевої	легованої		вуглецевої	легованої
0,08-0,17	-	25	0,33-0,42	40	45
0,18-0,22	25	30	0,43-0,52	45	50
0,23-0,27	30	35	0,53-0,62	50	55
0,28-0,32	35	40			

**Примітка.** 1. Для сталей інструментальних з 0,7 % С та вище твердість загартованої зони становить 58-60 HRC.

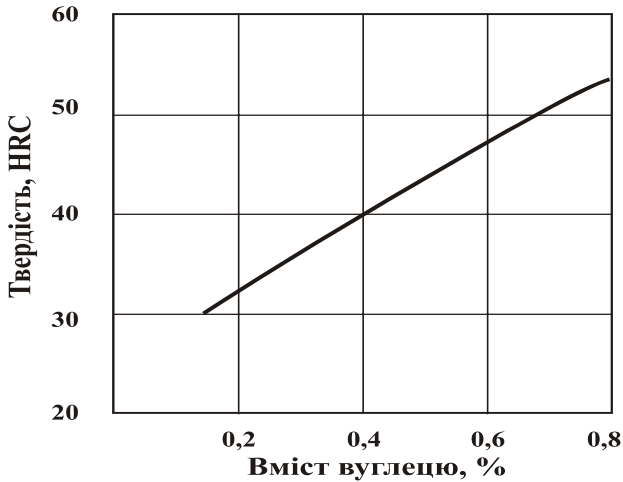


Рисунок 3.3 - Залежність твердості напівмартенситної зони від вмісту вуглецю в сталі

Однак напівмартенситна структура у серцевині в деяких випадках (коли міцність повинна бути однаковою у всьому перетині) не забезпечує максимуму механічних властивостей, особливо якщо виріб працює на розтягування, при знакозмінних та ударних навантаженнях. Після високотемпературного відпускання у напівмартенситній зоні ферито-карбідна структура частково має пластинчасту будову на відмінну від сорбіту, що з'являється на місці однорідного мартенситу, коли карбіди сфероїдизуються і сорбіт приймає зернисту будову. Наявність пластинчастої структури знижує механічні властивості сталі.

Практика показала, що у виробках з напівмартенситною структурою в серцевині після високотемпературного відпускання (35HRC) границя витривалості та ударна в'язкість на 15...20 % нижче, ніж у випадку, коли структура серцевини складається з 90...95 % мартенситу. Таким чином, наявність після відпускання незначної кількості пластинчастого трооститу у структурі знижує границю витривалості  $\sigma_1$  та в'язкість сталі, а тим самим і працездатність виробу. Тому часто прогартовуваність визначають по глибині загартованого шару зі структурою 95 або 99% мартенситу. Встановлено, що в цьому випадку прогартовуваність менша і

становить певну частку від  $D_{кр}$ , визначеного для напівмартенситної зони, а саме:

$$D_{кр95} = (3/4)D_{кр50} ;$$

$$D_{кр99} = (1/2)D_{кр50} .$$

На прогартовуваність чинить вплив низка факторів. В основному прогартовуваність тим вище, чим менша критична швидкість гартування, тобто, чим вище стійкість переохолодженого аустеніту, що визначається величиною зсуву діаграми ізотермічного перетворення аустеніту праворуч вздовж шкали часу. Тому усі фактори, що зменшують величину критичної швидкості гартування, збільшують прогартовуваність сталі ( див. рис. 3.2).

Леговані сталі внаслідок більш високої стійкості переохолодженого аустеніту та, відповідно, меншої критичної швидкості гартування (див. рис.3.2,  $V''$  та  $V'''$ ) прогартовуються на значно більшу глибину, ніж вуглецеві сталі. Інтенсивно підвищують прогартовуваність сталі марганець, хром, молібден та малі присадки бору (0,003...0,005 %). При цьому прогартовуваність особливо підвищується при одночасному введенні у сталь декількох легувальних елементів.

Однак прогартовуваність підвищується тільки у тому випадку, якщо легувальні елементи розчинені в аустеніті при нагріванні перед гартуванням. Якщо ж ці легувальні елементи не розчинені в аустеніті, а знаходяться в структурі у вигляді надлишкових фаз (карбідів, карбонітридів), то вони не підвищують стійкість аустеніту, а можуть її зменшити, оскільки карбіди служать готовими зародками, що полегшують перетворення аустеніту у ферито-карбідну суміш. Особливо впливають надлишкові фази титану, ніобію та ванадію (важкотопкі карбіди та карбонітриди), які при загально прийнятих температурах нагрівання перед гартуванням звичайно не розчиняються в аустеніті і знижують прогартовуваність сталі.

Дуже впливає на прогартовуваність величина зерна аустеніту. У вуглецевій сталі при укрупненні зерна від номера 8 до 1...2 глибина загартованого шару зростає у 2...3 рази. Тому підвищення температури та збільшення тривалості нагрівання при гартуванні сприяє зростанню прогартовуваності. Але укрупнення зерна аустеніту при гартуванні різко підвищує крихкість і знижує міцність виробу як

після гартування, так і після наступного відпускання. Тому прогартовуваність не підвищують за рахунок збільшення розміру аустенітного зерна.

Зовнішніми факторами, що впливають на прогартовуваність, є швидкість охолодження, а також форма виробу. У воді швидкість охолодження 150...200 °C/c, у олії - біля 50 °C/c, на повітрі - 3...5 °C/c. Тому при охолодженні у воді спостерігається найбільша прогартовуваність сталі.

### **Методи визначення прогартовуваності сталі**

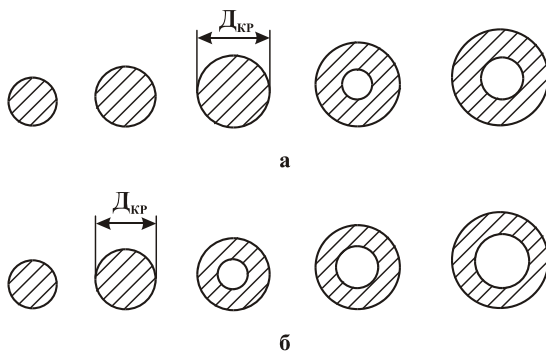
Прогартовуваність сталі можна практично визначити за зломом загартованого зразка методом пробного гартування циліндричних зразків, а також методом торцевого гартування на стандартних за розміром зразках. Визначається прогартовуваність ( $D_{кр}$ ) для різних охолоджувачів (води, олії, повітря) та різних форм виробу.

*За видом зламу.* Загартовують зразок циліндричної форми невеликого перетину (діаметром 15...20 мм) у заданому середовищі, роблять надріз і доламують зразок у тисах. Потім візуально визначають глибину загартованого шару. У загартованому шарі злам дрібнокристалічний або фарфороподібний (мартенсит безструктурний). Цим методом можна орієнтовно оцінити глибину загартованого шару для певного зразка при гартуванні у заданому середовищі.

*Метод пробних гартувань.* Для визначення критичного діаметра цим методом беруть циліндричні зразки різних розмірів, загартовують їх у воді або олії, розрізають по центру, відрізають шайбу та заміряють твердість вздовж двох взаємно перпендикулярних діаметрів. Діаметр зразка, у котрого в центрі твердість відповідає твердості напівмартенситної зони, і буде критичним діаметром (рис. 3.4).

На рис. 3.4 показана глибина гартування (заштрихована частина перетину) загартованих у воді та олії зразків різного діаметру, але одного і того ж хімічного складу.

Розподіл загартованої та незагартованої зон показує, що для кожного способу гартування існує максимальний перетин, що загартовується наскрізь. Діаметр цього перетину називається критичним ( $D_{кр}$ ).



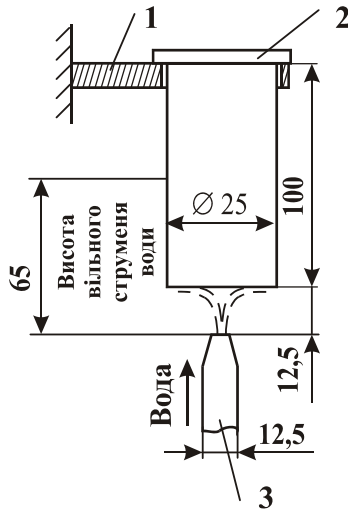
а – гартування у воді;  
б – гартування в олії

Рисунок 3.4 - Прогартуваність прутків різних діаметрів при гартуванні у воді і в олії (заштрихований загартований шар)

**Метод торцевого гартування.** Для визначення критичного діаметра цим методом виготовляють зразки стандартної форми ( $d = 25$  мм,  $l = 100$  мм) і дослідження роблять у стандартних умовах, встановлених ГОСТ 5657-71.

Метод торцевого гартування дозволяє на одному зразку без його розрізання визначити глибину загартованого шару будь-якого перетину деталі в різних охолоджувачах (вода, олія, повітря). Для цього зразок стандартних розмірів нагрівають, як звичайно при гартуванні, у муфельній печі впродовж 30 хвилин. Після прогрівання зразок швидко переноситься у спеціальний пристрій, де його охолоджують з торця струменем води (рис. 3.5). Швидкість охолодження стандартного зразка по довжині буде різною і відповідає певним значенням. Так, швидкість охолодження торця буде відповідати швидкості охолодження у воді, тобто  $200$  °C/с, на відстані  $1,5$  мм від торця вона буде біля  $150$  °C/с і далі буде зменшуватись. Протилежний кінець (головка зразка) буде охолоджуватись зі швидкістю охолодження на повітрі, що дорівнює  $3...5$  °C/с.

На торці та в перетинах, де дійсна швидкість охолодження була більше критичної, утворюється структура мартенситу. Зі зменшенням швидкості охолодження у евтектоїдних та заевтектоїдних сталях послідовно утворюються структури мартенситу і трооститу, троститу,



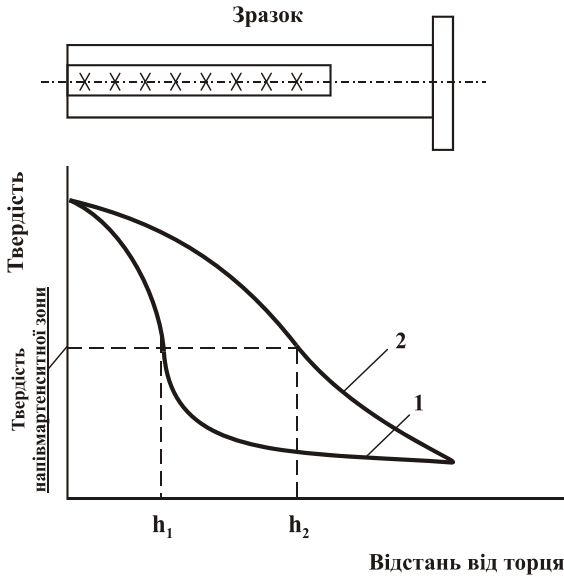
- 1 – пластина;  
 2 – зразок;  
 3 - сопло

Рисунок 3.5 - Схема охолодження стандартних зразків

трооститу та сорбіту, перліту. Зміни у структурі приведуть до зміни твердості, яка буде знижуватись відповідно зниженню ступеня дисперсності феритно-цементитної суміші, тобто зі зменшенням швидкості охолодження. Тому після торцевого гартування вимірюється твердість по довжині зразка і будується графік “твердість - відстань від торця” (рис. 3.6). Для вимірювання твердості необхідно по довжині зразка зачистити смужку шириною 2-4 мм, та, починаючи від торця, через кожні 2 мм виміряти твердість.

Після визначення твердості напівмартенситної зони для даної марки сталі (див. рис. 3.3), знаходять відстань від торця до напівмартенситної зони  $h$ . Так за графіком на рис. 3.6 відстань від торця до напівмартенситної зони для вуглецевої сталі складає  $h_1$  мм, для легованої -  $h_2$  мм.

По знайденій відстані від торця до напівмартенситної зони за номограмою прогартуваності (рис. 3.7) визначають критичний діаметр в залежності від форми зразка та охолоджувача. Користування номограмою викладено нижче.



- 1 - вуглецева сталь;  
2 - легована сталь

Рисунок 3.6 - Графік зміни твердості зразка в залежності від відстані від його торця для сталей з однаковим вмістом вуглецю

На верхній шкалі відкладають відстань від торця до напівмартенситної зони  $h$  (наприклад  $h = 3 \text{ мм}$ ). Від знайденої точки опускають перпендикуляр до лінії "Ідеальне охолодження" (перша лінія) і від точки перетину вліво ведуть горизонталь. Щоб визначити діаметр деталі, що має у центрі напівмартенситну зону при охолодженні її у реальному середовищі (вода, олія, повітря) необхідно від точки перетину горизонталі з лінією реального середовища (точки "а", "б") опустити перпендикуляр на горизонтальну вісь. В залежності від форми деталі одержують різний діаметр, що має у центрі напівмартенситну структуру. У нашому випадку відстань від загартованого торця до напівмартенситної зони  $h = 3 \text{ мм}$ . Для зразка з формою  $l/d=0,1$  (шайба) при охолодженні у воді (точка "а") діаметр, що шукається, складе  $90 \text{ мм}$ , а при охолодженні в олії (точка "б") -  $45 \text{ мм}$ . Для зразка з формою  $l/d = 10$  (циліндр) у воді відповідний діаметр складе  $15 \text{ мм}$ , а в олії -  $8 \text{ мм}$ .

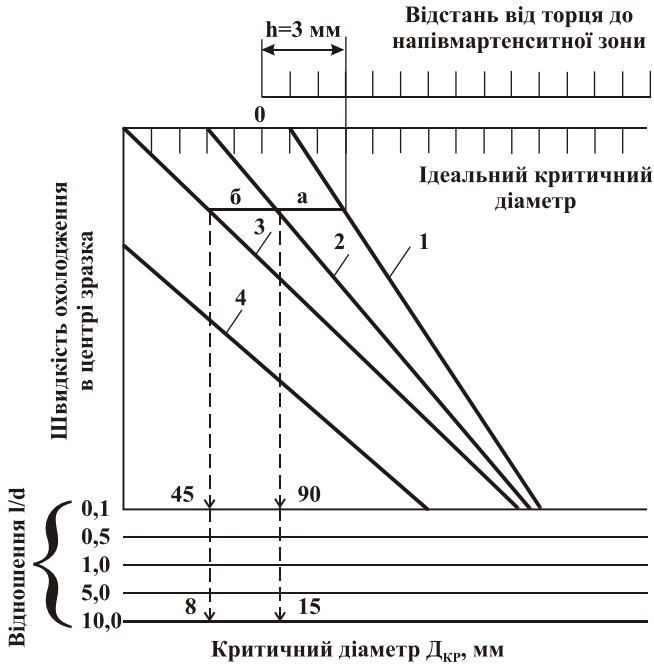


Рисунок 3.7 - Схема користування номограмою прогартовуваності

### Завдання на підготовку до лабораторної роботи

При підготовці до виконання лабораторної роботи необхідно повторити теоретичний матеріал, який стосується загартовуваності та прогартовуваності сталі, сутність процесів, які відбуваються при гартуванні, впливу складу сталей на прогартовуваність. Звернути особливу увагу на визначення прогартовуваності методом торцевого гартування та методику визначення критичних діаметрів за допомогою номограми.

Підготувати табл. 3.2, 3.3 та 3.4.

При вивченні теоретичного матеріалу скористатись [1] с. 62-67; [2] с. 186-193; [3] с. 206-210; [4] с. 262-268; [6] с. 81; [7] с. 171-177; [8] с. 287-293; [9] с. 206-211.

### **Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи**

1. Поняття про загартуваність сталі, від чого вона залежить.
2. Прогартуваність сталей та від чого вона залежить.
3. Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту. Критична швидкість гартування та фактори, що впливають на неї.
4. Вплив критичної швидкості гартування на прогартуваність сталі.
5. Як впливає прогартуваність на структуру та механічні властивості виробу з конструкційних марок сталей ?
6. Для яких виробів потрібна наскрізна прогартуваність у всьому перетині деталі, а для яких - висока загартуваність ?
7. Методи визначення прогартуваності сталі. Їх коротка характеристика.
8. Сутність торцевого методу визначення прогартуваності сталі. Методика користування номограмою для визначення прогартуваності.

### **Матеріали, інструменти, прилади та обладнання**

Термічна електрична піч; металева коробка; пристрій для торцевого гартування; бак з водою; наждачний верстат для шліфування зразків; твердомір типу ТК 2; лінійка; зразки для торцевого гартування зі сталей У10 та ШХ15.

### **Вказівки з техніки безпеки**

Загальні вимоги з техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт із термічної обробки викладено у додатку А.

### **Порядок виконання роботи**

Зразки зі сталі У10 та ШХ15 для визначення прогартуваності помістити у металеву коробку та присипати карбюризатором для захисту їх від знеуглецювання. Коробку зі зразками завантажити у піч, нагріту до 950°C, та витримати 30 хвилин.

Нагріті зразки почергово перенести у пристрій для торцевого гартування та охолоджувати до моменту, коли з боку головки зразка метал буде мати вишневочервоний колір. Потім зразок швидко перенести у гартівний бак та охолодити до кімнатної температури.

Зразки після гартування прошліфувати по поверхні паралельно осі (ширина смужки 2...4 мм), нанести позначки, починаючи від торця

через кожні 2 мм та виміряти твердість на вказаних позначках. Одержані дані занести в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Твердість після торцевого гартування

Відстань від торця, мм	Твердість, HRC, сталі		Відстань від торця, мм	Твердість, HRC, сталі	
	У10	ШХ15		У10	ШХ15
2			12		
4			14		
6			16		
8			18		
10			20		

### Зміст звіту

Стисло описати причини підвищення стійкості переохолодженого аустеніту та як це впливає на прогартуваність сталей. Описати, як впливає вибраний критерій прогартуваності ( $D_{kp50}$ ,  $D_{kp95}$ ,  $D_{kp99}$ ) на механічні властивості виробу після повної термічної обробки і чому. З графіку на рис. 3.3 знайти твердість напівмартенситної зони ( $50 \% M + 50 \% T$ ) для сталей з 1 % вуглецю.

За даними табл. 3.2 побудувати графік у координатах "**Твердість (HRC) - Відстань від торця (мм)**" для зразків сталей У10 та ШХ15. На цьому графіку визначити відстань " $h$ " до напівмартенситної зони за визначеною з рис. 3.3 твердості для вказаних марок сталей. Користуючись номограмою, визначити критичний діаметр ( $D_{kp50}$ ) для різних охолоджувачів та форм зразків. Дані занести у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Прогартуваність сталей У10 та ШХ15

Марка сталі	$D_{kp50}$ для зразка $l/d=10$			$D_{kp50}$ для кулі, мм		
	Вода	Олія	Повітря	Вода	Олія	Повітря
У10						
ШХ15						

Користуючись відомими залежностями, перевести  $D_{кр50}$  у  $D_{кр95}$  та  $D_{кр99}$  і дані занести у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Критичний діаметр в залежності від заданої структури у центрі зразка

Зразок циліндричний, $l/d = 10$	Сталь У10			Сталь ШХ15		
	Вода	Олія	Повітря	Вода	Олія	Повітря
$D_{кр50}$ , мм						
$D_{кр95}$ , мм						
$D_{кр99}$ , мм						

За одержаними експериментальними даними (табл. 3.3 та 3.4) зробити висновки про основні фактори, що впливають на прогартовуваність сталей.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### Характеристика та вибір гартівних середовищ

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

#### Загальні відомості

В залежності від умов роботи деталей термічна обробка повинна забезпечити однорідну структуру або, навпаки, задану зміну структур та властивостей. Це залежить від хімічного складу матеріалу, технології нагрівання та умов охолодження. Останні впливають не лише на структуру матеріалів, але і на деформацію виробів, поверхневі та об'ємні напруження, границю витривалості. Високий рівень об'ємних напружень підвищує схильність до утворення тріщин.

При гартуванні для охолодження виробів використовують воду, водні розчини неорганічних речовин, водні розчини полімерів, мінеральні гартівні олії, розтопи солей та лугів, гази. Обґрунтований вибір гартівного середовища можливий за умов знання фізико-хімічних, термокінетичних властивостей речовин, що для цього використовують.

#### Характеристика гартівних середовищ

**Вода.** Характеризується надзвичайно високою охолоджувальною здатністю, обумовленою великими питомою теплоємністю (4,18 кДж/(кг·К) при 15°C) та питомою теплотою випаровування (2235 кДж/кг при 100°C). В той же час за теплопровідністю вода значно поступається металам. Наприклад, теплопровідність вуглецевої сталі становить 35..45 Вт/(м·К), води 0,68 Вт/(м·К) при 20°C.

До важливих переваг води, як гартівної речовини, відносяться: мала вартість, нешкідливість для здоров'я та довкілля, руйнівна дія на окалину у випадку нагрівання виробів у окисному середовищі; стабільність (відсутність дисоціації) при контакті із нагрітими до температур 800...900°C виробами, легкість розчинення неорганічних (солей, лугів, кислот), органічних сполук та газів.

Водночас вода має низку вад: корозійна дія на поверхню виробів зі сталі; низька температура кипіння порівняно із мінеральними оліями (100°C та 220...270°C відповідно); велика залежність охолоджувальної здатності води від її температури; залежність швидкості охолодження виробів від їх температури; співпадання максимальної швидкості охолодження із інтервалом температур мартенситного перетворення 380...100°C, що викликає великі структурні напруження, деформацію і небезпеку виникнення тріщин.

На рис. 4.1 та 4.2 наведено дані про швидкість охолодження у воді при різних температурах та вплив температури води на її охолоджувальну здатність.

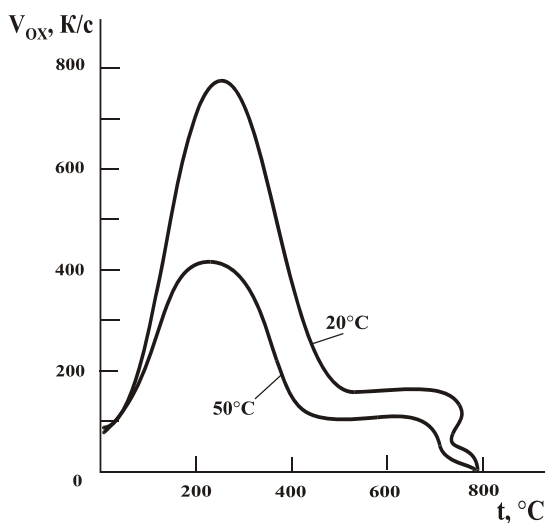


Рисунок 4.1 – Швидкість охолодження у воді при різних температурах Цифри біля кривих – температура води

При температурі води 20°C в інтервалі температур виробу 800...380°C спостерігається утворення парової оболонки, швидкість охолодження складає 180 K/c. Нижче 380°C відбувається бульбашкове кипіння і забезпечується висока (~780 K/c) швидкість охолодження, яка при температурах нижче 200°C знижується у зв'язку із тим, що охолодження визначається конвективним теплообміном.

Підвищення температури води (вище 30°C) різко знижує її охолоджувальну здатність, а максимум швидкості охолодження пересувається до більш низьких температур (див. рис. 4.1 та 4.2). Відсутність регулювання температури та охолодження води приводить до суттєвої та локальної різниці в швидкості охолодження і утворення м'яких плям на виробках та їх деформації.

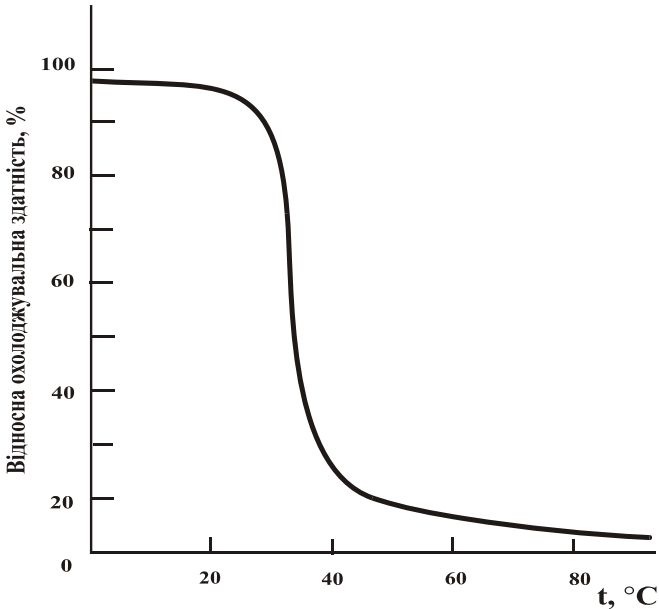


Рисунок 4.2 – Відносна охолоджувальна здатність води в залежності від її температури

**Водні розчини неорганічних речовин.** Навіть невеликі домішки названих речовин приводять до суттєвих змін в кінетиці охолодження порівняно із чистою водою. Як домішки використовують **NaCl, CaCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** із концентрацією 2,5...20% масових. На рис. 4.3 наведено дані про вплив NaCl на швидкість охолодження сталі у водних розчинах.

Розчинені у воді солі, кислоти, луги, підвищують її охолоджувальну здатність внаслідок зменшення стійкості парової оболонки, а при концентраціях, наприклад, **10...15% NaCl** до повного запобігання виникненню оболонки.

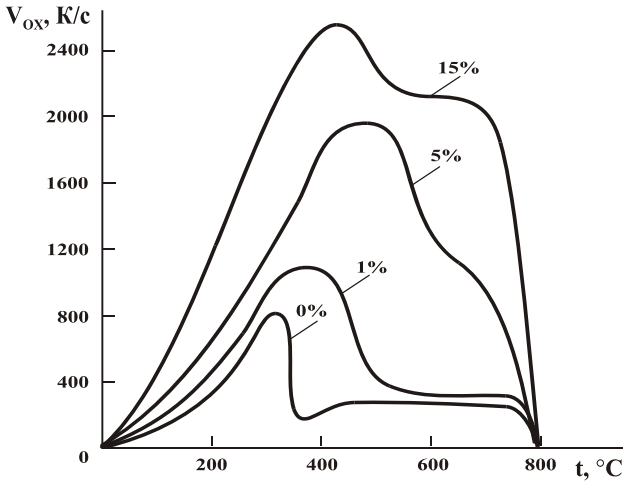


Рисунок 4.3 – Швидкість охолодження у водних розчинах NaCl (цифри біля кривих – концентрація)

До основних переваг соляних розчинів порівняно із водою відносять:

- значно менший вплив температури розчину на швидкість охолодження в усьому діапазоні температур охолодження, завдяки чому допускається температура розчину до 50...70°C;
- зниження можливості утворення м'яких плям;
- слабкий вплив циркуляції розчину на його охолоджувальну здатність;
- звуження або усунення інтервалу температур існування парової оболонки та підвищення рівномірності охолодження виробів у садці.

До недоліків соляних розчинів, які ускладнюють їх використання у виробництві, слід віднести:

- необхідність антикорозійного захисту устаткування;
- більші порівняно із водою матеріальні та трудові затрати;
- необхідність використання витяжної вентиляції із метою забезпечення захисту персоналу і устаткування від шкідливого впливу пари розчинів;
- усунення корозійної дії розчинів можливе за рахунок введення до їх складу інгібіторів.

**Водні розчини полімерів.** Вода та мінеральна олія найбільш розповсюджені гартівні середовища. Їх технологічні та термодинамічні властивості суттєво різні. Оптимальний охолоджувач повинен забезпечувати високу швидкість охолодження при температурах 800...400°C та низьку - в інтервалі температур мартенситного перетворення. У зв'язку із суттєвими недоліками та обмеженнями у використанні води та олії необхідний охолоджувач із наступними властивостями:

- охолоджувальна здатність в температурному інтервалі перлітного перетворення повинна бути вищою, ніж у мінеральної олії;
- нейтральність та нешкідливість для персоналу та довкілля;
- охолоджувальна здатність в інтервалі температур мартенситного перетворення повинна бути близькою до охолоджувальної здатності олії.

Використовуючи різні полімери для створення гартівних середовищ, розроблено розчини як замітники олії, так і ті, що заповнили нішу в охолоджувальній здатності між водою та олією. До складу 5...30 % розчинів входять полівиниловий спирт, полігліколь оксиалкіловий, натрійовий полікрилан, полівінілпіролідін, поліакрилоамід, поліакрилова сіль заліза тощо.

На рис. 4.4 наведено термодинамічні криві водних розчинів полігліколя.

Механізм впливу, наприклад, полівінілового спирту на кінетику охолодження полягає у протіканні на поверхні виробів процесу полімеризації. Утворений при високих температурах шар полімерних сполук знижує при температурах нижче 400°C швидкість охолодження. До недоліків цих середовищ необхідно віднести:

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

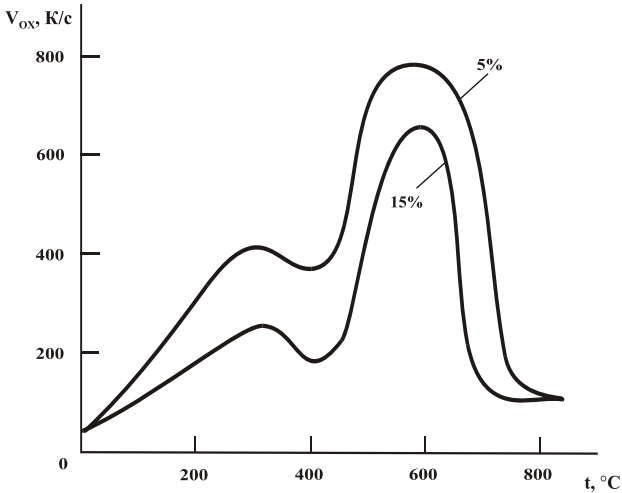


Рисунок 4.4 – Швидкість охолодження в розчинах полігліколя (цифри біля кривих – концентрація розчину).

**Мінеральні гартівні олії.** Після появи наприкінці XIX сторіччя продуктів ректифікації нафти мінеральна олія почала використовуватись у промисловості як гартівна рідина. Вона дозволяє отримувати оптимальне поєднання твердості, гартівних напружень та деформацій. Олія менш трудомістка при контролі та спостереженні і за цими показниками поступається лише воді. Але поряд із цими позитивними даними є низка суттєвих недоліків гартівних олій:

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

Мінеральна олія має наступні властивості  $\rho = 880 \dots 900 \text{ кг/м}^3$ , теплоємність  $2,0 \dots 2,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ , теплопровідність близько  $0,127 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , теплота випарування  $170 \dots 250 \text{ кДж/кг}$ . Швидкість охолодження у олії при різних температурах наведено на рис. 4.5.

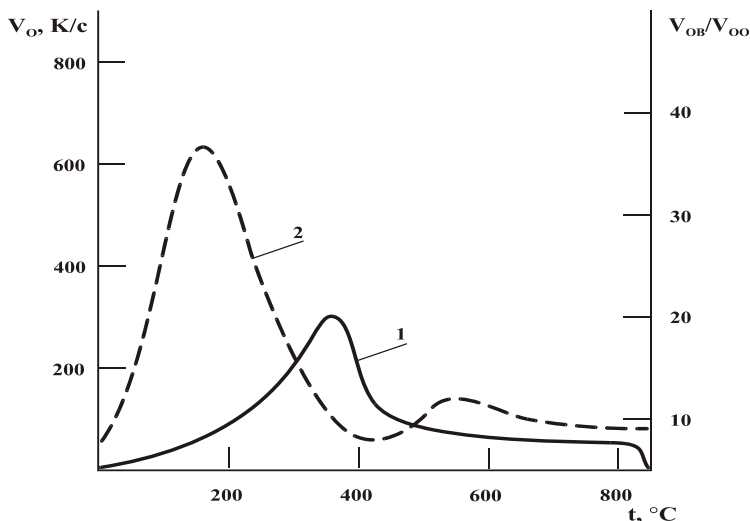


Рисунок 4.5 – Залежність швидкості охолодження у олії (1) та відношення швидкості охолодження у воді до швидкості охолодження у олії (2) від температури

Наведені на рис. 4.5 криві свідчать про велику різницю в швидкості охолодження у олії та воді. Особливо це характерно для температур нижче  $300^\circ\text{C}$ , при яких швидкість охолодження у воді у декілька десятків разів вища, ніж у олії.

Високотемпературні гартівні олії експлуатуються в інтервалі температур  $80 \dots 150^\circ\text{C}$ , деякі навіть  $150 \dots 250^\circ\text{C}$ . Це дозволяє суттєво зменшити як рівень напружень, так і жолоблення у виробх.

Властивості олії залежать від хімічного складу, ступеня чистоти, температури та терміну експлуатації. Одним із забрудників олії є вода, яка потрапляє внаслідок нещільностей у системах охолодження олії, конденсації водяної пари, зберігання олії у негерметичній тарі. Уже при вмісті води  $0,2\%$  парова оболонка зберігається до досить низьких

температур, охолодження протікає нерівномірно і це сприяє підвищенню деформації, утворенню м'яких плям, тріщин.

Протікання процесів термічної дисоціації молекул олії, полімеризації продуктів окислення, окислення вуглеводнів приводить до забруднення олії, зміни в'язкості та термодинамічних характеристик. Наприклад, швидкість охолодження у використаній олії при температурах 600...500°C становить 100...500 К/с, тоді як у свіжій олії близько 60 К/с.

Витрати олії досягають 10..25 кг на тону виробів, тому до використаної олії систематично додають свіжу, завдяки чому довговічність олії досягає 2...5 років.

**Розтопи солей та лугів.** Сходінкове та ізотермічне гартування передбачає використання середовищ з робочими температурами в межах 150...500°C. Ураховуючи, що мінеральна олія експлуатується при температурах не вище 250°C, тому для більш високих температур широко використовують розтоплені солі, луги, суміші солей. Механізм теплообміну при охолодженні у розплавах інший, ніж при охолодженні у воді або олії, інтенсивність теплообміну визначається згідно із законом Ньютона:  $p = \alpha \cdot \Delta t$ . Питомий тепловий потік  $p$  і швидкість охолодження пропорційна градієнту температур. Таким чином при гартуванні у розплавах максимальна швидкість охолодження спостерігається в початковий період, а не в інтервалі температур мінімальної стійкості аустеніту (рис. 4.6).

Охолоджувальна здатність соляних ванн невелика. Теплопровідність розтоплених солей на два порядки менша, ніж розтоплених металів, але теплоємність солей значно вища (у 8...10 разів), ніж у металів. Завдяки цьому, а також меншій в'язкості соляних розплавів, охолоджувальні здатності як розтоплених металів так і солей близькі. В табл. 4.1 наведено дані про відносну охолоджувальну здатність розтоплених солей та лугів в інтервалі 650...550°C.

Компонентами ванн являються **KNO<sub>2</sub>, KNO<sub>3</sub>, NaNO<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>, NaOH, KOH**. До основних недоліків селітрових ванн відносяться хімічне руйнування після перевищення допустимих температур експлуатації (550°C), а також екзотермічні реакції із паливними матеріалами. Ці реакції можуть викликати пожежу та вибух. Розтопи лугів значно безпечніші, але плавляться при більш високих

температурах, тому в багатьох випадках вони не замінюють селітрові ванни.

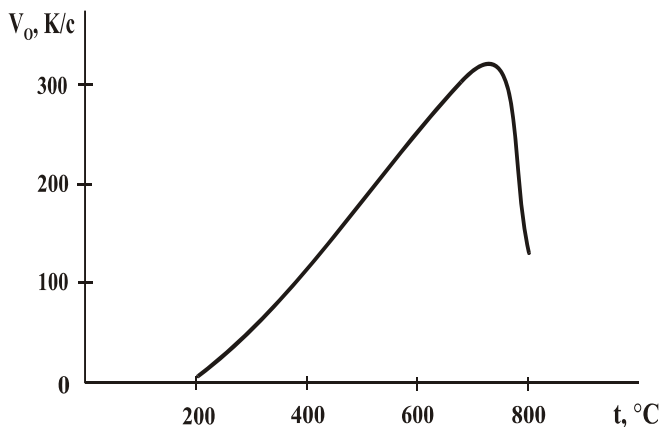


Рисунок 4.6 – Швидкість охолодження у розтопленій селітрі ( $t_{\text{селітри}}=180^\circ\text{C}$ )

Таблиця 4.1 – Відносна охолоджувальна здатність розтоплених солей та лугів ( $650\dots 550^\circ\text{C}$ )

Середовище	Відносна охолоджувальна здатність
Вода ( $20^\circ\text{C}$ )	1,000
$\text{KNO}_3 + \text{NaNO}_2$ ( $160^\circ\text{C}$ )	0,390
$\text{NaOH} + \text{KOH}$ ( $200^\circ\text{C}$ )	0,365
$\text{KNO}_3 + \text{NaNO}_3$ ( $250^\circ\text{C}$ )	0,334
$\text{NaOH} + \text{KOH}$ ( $300^\circ\text{C}$ )	0,300
$\text{KNO}_3 + \text{NaNO}_3$ ( $400^\circ\text{C}$ )	0,210

Інтервал температур експлуатації залежить від складу розплаву. Наприклад,  $\text{NaNO}_2$  (100%) –  $325\dots 550^\circ\text{C}$ ;  $\text{NaNO}_3$  (100%) –  $320\dots 550^\circ\text{C}$ ;  $\text{NaNO}_3$  (45%) +  $\text{NaNO}_2$  (27,5%) +  $\text{KNO}_3$  (27,5%) –  $140\dots 250^\circ\text{C}$ ;  $\text{NaOH}$  (100%) –  $350\dots 700^\circ\text{C}$ ;  $\text{NaOH}$  (37%) +  $\text{KOH}$  (63%) –  $180\dots 350^\circ\text{C}$ .

Розтоплені  $\text{NaOH}$  та  $\text{KOH}$  більш безпечні порівняно із  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{KNO}_2$  і не приводять до окислення поверхні. Після гартування в лугах

вироби ретельно промивають для вилучення залишків солей. Основний недолік лужних ванн – значно менша експлуатаційна довговічність і стабільність властивостей. Внаслідок поглинання із повітря  $\text{CO}_2$  утворюються карбонати  $\text{Na}$  та  $\text{K}$ , збільшується в'язкість та погіршується охолоджувальна здатність розплаву.

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

**Газу.** Для гартування використовують повітря, азот, аргон. Швидкість охолодження визначається за рівнянням:  $v_0 = dt/d\tau$  К/с. Водночас похідна тривалості охолодження згідно із рівнянням Старка дорівнює:

$$d\tau = \frac{m \cdot c}{F \cdot \alpha_c} \cdot \frac{dt}{t_a - t_n},$$

де  $m$  - маса садки (виробу);

$c$  - теплоємність матеріалу виробу;

$F$  - площа поверхні виробу;

$\alpha_c$  - сумарний коефіцієнт тепловіддачі;

$t_B$  - температура виробу;

$t_C$  - температура гартівного середовища.

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

Повітря має наступні характеристики: густина 1,23 кг/м<sup>3</sup>, теплопровідність 0,0244 Вт/(м·К), теплоємність 1,3 кДж/(м<sup>3</sup>·К). Низькі значення густини, теплоємності та теплопровідності обумовлюють низькі термодинамічні властивості повітря і мале використання цього середовища. Охолодження у повітряному середовищі забезпечує мінімальне жолоблення, використовується при гартуванні листів, тонкостінних виробів, труб, дроту, виготовлених зі сталей із підвищеною стійкістю аустеніту. При гартуванні стисненим повітрям використовують пристрої, конструкція котрих пристосована до форми

та маси виробів і повинна забезпечити рівномірне охолодження усієї поверхні.

Відносна охолоджувальна здатність газів у порівнянні із водою надана у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Відносна охолоджувальна здатність газів порівняно із водою

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

### Основи вибору гартівного середовища

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

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

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

- кінетика фазових перетворень у сталі, яка описується відповідними діаграмами (ізотермічною, термокінетичною);
- прогартуваність сталі у різних середовищах;
- розміри поперечного перетину та складність виробу;
- вимоги до розподілу твердості у різних точках перетину;
- тип і конструкція гартівного пристрою;
- спосіб контакту середовища із виробом і інтенсивність його циркуляції;

- умови безпеки та охорони довкілля;
- вартість і її складові: перше наповнення ванни; відновлення втрат при випаровуванні та винесенні; вартість на промивання та очищення тощо.

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

Відомо, що твердість і структура сталі залежать від швидкості охолодження після аустенітизації. Крім, того, існує кореляція між швидкістю охолодження вздовж зразка в перетинах прутків різних діаметрів та на торці. Тому, при виборі гартівного середовища треба звернути увагу на вимоги щодо розподілу твердості по перетину, вимоги щодо наскрізної прогартовуваності. Для порівняння розмірів виробу із характеристиками матеріалу слід із довідників отримати дані про смугу прогартовуваності та прогартовуваність сталі у різних середовищах.

Для оцінки можливості гартування сталі певної марки в певному середовищі необхідно нанести криву охолодження на діаграму термодинамічного перетворення аустеніту цієї сталі. Найбільш суттєвою є тривалість охолодження в інтервалі 800...500°C. Час охолодження повинен бути настільки коротким, щоб уникнути перетворення  $A \rightarrow P$ , а у високолегованих інструментальних сталях – запобігти виділенню карбідів. Порівняння інкубаційного періоду на термодинамічній діаграмі та на кривій охолодження в даному середовищі, наприклад, олії, воді, повітрі, дозволить оцінити його придатність для гартування сталі, що розглядається.

Якщо печі та гартівні пристрої - окремі установки, то вид гартівного середовища не впливає на умови роботи печей аустенітизації і поверхневі реакції у виробках. Розвиток тенденції до створення закритих комплексних установок, в яких операції аустенітизації, дифузійного насичення, охолодження, промивання, відпускання відбуваються в одному агрегаті, висуває певні вимоги до гартівних середовищ: відсутність негативного впливу середовища на атмосферу печі, внутрішні поверхні печі і усього агрегату.

У випадку аустенізації в камерних, шахтних печах немає обмежень у виборі гартівного середовища, тому що їх внутрішній простір не з'єднується із гартівними баками.

Гартування в пресах вимагає використання олії із великим опором до випаровування, повільним охолодження при низьких температурах і малим впливом швидкості руху на охолоджувальну здатність.

Агрегати безперервної дії (штовхальні, конвеєрні, барабанні, рольгангові) включають до свого складу камеру, заповнену не тільки пічною атмосферою, але і парою гартівного середовища. Якщо в атмосфері печі припустимий підвищений вміст водяної пари, то гартівною речовиною може бути вода. У випадку, коли вимагається повна відсутність знеуглецювання, то гартівна рідина – лише мінеральна олія.

Гартування після аустенізації (гомогенізації) у вакуумних печах не створює обмежень в виборі середовища для охолодження, але найчастіше використовують газові охолоджувальні середовища. Виключено використання водних середовищ та розтоплених солей.

Особливості печей-ванн, агрегатів із такими печами полягає у тому, що вся садка одночасно переноситься у гартівний бак. У зв'язку із цим рідко використовують водні та селітрові середовища для охолодження. Різке охолодження у воді скорочує термін експлуатації технологічного пристосування. Селітрові та лужні солі важко вилучаються із пристосувань. Найбільш доцільне використання мінеральних олій малої в'язкості, які мають високу охолоджувальну здатність, менш пожежонебезпечні і добре вилучаються при промиванні виробів.

### **Завдання на підготовку до лабораторної роботи**

Необхідно засвоїти дані про властивості різних гартівних середовищ (теплоємність, теплопровідність, густину) та їх термодинамічні характеристики. Треба мати уявлення про процеси, що відбуваються із гартівною речовиною при різних температурах, і механізми передачі тепла від виробу до середовища. Рекомендується освоїти основи вибору гартівного середовища і знати про роль діаграм ізотермічного та термодинамічного перетворення при вирішенні цієї задачі.

Підготувати табл. 4.1, 4.2, 4.3.

Теоретичний матеріал, який рекомендується для вивчення, розміщено: [1] с. 60-62; [2] с. 182-186; [3] с. 203-205; [4] с. 260-262; [6] с. 78-81; [7] с. 179-187; [9] с. 204-206; [10] с. 32-50; [11] с. 74-182.

### **Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи**

1. Охарактеризувати вимоги до гартівних середовищ.
2. Зробити перелік теплофізичних та термодинамічних характеристик гартівних середовищ.
3. Вода – як гартівне середовище, її властивості та охолоджувальна здатність при різних температурах.
4. Охарактеризувати три періоди в процесі охолодження виробів у воді: оболонкове (плівкове) кипіння; бульбашкове кипіння; конвективний теплообмін.
5. Пояснити вплив температури води на її термодинамічні характеристики.
6. Охарактеризувати переваги та недоліки водних розчинів солей та лугів, як середовищ для гартування.
7. Як і чому впливають розчинені у воді полімерні сполуки на її охолоджувальну здатність ?
8. Мінеральна олія як гартівне середовище, її теплофізичні властивості та термодинамічні характеристики.
9. Зробити перелік і пояснити позитивні та негативні властивості мінеральної олії як гартівної рідини. Як впливають домішки та термін використання на властивості мінеральної олії ?
10. Термодинамічні та теплофізичні властивості розтоплених солей та лугів. Перелічити основні солі та луги, їх суміші, які використовують для гартівних ванн.
11. Охарактеризувати вади та переваги розтоплених солей та лугів.
12. Газу як середовище для гартування: фізичні властивості, швидкість охолодження, вплив швидкості руху та тиску на термодинамічні характеристики.
13. Основні чинники, що впливають на вибір гартівного середовища. Яку роль відіграють термодинамічні та ізотермічні діаграми перетворення аустеніту при вирішенні цієї задачі ?

### Матеріали, інструменти, прилади, обладнання

Термічні електричні печі; зразки діаметром 20 мм та довжиною 100 мм із вуглецевої та легованої сталей; термопари хромель-алюмелеві (ХА); швидкодійний малоінерційний потенціометр-самописець; баки із водою та мінеральною олією; діаграмна стрічка.

### Вказівки з техніки безпеки

Правила безпеки при виконанні роботи в термічній лабораторії викладено у додатку А.

### Порядок виконання лабораторної роботи

Встановити в зразках ХА термопари, вжити заходів по щільному контакту гарячого спаю із сталлю та герметизації отвору у зразках. Нагріти зразки до температури 900...930°C, перенести у гартівне середовище (воду, мінеральну олію, повітря) і записати криві охолодження. Виконати графічне диференціювання кривих охолодження і визначити швидкість охолодження центра зразка у різних середовищах. Результати занести в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Швидкість охолодження зразків у різних середовищах

Інтервал охолодження	Швидкість охолодження $v$ зразків, К/с, в інтервалі температур, °С, у середовищі							
	Вода		Олія		Повітря		5% NaCl	
	$v$	$\tau$	$v$	$\tau$	$v$	$\tau$	$v$	$\tau$
800...700								
700...600								
600...500								
500...400								
400...300								
300...200								
200...100								
100...20								

Користуючись довідковою літературою, отримати термокінетичні діаграми для заданих викладачем сталей, нанести на

них криві охолодження у воді, олії, повітрі, 5 % NaCl. Дані для кривих охолодження у різних середовищах отримати із [11].

### Зміст звіту

Викласти дані щодо теплофізичних властивостей та термокінетичних характеристик гартівних речовин – води, водних розчинів солей та лугів, водних розчинів полімерів, розтоплених неорганічних речовин, мінеральної олії та газів. Заповнити табл. 4.3 і за її даними побудувати криві залежності, *“Температура, °C – час охолодження, с”* та *“Швидкість охолодження, К/с – температура, °C”*. Навести діаграми термокінетичного перетворення аустеніту для заданих сталей із нанесеними на них кривими охолодження у воді, олії, повітрі та 5 % NaCl.

У висновках навести аналіз впливу гартівного середовища на швидкість охолодження та обґрунтування вибору гартівної речовини для заданих марок сталей.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### Азотування та алітування сталі

**Мета роботи** – вивчити технологічні особливості азотування та алітування сталі; дослідити вплив складу сталі та технологічних параметрів на характеристики шару; ознайомитися із призначенням азотування та алітування.

#### Загальні відомості

Азотування та алітування відносяться до хіміко-термічної обробки (ХТО) сталей та сплавів. В ході ХТО, яка здійснюється при підвищених (високих) температурах, відбувається низка процесів:

- утворення у реакційному просторі газоподібних сполук - транспортантів, до складу яких входять атоми елемента, що дифундує;
- протікання на поверхні виробів реакцій дисоціації, рекомбінації, диспропорціювання і утворення внаслідок цього елемента, що дифундує, в атомарному (активному) стані;
- абсорбція поверхнею виробів активних атомів елемента, що дифундує;
- виникнення градієнта концентрації елемента, що дифундує, і, як наслідок цього, його дифузія від поверхні до серцевини;
- зустрічна дифузія атомів розчинених у стопі елементів у випадку взаємодії атомів елемента, що дифундує, із атомами, наприклад, вуглецю або, навпаки, витіснення із зони із підвищеним вмістом елемента, що дифундує, в глибину виробу.

Наприклад, при хромуванні сталі спостерігається зустрічна дифузія атомів вуглецю і утворюються карбіди, а при алітуванні, навпаки, вуглець витісняється із при поверхневого твердого розчину, збагаченого алюмінієм, в глибину.

#### Азотування сталі

Азотування – це процес дифузійного насичення сталей та стопів азотом. Розрізняють низькотемпературне (нижче 600°C) та виськотемпературне (вище 600°C) азотування. Більшість виробів у машинобудуванні, що азотуються, обробляються при температурах

нижче 600°C. Високотемпературне азотування (850...1300°C) – це спеціальне азотування, яке використовують при обробленні виробів із молібдену, ніобію, титану та їх сплавів, високолегованих сталей. В цій роботі розглядається низькотемпературне азотування сталей.

У відповідності із метастабільною діаграмою **Fe-N** (рис. 5.1) при азотуванні заліза утворюються наступні фази:

**$\alpha$ -фаза** – твердий розчин впровадження (втілення) атомів азоту у  $Fe_{\alpha}$ , ґратка ОЦК ( $a=0,2866...0,2877$  нм); максимальна розчинність при евтектоїдній температурі дорівнює 0,11%, при 20°C – 0,004%; твердість HV 100...150;

**$\gamma$ -фаза** – твердий розчин впровадження атомів азоту в  $Fe_{\gamma}$ , ґратка ГЦК ( $a=0,360...0,364$  нм), максимальна розчинність 2,8% N при температурі 650°C, твердість HV 140...160;

**$\alpha'$ -** азотистий мартенсит, пересичений твердий розчин азоту в  $\alpha$ -Fe, ґратка тетрагональна об'ємно-центрована ( $a \leq 0,2860$  нм), твердість HV 660...690;

**$\gamma'$**  - твердий розчин на основі нітриду  $Fe_4N$ , ґратка ГЦК, концентрація азоту 5,30...5,75 %, твердість HV 470...490;

**$\epsilon$ -фаза** – твердий розчин на основі нітриду  $Fe_{2-3}N$ , ґратка – гексагональна щільно пакована, вміст азоту 8,55...11,0 % твердість HV 260...300;

**$\xi$ -фаза** – твердий розчин на основі нітриду  $Fe_2N$ , ґратка – ромбічна, концентрація азоту 11,07...11,18 %, кристалізується із  $\epsilon$ -твердого розчину при 500°C.

Такі фази, як  **$\alpha$** ,  **$\gamma$** ,  **$\epsilon$**  мають невисоку твердість. Азотистий мартенсит ( **$\alpha'$ -фаза**) – найбільш тверда фаза і утворюється при швидкому охолодженні виробів від температур вище 590°C. Ураховуючи, що низькотемпературне азотування зазвичай проводять при температурах  $\leq 560^\circ C$ , азотистий мартенсит після цього не спостерігається.

Фази  **$\epsilon$**  і особливо  **$\gamma'$**  мають підвищену зносостійкість. Електрохімічний потенціал  $\epsilon$ -фази становить 0,12...0,15 В, що пояснює високу корозійну стійкість азотованих виробів у повітрі і прісній воді.

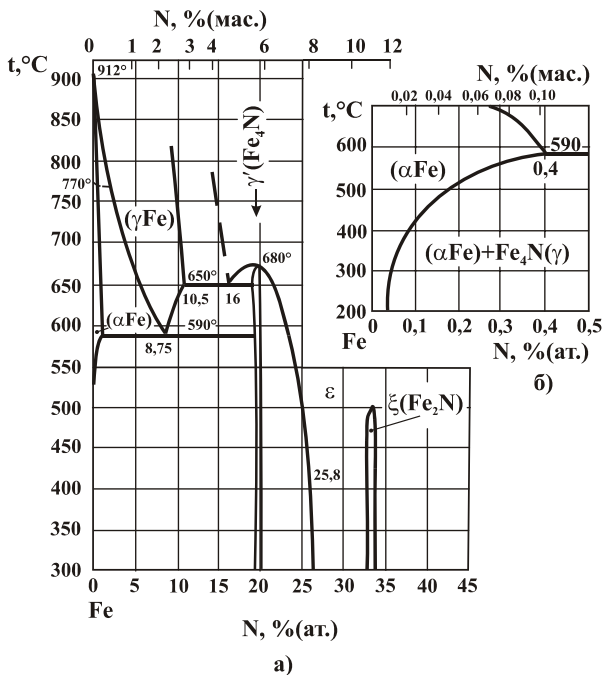


Рисунок 5.1 – Метастабільна діаграма стану  $Fe-N$  (а) та область розчинності азоту у фериті (б)

У випадку азотування сталі  $\epsilon$ -фаза – це карбонітрид  $Fe_{2-3}(N,C)$  із відношенням  $C/N=1,20\dots1,25$ . Розчинність вуглецю у  $\gamma'$ -фазі невелика, вона в сутності є нітридом  $Fe_4N$ . Аустеніт та ферит – подвійні тверді розчини впровадження вуглецю та азоту. Вуглець зменшує розчинність азоту у фериті. Існує гіпотеза, що можливе розчинення азоту у карбіді заліза  $Fe_3(CN)$ .

Як свідчать дані про властивості нітридів, максимальна твердість вуглецевих сталей після азотування не перевищує  $HV\ 490$ , що в багатьох випадках не забезпечує необхідної зносостійкості та вимог до твердості виробів ( $HV \geq 850$ ). Тому для виготовлення азотованих виробів застосовують середньовуглецеві леговані  $Al$ ,  $V$ ,  $Ti$ ,  $Mo$ ,  $Cr$  сталі 38X2MЮА, 30X2H2BMФА, 40XHM та інші, які із азотом утворюють нітриди  $AlN$ ,  $VN$ ,  $TiN$ ,  $Mo_2N$ ,  $MoN$ ,  $Cr_2N$ ,  $CrN$ .

Нітриди легувальних елементів та зони із підвищеною концентрацією атомів азоту та легувальних елементів у твердому розчині дозволяють досягнути твердості  $HV > 850$ .

Технологія виготовлення азотовних виробів досить розгалужена. Найчастіше заготовки для виробів – штамповки, що проходять попередні термічну (відпалення або нормалізацію із високотемпературним відпусканням) та механічну обробки. Потім вироби піддаються термічному поліпшенню із метою отримання структури сорбіту і необхідних властивостей (особливо в'язкості) серцевини. Температура відпускання на  $80...130^{\circ}\text{C}$  вища, ніж температура майбутнього азотування, що забезпечує відсутність змін структури, властивостей матеріалу та розмірів виробів при довготривалому азотуванні. Після цього виконують основне механічне оброблення, вироби шліфують, гальванічним методом наносять олово на окремі поверхні для захисту їх від азотування.

Процес азотування здійснюється у печах США, США, СГА при температурах  $520...560^{\circ}\text{C}$  у атмосфері аміаку. На поверхні виробів відбувається дисоціація аміаку  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{NH}_2 + 3\text{H}_2$ , атомарний азот абсорбується і в подальшому внаслідок дифузії створюється азотований шар. Швидкість і тривалість азотування залежать від хімічного складу матеріалу, температури азотування та необхідної глибини шару. При  $540^{\circ}\text{C}$  швидкість азотування становить близько  $0,01$  мм/год. Глибина шару, яка призначається на výroбах, знаходиться в межах від  $0,1$  до  $0,6$  мм. Після насичення деталі охолоджуються у печі в атмосфері аміаку до  $200^{\circ}\text{C}$ , а потім на повітрі. Після азотування термічна обробка не проводиться.

У серцевині структура сорбіту відпускання, твердість HRC  $30...36$ , у дифузійному шарі – **нітриди легувальних елементів,  $\epsilon$ -фаза,  $\gamma'$ -фаза та  $\alpha$ -твердий розчин**, твердість азотованих поверхонь  $HV > 850$ .

Азотовані вироби мають низку переваг порівняно із цементованими: значно менша деформація внаслідок низьких температур азотування; більша твердість, яка зберігається при нагріванні виробів до  $450...500^{\circ}\text{C}$  (твердість цементованих виробів знижується при нагріванні вище  $200^{\circ}\text{C}$ ); підвищені зносостійкість, границя витривалості, кавітаційна стійкість, опір корозії у повітрі, прісній воді, водяній парі.

До недоліків азотування необхідно віднести малу швидкість насичення і підвищену крихкість азотованого шару.

Азотування використовують для локальної обробки зубчастих коліс, втулок, гільз, кілець, колінчастих та розподільних валів, плунжерів, кулачків, штоків із метою поєднання високої контактної витривалості, зносостійкості робочих поверхонь і в'язкої серцевини.

### Алітування

Алітуванням називається процес насичення поверхні виробу алюмінієм. Алітують метали та сплави з метою надання їм високої (850...900°C) окалиностійкості та корозійної стійкості в повітрі і морській воді. Після алітування у виробках, нагрітих в окисному середовищі до високих температур, утворюється плівка окису алюмінію  $Al_2O_3$ . Вона має високу щільність, добре з'єднана із металом основи і характеризується низьким значенням коефіцієнтів дифузії як атомів кисню, так і атомів металів, які входять до складу сплаву. Це запобігає окисленню виробів.

Алітують вироби із вуглецевих та легованих сталей, чавунів, жаростійких та жароміцних сталей та сплавів на основі нікелю, титану та інших металів. Алітують, наприклад, деталі газових турбін, термічних технологічних пристосувань, пічної арматури, клапани двигунів внутрішнього згорання, чохли термопар, прес-форми для лиття під тиском, нагрівачі.

Структура алітованого шару маловуглецевих сталей – це твердий розчин заміщення алюмінію у  **$\alpha$ -залізі** та цементит. Концентрація алюмінію після насичення повинна бути біля 30% при товщині шару 0,2...1,0 мм. Мікротвердість алітованого шару не перебільшує  $H_{100} \leq 4000$  МПа, зносостійкість низька.

У відповідності із діаграмою стану ***Fe-Al*** (рис. 5.2) крім  **$\alpha$ -твердого** розчину алюмінію у залізі при алітуванні можливе утворення інтерметалідів  **$Fe_3Al$ ,  $FeAl$ ,  $Fe_2Al_3$ ,  $FeAl_2$ ,  $Fe_2Al_5$ ,  $FeAl_3$** . Внаслідок малої розчинності вуглецю у алюмінієвому фериті він витісняється від поверхні вглибину, що приводить до утворення під шаром  **$\alpha$ -фази** збагаченої вуглецем зони. Усі легувальні елементи, а особливо W, Mo, Ni, Cr зменшують швидкість алітування.

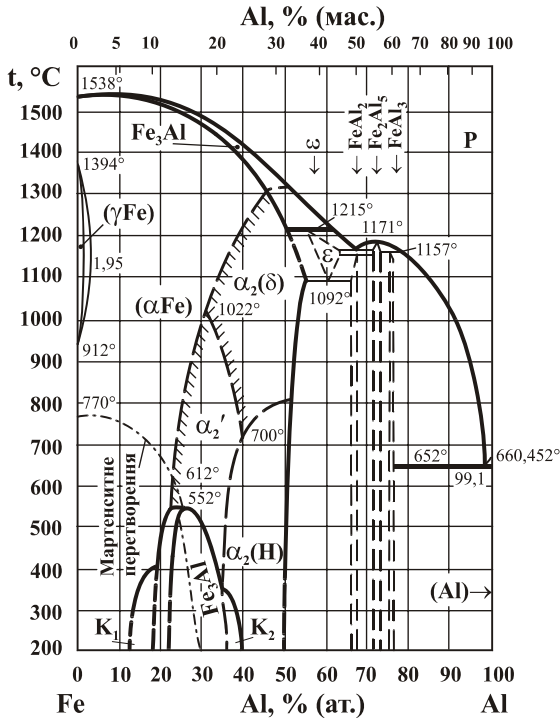


Рисунок 5.2 – Діаграма стану *Fe-Al*

При вмісті алюмінію в шарі більше 30% він стає крихким. Тому для зменшення крихкості, концентрації алюмінію біля поверхні, збільшення глибини шару виробу після алітування відпалюють при 900...1000°C впродовж декількох годин. При цьому товщина шару зростає на 20...40%.

Тривала експлуатація виробів при високих температурах приводить до зниження захисних властивостей алітованого шару. Цьому негативному явищу є пояснення: дифузія атомів алюмінію вглибину приводить до зниження поверхневої концентрації і при вмісті алюмінію менше 8% шар втрачає захисні функції, відбувається зустрічна дифузія атомів заліза, які зменшують концентрацію алюмінію у шарі і на поверхні виробів окислюються. Тому при ремонті машин, установок, двигунів використовують реставраційне (відновлювальне) алітування окремих деталей.

Перед алітуванням поверхню виробів необхідно ретельно очистити від залишків окалини, окислів, забруднень, жирів, тому що від цього залежить якість та ефективність процесу. У машинобудуванні проводять алітування у сумішах порошків, у ваннах із розтопленим алюмінієм, методом металізації, із газової фази, електролізне та безелектролізне у розтоплених солях. Вибір метода залежить від масштабу виробництва, традицій підприємства, наявного обладнання, матеріалу виробів тощо.

**Алітування у суміші порошків.** Використовують декілька сумішей (за масою):

- а) 49,5% порошку алюмінію + 49,5%  $Al_2O_3$  + 1%  $NH_4Cl$ ;
- б) 99,5%  $FeAl$  + 0,5%  $NH_4Cl$ ;
- в) 20%  $Al_2O_3$  + 79,5%  $FeAl$  + 0,5%  $NH_4Cl$ .

Деталі упереміжку із однією із сумішей пакують в сталевих контейнерах, останні герметизують і завантажують у піч. При температурі алітування 950...1000°C відбувається дисоціація хлористого амонію  $NH_4Cl$ :



Взаємодія хлористого водню із алюмінієм приводить до утворення хлоридів алюмінію  $AlCl$ ,  $AlCl_2$ , які на поверхні виробів дисоціюють із утворенням атомарного алюмінію:



Активні атоми алюмінію абсорбуються поверхнею виробів і дифундують, а хлориди  $AlCl_3$  при взаємодії із алюмінієм суміші трансформуються у  $AlCl$  та  $AlCl_2$ , що забезпечує безперервність протікання процесу.

Тривалість процесу 6...12 год., глибина шару 0,25...0,60 мм, охолодження контейнерів у печі або на повітрі. Як зазначалось раніше для зниження поверхневої концентрації алюмінію та усунення крихкості виробу проходять дифузійне відпалення при 900...1000°C впродовж 4...5 год. Важконавантажені виробу для подрібнення зерна і поліпшення властивостей додатково нормалізують (850...880°C).

Суміш використовується багаторазово із додаванням щоразу 10...15% (за мас.) нової суміші або 1%  $NH_4Cl$ .

**Алітування у ваннах із розплавленим алюмінієм.** Температура плавлення алюмінію 660°C, тому алітування за цим методом проводять при 680...800°C на протязі 0,5...1,5 год у сталевих тиглях із

розплавом, насиченим 8...12% заліза. Це необхідно для запобігання розчинення матеріалу виробу. У виробках із вуглецевих сталей при температурі 750°C шар товщиною 0,20...0,25 мм формується за 40...50 хв.

Дифузійне відпалення при 900...1000°C (4...5 год) дозволяє збільшити товщину шару до 0,40...0,45 мм. Порівняно із попереднім методом алітування у розплаві має переваги та недоліки. Переваги: понижена температура алітування; простота процесу. Недоліки: руйнівний вплив розплавленого алюмінію на тигель; налипання алюмінію на поверхні виробів; погіршення шорсткості поверхні виробів внаслідок розчинення матеріалу.

Для усунення цих недоліків та захисту алюмінію від окислення над рідиною створюється шар розплавленого флюсу зі складом: 40%NaCl + 40%KCl + 10%AlFe<sub>3</sub> + 10%Na<sub>2</sub>AlFe<sub>6</sub>. У цьому випадку деталі спочатку витримуються 2...5 хв. у розплавленому флюсі, а потім занурюються у рідкий алюміній.

**Алітування методом металізації** передбачає створення при 20°C за допомогою пневмопульта на поверхні виробів шару порошкового алюмінію товщиною 0,7...1,2 мм. Отриманий шар покривається обмазкою, до якої входять 50% графіту, 20% вогнетривкої глини, 30% SiO<sub>2</sub>, 8% рідкого скла та 2 % NH<sub>4</sub>Cl. Підігріту до 80...100°C обмазку наносять одним із методів (занурюванням, пневматичним розпилюванням, щіткою) до товщини шару 0,8...1,5 мм. Сушаться вироби спочатку на повітрі, потім в печі при температурі 95...105°C.

Дифузійне насичення здійснюється при температурі 900...950°C (температура печі при завантаженні виробів 500...600°C), витримка 2...4 год., охолодження разом із піччю до 600°C, потім на повітрі. Метод дозволяє отримати шар товщиною 0,2...0,4 мм. Технологія характеризується пониженою вартістю порівняно із алітуванням в порошкових сумішах, пониженою шорсткістю поверхні виробів після алітування.

### **Завдання на підготовку до лабораторної роботи**

Вивчити теоретичні основи хіміко-термічної обробки, особливості дифузійного насичення неметалами та металами, сутність процесів, що відбуваються при ХТО. Засвоїти дані про технологію азотування та алітування, основні параметри цих технологічних

процесів, фактори, що впливають на характеристики та якість дифузійних шарів.

Підготувати табл. 5.1, 5.2, 5.3.

При підготовці до виконання лабораторної роботи скористатися [1] с. 135-146, 162-165; [2] с. 258-266, 276-278; [3] с. 239-244, 248; [4] с. 295-299; [6] с. 122-125, 130-133; [7] с. 322-344, 353-357; [8] с. 466-469; [9] с. 238-244, 247-248; [10] с. 99-110.

### **Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи**

1. Які процеси відбуваються при хіміко-термічній обробці ?
2. Мета та призначення азотування. Які сталі піддають азотуванню ?
3. Фази в системі *Fe-N* та їх властивості. Чому азотовані вуглецеві сталі мають порівняно невисоку твердість ?
4. Технологія виготовлення виробів із завершальним азотуванням.
5. Переваги та недоліки азотування порівняно із цементацією. Властивості азотованих виробів.
6. Мета та призначення алітування. Наведіть приклади використання алітування.
7. Структура, фази та властивості алітованого шару.
8. Алітування в порошкових сумішах, складові суміші, сутність реакцій, режим алітування.
9. Технологія алітування в розплаві, її переваги та недоліки.
10. Алітування методом металізації. Які процеси при цьому відбуваються ?
11. Мета та режим відпалення виробів після алітування.

### **Матеріали та обладнання**

Термічні електричні печі; тигель зі сталі; технічно чистий алюміній; флюс складу  $40\%NaCl+40\%KCl+10\%AlFe_3+10\%Na_2AlFe_6$ ; наждачний верстат для зачищення виробів; шліфувальний та полірувальний верстати для підготовки мікрошліфів; 4%-ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті для виявлення мікроструктури азотованих та алітованих зразків; металографічні мікроскопи МІМ-7, зразки зі сталей 38Х2МЮА, 10.

### **Вказівки з техніки безпеки**

Загальні вимоги з техніки безпеки при виконанні лабораторної роботи – додаток А.

### Порядок виконання роботи

Дослідити мікроструктуру та твердість зразків сталі 38Х2МЮА після азотування, визначити глибину шару. Дані досліджень занести в табл. 5.1. Визначити вплив температури та тривалості азотування сталі 38Х2МЮА на твердість та глибину шару. Результати досліджень навести у табл. 5.2.

Таблиця 5.1 – Властивості та структура сталі 38Х2МЮА після азотування

Марка сталі	Попередня термічна обробка	Технологія азотування, глибина шару, мм	Твердість		Мікроструктура	
			Шару, HV	Серцевини, HRC	Шару	Серцевини

Таблиця 5.2 – Залежність твердості та глибини шару від тривалості та температури азотування

Тривалість азотування, год.	Твердість та глибина шару h, мм, після азотування при t, °C							
	500		525		550		600	
	HV	h	HV	h	HV	h	HV	h
10								
20								
30								
40								
50								

Три зразка зі сталі 10 діаметром 8...10 мм та довжиною 50 мм обв'язати дротом зі сталі діаметром 1...1,5 мм. Зразки занурити в розплавлений флюс та витримати в ньому 2...4 хв., після чого опустити їх в розплавлений алюміній і при температурі ванни 750±10 °C витримати 5, 15 та 30 хв. Після алітування зразки охолодити на повітрі і розрізати на частини. Три половини різних зразків завантажити в термічну піч та виконати відпалення при 950...960 °C впродовж 1 год. На шести зразках приготувати

мікрошліфи, дослідити мікроструктуру шару та серцевини, визначити глибину шару в кожному зразку і отримані значення занести в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Залежність глибини алітованого шару від технології алітування

Марка сталі	Температура алітування, °С	Час витримки у флюсі, хв.	Час витримки у розплавленому алюмінії, хв.	Глибина шару, мм	
				Після алітування	Після відпалення 950 °С, 1 год.
10	750	2...4	5		
		2...4	15		
		2...4	30		

### Зміст звіту

Коротко описати мету та сутність азотування та алітування. За отриманими даними (табл. 5.2) побудувати графіки залежності “**Твердість, HV – тривалість азотування, год.**” для чотирьох температур азотування та “**Глибина шару, мм – тривалість азотування, год.**”. Зарисувати мікроструктуру серцевини та шару зразка після азотування, позначити фази та структурні складові.

Описати мікроструктуру зразка та пояснити вплив параметрів процесу азотування на твердість та глибину шару.

За експериментальними даними (табл. 5.3) нарисувати два графіки залежності “**Глибина шару, мм – тривалість алітування, хв.**” безпосередньо після алітування та відпалення. Зарисувати мікроструктуру двох зразків до та після відпалення (час алітування 30 хв.), позначити структурні складові.

Описати структуру алітованих зразків та дати їх характеристику до та після відпалення.

За отриманими результатами досліджень зробити висновки щодо впливу азотування та алітування на структуру та властивості зразків зі сталі.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### Визначення основних параметрів технології термічної обробки виробів

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

#### Загальні відомості

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

До основних параметрів термічної обробки відносяться:

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

#### Вхідні та додаткові дані

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

**Вхідні дані** отримуються безпосередньо із робочого креслення виробу, в якому зазначаються: матеріал та маса виробу; форма, розміри та вимоги щодо шорсткості поверхонь, допуски на розміри та відхилення від геометрії; вимоги до властивостей поверхні, серцевини, окремих ділянок виробу; технологічний метод

виготовлення заготовки та вимоги до властивостей матеріалу заготовки; глибина зміцненого шару та його властивості; конструкційні особливості виробу, наявність концентраторів напружень, різновтовщинність тощо.

**Додаткові дані** розробник технології термічної обробки отримує із довідників, галузевих стандартів, державних та міждержавних стандартів. До цієї групи даних належать: хімічний склад матеріалу; температури критичних точок, початку та завершення мартенситних перетворень; теплофізичні характеристики матеріалу виробу (теплоємність, тепло- та температуропровідність); густина матеріалу; технологічні характеристики матеріалу виробу (зварюваність, ливарні властивості, деформовність в гарячому та холодному станах, оброблюваність різанням, загартовуваність, прогартовуваність, схильність до водневої та зворотної відпускнуї крихкості, схильність до знеуглецювання та росту аустенітного зерна тощо); схильність виробу до деформації та жолоблення при термічній обробці. Використовуються також: діаграми стану сплавів, до яких відносяться матеріал виробу; діаграми ізотермічного та термокінетичного перетворення високотемпературних фаз; кінетичні криви розпаду пересичених твердих розчинів при різних температурах. Особливе місце в цій групі даних посідають довідкові дані щодо рекомендованих (типових) режимів термічної (хіміко-термічної) обробки матеріалу виробу, або групи аналогічних матеріалів та виробів.

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

### **Визначення температур термічної обробки**

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

енергоносії, скорочується цикл виготовлення виробів, зменшується ймовірність жолоблення та утворення тріщин.

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

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

Загальний час перебування виробів визначається за рівнянням:

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

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

$\tau_{\text{в}}$  - тривалість витримки для наскрізного прогрівання;

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

$\tau_{\text{о}}$  - тривалість охолодження виробів із піччю до передбаченої технологією температури.

Тривалість нагрівання визначається за спрощеною емпіричною залежністю:

$$\tau = S \cdot k \cdot L \cdot f.$$

Значення та сутність коефіцієнтів можна отримати в [12].

Витримка  $\tau_v$  необхідна для усунення перепаду температур між поверхнею та центром виробу  $i$ , як наслідок, забезпечення після термічної обробки однорідних структури та властивостей в різних точках перерізу виробу. Перепад температур після нагрівання впродовж  $\tau_n$  залежить від умов передачі тепла ( $\alpha$ ), а також теплопровідності матеріалу виробу ( $\lambda$ ) та характеристичного розміру виробу ( $S$ ). Зазначені величини використовуються при розрахунках критерія Біо:  $Bi = \alpha \cdot S / \lambda$ . Час витримки можна визначити за співвідношенням  $\tau_v = (0,05 \dots 0,20) \tau_n$ . Менші значення приймаються для виробів та умов нагрівання із  $Bi < 0,25$ , більші - при  $Bi \geq 0,25$ .

Тривалість технологічної витримки може бути розрахована або визначена за довідковою літературою. Наприклад, коли при нітроцементації необхідно отримати шар  $h = 0,5 \dots 0,7$  мм за умови, що швидкість процесу  $v_{\text{нцм}} = 0,15$  мм/год,  $\tau_{\text{тех}} = h / v_{\text{нцм}} = 0,6 / 0,15 = 4$  год. У випадку довготривалих дифузійних процесів при гомогенізації, відпаленні, старінні, тривалість яких розрахувати неможливо, користуються в кожному конкретному випадку експериментальними або довідковими даними. Так, наприклад, природне старіння сплаву Д16 триває 4...7 дб, старіння сплаву ЖС6К при 750...800°C – 16 год.

Охолодження із нагрівальними пристроями здійснюється при відпаленні, після азотування тощо. Тривалість охолодження визначається за рівнянням:

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

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

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

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

### **Визначення складу, параметрів робочих середовищ та їх витрат**

Вибір складу робочих середовищ залежить від операції термічної обробки, вибраного обладнання, виду додаткової операції. В процесі нагрівання та охолодження як робочі середовища використовують гази, рідини, тверді тіла та їх частинки, а також вакуум. Гази – це повітря, азот, аргон, водяна пара, ендогаз, аміак,

екзогаз, азотоводнева суміш; рідини – розплавлені солі, луги та метали, олія, вода, водні розчини солей; частини твердих тіл – кварцовий пісок, графіт, корунд, карборунд.

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

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

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

### **Швидкість нагрівання та охолодження на різних стадіях обробки**

Перш за все необхідно визначитись із тим, при виконанні яких операцій (переходів) швидкість нагрівання (охолодження) не впливає на структуру, якість, жолоблення, властивості, тому може бути довільною (технічно можливою), а для яких операцій (переходів) вона повинна мати певне значення (тобто бути технологічно обумовленою).

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

### **Розробка схеми садки на визначення її маси**

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

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

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

### **Завдання на підготовку до лабораторної роботи**

Вивчити основні види термічної обробки, їх призначення і особливості, основні параметри операцій термічної обробки та їх кількісні характеристики, ознайомитись із основним та додатковим обладнанням для термічної обробки, його технічними характеристиками. Засвоїти методики визначення основних параметрів термічної обробки конкретних виробів, знати причини, що впливають на якість термічної обробки виробів.

При підготовці до виконання лабораторної роботи скористатися [1] с. 7, 37-49; [3] с. 313-348; [7] с. 105-122; [10] с. 13-15; [12] с. 12-22.

### **Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи**

1. Які вхідні дані необхідні для розробки режиму та технології термічної обробки виробу ?
2. Яку додаткову інформацію необхідно отримати перед визначенням основних параметрів термічної обробки ?
3. Наведіть перелік основних параметрів термічної обробки виробів і зробіть їх короткий аналіз.
4. Які чинники впливають на вибір температур операцій термічної обробки ? Як визначаються ці температури ?

5. Які складові входять до загального часу перебування виробів у нагрівальних пристроях та іншому обладнанні ? Охарактеризуйте кожну із них і методику визначення.
6. Що впливає на вибір складу робочих середовищ та їх основних параметрів ? Наведіть склади робочих середовищ (речовин) для нагрівання, цементації, азотування, нітроцементації, високотемпературного відпускання, алітування, охолодження, промивання, очищення від окалини тощо.
7. Від чого залежить та як визначається швидкість нагрівання, охолодження виробів при виконанні різних операцій термічної обробки ?
8. Яким чином схема розташування виробів, маса садки впливають на основні параметри термічної обробки ?
9. Охарактеризуйте в цілому методику вирішення задачі по визначенню основних параметрів термічної обробки виробу.

### **Матеріали та обладнання**

Термічні електричні печі; твердомір ТК-2; наждачний верстат для зачищення зразків; шліфувальний та полірувальний верстат для приготування мікрошліфів; реактиви для травлення та виявлення мікроструктури різних за хімічним складом матеріалів; металографічний мікроскоп МІМ-7; зразки із різних сталей та сплавів.

### **Вказівки з техніки безпеки**

Загальні вимоги з техніки безпеки при виконанні лабораторної роботи – додаток А.

### **Порядок виконання роботи**

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

- обґрунтувати вибір технологічного методу виготовлення заготовки;
- запропонувати режими попередньої, основної і додаткової термічної обробки заготовки та виробу;
- для кожної із зазначених обробок визначити і пояснити основні параметри термічної обробки, здійснити вибір обладнання;

- навести схеми садок, визначити кількість виробів в садці та масу садки.

Для наданих зразків здійснити запропоновану термічну обробку (попередню, основну, додаткову – за завданням викладача), дослідити мікроструктуру та властивості.

### **Зміст звіту**

Коротко описати основні та додаткові вхідні дані, основні та додаткові параметри термічної обробки виробів.

Охарактеризувати наданий для виконання самостійної частини роботи виріб, його матеріал, технічні вимоги та вимоги до форми і розмірів. Навести додаткові вхідні дані, що використані для визначення параметрів термічної обробки.

Детально описати послідовність визначення основних параметрів технології термічної обробки виробу (температури, швидкості нагрівання (охолодження), тривалості, складу та параметрів робочого середовища тощо). При цьому необхідно коротко охарактеризувати зміни у структурі, фазовому, хімічному складі, властивостях матеріалу.

Описати результати термічної обробки наданих зразків, співставити отримані властивості та структуру із технічними вимогами робочого креслення виробу та із вхідними структурою і властивостями матеріалу виробу.

По виконаній роботі зробити висновки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Самохоцкий А.М., Парфеновская Н.Г. Технология термической обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1976. – 310 с.
2. Натапов Б.С. Термическая обработка металлов. – К.: Вища школа, 1980. – 286 с.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1980. – 528 с.
4. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – 480 с.
6. Паисов И.В. Термическая обработка стали и чугуна. – М.: Металлургия, 1970. – 262 с.
7. Термическая обработка в машиностроении: Справочник /Под ред. Лахтина Ю.М. и Рахштадта А.Г. – М.: Машиностроение, 1980. – 782 с.
8. Новиков И.И. Теория термической обработки. - М.: Металлургия, 1986. – 479 с.
9. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 407 с.
10. Башнин Ю.А., Ушаков Б.К., Секей А.Г. Технология термической обработки стали. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
11. Люты В. Закалочные среды: Справочное издание. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 192 с.
12. Методичні вказівки до виконання комплексної курсової роботи з дисципліни “Теорія і технологія термічної обробки” /Укл.: Климов О.В., Лазечний І.М., Кононенко Ю.І. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 38 с.
13. Матеріалознавство і технологія матеріалів : підручник: [для вищих навч. закл.] / Н.В. Мережко, Н.К. Зіміна, С.О. Сіренко, О.І. Сім'ячко. - К. : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2010.-352 с.
14. Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя [Текст] / НАН України. Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства; відп. ред. І.К. Походня [та ін.]. - К. : Наукова думка, 1998. - 658 с.

## Додаток А

### Правила техніки безпеки

при виконанні лабораторних робіт із дисципліни “Термічна обробка” в лабораторії термічної обробки кафедри фізичного матеріалознавства

1. Практична частина лабораторних робіт виконується студентами лише в присутності викладача.
2. Перед проведенням конкретних робіт викладач звертає увагу студентів на небезпечні та шкідливі фактори.
3. При виконанні термічної обробки зразків необхідно:
  - завантажувати та вивантажувати зразки за допомогою кліщів і лише при відключенні від електричної мережі печі;
  - дотримуватись правил пожежної безпеки при охолодженні зразків в олії (зразки в олію занурювати повністю; не здійснювати одночасне гартування великої маси зразків; в лабораторії обов’язково повинні бути справними первинні засоби пожежогасіння);
  - використовувати рукавиці при завантаженні та вивантаженні зразків;
  - забезпечити наявність резинового килимка на підлозі.
4. У випадку загорання в лабораторії вжити заходів по його усуненню за допомогою первинних засобів пожежогасіння. Коли це неможливо, студенти повинні покинути лабораторію, а викладач зобов’язаний вжити усіх заходів по гасінню пожежі.
5. При шліфуванні та поліруванні зразків користуватися окулярами для запобігання травмування очей.
6. При травленні зразків у водних або спиртових розчинах лугів, солей, кислот остерігатись їх попадання на відкриту шкіру та очі. Якщо це трапилось, необхідно промити забруднені розчином місця водою.
7. При виявленні несправності обладнання або його заземлення студенти повинні негайно припинити виконання роботи та повідомити викладача.
8. По завершенні практичної частини лабораторної роботи необхідно відключити обладнання від електричної мережі, перевірити, щоб зразки після термічної обробки були охолоджені до кімнатної температури, а заслінки печей були закритими.