

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи

з дисципліни «Технологічні процеси та комплекси зміцнення та  
відновлення деталей машин» для студентів спеціальності

131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Відновлення та  
підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» всіх форм навчання

Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Технологічні процеси та комплекси зміцнення та відновлення деталей машин» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» всіх форм навчання / Укл. М.М. Бриков. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 18 с.

Укладачі: М.М. Бриков, д-р техн. наук, проф.

Рецензент: О. Г. Биковський, д-р техн. наук, проф.

Редактор: І.П. Аверченко

Відповідальний за випуск: М.М. Бриков, д-р техн. наук, проф.

Помічник завідуючого кафедрою з методичної роботи:  
С.М. Попов д. ф. н., проф.

Затверджено

на засіданні кафедри ОТЗВ

Протокол № 2 від 20.10.2021

Рекомендовано до видання

НМК ІФФ

Протокол № 3 від 09.11.2021

**ЗМІСТ**

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 1 Мета та завдання дисципліни.....  | 4  |
| 2 Структура і зміст дисципліни..... | 4  |
| 3 Контрольні питання.....           | 7  |
| 4 Додаткові питання.....            | 14 |
| 5 Перелік лабораторних робіт .....  | 14 |
| 6 Теми контрольних робіт.....       | 14 |
| 7 Рекомендована література .....    | 16 |

## **1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ**

Метою дисципліни є надання знань фундаментальних положень теорії зміцнення матеріалів, яку покладено в основу технологій зміцнення і відновлення деталей машин. Завданнями дисципліни є послідовне викладення лекційного курсу, проведення лабораторних робіт і контроль самостійної роботи студентів.

## **2 СТРУКТУРА І ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ**

Тема 1 – 4 год.

Вступ. Важливість дисципліни для сучасного машинобудування.

Деформація та руйнування матеріалів. Фізичні характеристики матеріалів, які характеризують їх пружну деформацію під навантаженням.

Теоретична та реальна міцність матеріалів. Вплив дефектів кристалевої структури на міцність матеріалів. Механізм пластичної деформації. Плинність матеріалу під навантаженням.

Можливі шляхи підвищення міцності з точки зору дефектності кристалевої структури. Фізичні явища, які обумовлюють можливість зміцнення матеріалів. Процеси, що використовують для зміцнення (механічний наклеп, фазовий наклеп, подрібнення структури, старіння, гартування).

Тверді розчини. Різновиди твердих розчинів. Залізо і його кристалічні форми. Розчинність вуглецю в залізі різної кристалічної форми. Побудова діаграми Fe-C. Структурні складові залізовуглецевих сплавів.

Дифузія. Коефіцієнт дифузії. Залежність коефіцієнту дифузії атомів різних елементів в різних типах кристалевих

граток. Температурна межа можливості дифузійного руху атомів вуглецю в твердих розчинах. Температурна межа можливості дифузійного руху атомів заліза в твердих розчинах. Дифузійне та бездифузійне перетворення.

Самостійна робота – 14 годин.

Література: 1, 2, 5, 9

Тема 2 – 2 год.

Визначення термічної обробки. Варіанти класифікації видів термічної обробки (дифузія або тип технологічної операції).

Відпал і його різновиди. Нормалізація. Патентування. Вплив розміру зерна на міцність. Залежність Хола-Петча. Механічні властивості матеріалів після відпалу.

Вільна енергія фаз. Побудова діаграми ізотермічного розпаду аустеніту.

Гартування і його різновиди. Гартування без поліморфного перетворення. Матеріали, які піддають гартуванню без поліморфного перетворення. Гартування з поліморфним перетворенням. Критична швидкість охолодження під час гартування. Характерні особливості мартенситного перетворення в залізовуглецевих сплавах. Охолодження під час гартування. Напруги, що виникають через гартування. Середовища, які застосовують для гартування та їх характеристики. Способи гартування. Зміна властивостей сплавів після гартування на мартенсит. Вплив вуглецю і легувальних елементів на твердість і міцність загартованих сталей.

Самостійна робота – 10 год.

Література: 1, 2, 5, 9, 11

Тема 3 – 2 год.

Вплив хімічного складу аустеніту перед охолодженням на параметри процесів дифузійного перетворення під час

охолодження. Мартенсит деформації. Температури  $M_p$  та  $M_d$  та їх співвідношення.

Особливості нагрівання і охолодження під час гартування сталей.

Гартування СВЧ. Вплив швидкості нагрівання на температуру фазових перетворень. Діаграми режимів обробки СВЧ.

Самостійна робота – 12 год.

Література: 1, 2, 9, 10, 13, 14

Тема 4 – 2 год.

Відпускання. Структурні перетворення під час відпускання загартованих сталей. Вплив легування на параметри процесу відпускання сталей. Зміна механічних властивостей під час відпускання сталей і вибір режиму відпускання. Відпускна крихкість і як її усунути.

|                              |           |           |
|------------------------------|-----------|-----------|
| Старіння пересичених         | твердих   | розчинів. |
| Мартенситностаріючі сталі.   | Режими    | зміцнення |
| мартенситностаріючих сталей. | Зміцнення | старінням |

дуралюмінів.

Самостійна робота – 10 год.

Література: 1, 2, 5, 9, 11

Тема 5 – 2 год.

Бейніт в сталях. Різновиди бейніту. Процеси, які перебігають у структурі під час бейнітного перетворення. Вплив вмісту вуглецю і температури ізотермічної витримки на параметри процесу бейнітного перетворення. Властивості бейніту.

Самостійна робота – 12 год.

Література: 1, 2, 5, 9, 11, 15

Тема 6 – 6 год.

Визначення термомеханічної обробки. Різновиди термомеханічної обробки. Порівняльний аналіз НТМО і ВТМО.

Розгляд НТМО. Параметри НТМО. Фактори, які впливають на результати НТМО. Вплив НТМО на опірність втомі.

Рекристалізація. Процеси, які перебігають під час рекристалізації. Статична рекристалізація. Діаграми статичної рекристалізації. Динамічна рекристалізація. Діаграма динамічної рекристалізації.

Розгляд ВТМО. Рекомендації з проведення ВТМО.

Розгляд різновидів термомеханічної обробки:  $VTM_{I_3O}$ ,  $TM_{I_3O}$ ,  $PTMO$ .

Промислове устаткування і комплекси, які використовують для ТМО. Можливості проведення ТМО у технологічному циклі підприємства.

Різновиди технологічних процесів зміцнення і відновлення деталей машин. Екзотичні методи зміцнення: вибухом і т.і.

Самостійна робота – 18 год.

Література: 3, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 14, 15

### **З КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. Аустеніт це:

- а) твердий розчин вуглецю в ОЦК гратці;
- б) твердий розчин вуглецю у ГЦК гратці;
- в) твердий розчин вуглецю та інших елементів в ОЦК гратці;
- г) твердий розчин вуглецю та інших елементів у ГЦК гратці

2. Що відбувається з залізом при температурі 911 °С?

- а) топлення (кристалізація);
- б)  $\alpha$ – $\gamma$  ( $\gamma$ – $\alpha$ ) перетворення;
- в) виникнення (зникнення) магнітних властивостей;
- г) випаровування (конденсація).

3.  $\alpha$  – залізо має тип ґратки:

- а) ОЦК;      б) ГЦУ;      в) ГЦК;      г) інше (пояснити).

4.  $\gamma$  – залізо має тип ґратки:

- а) ОЦК;      б) ГЦУ;      в) ГЦК;      г) інше (пояснити).

5. Максимальна розчинність вуглецю у фериті складає (% мас):

- а) 0,001;      б) 0,02;      в) 0,3;      г) 4,0.

6. Максимальна розчинність вуглецю в аустеніті складає (% мас):

- а) 0,80;      б) 2,14;      в) 4,30;      г) 6,67.

7. Температура евтектоїдного перетворення в системі Fe-C складає (°C):

- а) 1539;      б) 1493;      в) 1147;      г) 727.

8. Температура евтектичного перетворення в системі Fe-C складає (°C):

- а) 1539;      б) 1493;      в) 1147;      г) 727.

9. Скільки видів загартовування розрізняють з точки зору класифікації термічної обробки?

- а) один;      б) два;      в) три;      г) інше.

10. З підвищенням температури коефіцієнт дифузії:

- а) збільшується;  
б) зменшується;  
в) не змінюється;  
г) залежність має складну форму у різних температурних інтервалах.

11. Оберіть з нижчеперерахованого найбільш відповідну температуру для гомогенізуючого відпалу нелегованих сталей (°C):

- а) 700;      б) 800;      в) 900;      г) 1000.

12. Для отримання загартованого стану сталь необхідно охолодити зі швидкістю:

- а) менше, або рівної критичній;  
б) більше, або рівної критичній;  
в) рівної критичній;

г) інше (пояснити).

13. При збільшенні вмісту вуглецю у заевтектоїдних сталях температура нагрівання під загартовування на максимальну твердість:

а) збільшується;

б) не змінюється;

в) знижується;

г) інше (пояснити).

14. Від чого у загальному випадку залежить температура початку мартенситного перетворення?

а) від вмісту вуглецю і інших легувальних елементів в сталі (сплаві);

б) від вмісту вуглецю та інших легувальних елементів в аустеніті перед загартовуванням;

в) від розміру деталі;

г) від швидкості охолодження.

15. З підвищенням швидкості нагрівання під загартовування (загартовування СВЧ) температура фазового переходу:

а) не змінюється;

б) підвищується;

в) знижується;

г) інше (пояснити).

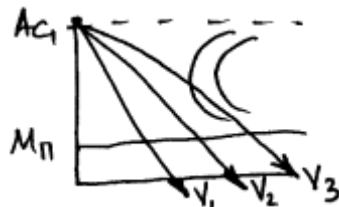
16. Вкажіть швидкість охолодження, за допомогою якої буде отримано мартенсит:

а)  $V_1$ ;

б)  $V_2$ ;

в)  $V_3$ ;

г) інше (пояснити).



17. Вкажіть оптимальну швидкість загартовування з наведених на малюнку до питання № 16:

а)  $V_1$ ; б)  $V_2$ ;

в)  $V_3$ ;

г) інше (пояснити).

18. З яких напружень складаються гартувальні напруження?

- а) термічні;
- б) структурні;
- в) термічні і структурні;
- г) інше (пояснити).

19. Як змінюється об'єм при мартенситному перетворенні?

- а) зменшується;
- б) збільшується;
- в) не змінюється;
- г) інше (пояснити).

20. При збільшенні температури нагрівання під загартовування сумарні гартувальні напруження:

- а) збільшуються;
- б) зменшуються;
- в) не змінюються;
- г) інше (пояснити).

21. При підвищенні швидкості охолодження при загартовуванні сумарні гартувальні напруження:

- а) ростуть;
- б) зменшуються;
- в) не змінюються;
- г) інше (пояснити).

22. Яка швидкість охолодження у воді ( $t_{\text{води}} \sim 70^{\circ}\text{C}$ ) в інтервалі температур  $650 - 550^{\circ}\text{C}$ ?

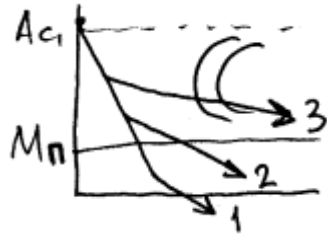
- а)  $30^{\circ}\text{C/s}$ ;
- б)  $300^{\circ}\text{C/s}$ ;
- в)  $600^{\circ}\text{C/s}$ ;
- г)  $1000^{\circ}\text{C/s}$ .

23. Яке з охолоджуючих середовищ дозволяє отримати максимальну швидкість охолодження?

- а) вода; б) р-р NaOH у воді; в) мінеральне мастило; г) повітря.

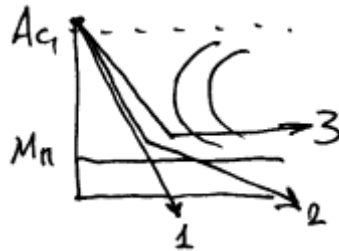
24. З вказаних режимів охолодження при гартуванні на мартенсит оберіть оптимальний:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) всі.



25. З вказаних режимів гартування оберіть той, який дозволяє отримати бейніт:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) інше (пояснити).



26. Вкажіть граничний вміст вуглецю у сталі, після досягнення якого твердість загартованої сталі припиняє інтенсивно збільшуватися при подальшому збільшенні вмісту вуглецю:

- а) 0,2%;
- б) 0,6%;
- в) 0,8%;
- г) 1,2%

27. Вкажіть вміст вуглецю у мартенситі, при якому досягається максимальна міцність:

- а) 0,2 – 0,3%;
- б) 0,4 – 0,5%;
- в) 0,6 – 0,8%;
- г) 1,0 – 1,2%;

28. Основним процесом, що відбувається при відпусканні вуглецевих сталей, є:

- а) утворення мартенситу;
- б) утворення аустеніту;
- в) розпад мартенситу;
- г) інше (пояснити).

29. До якої температури відпуску зберігається відпущений мартенсит у вуглецевих сталях?

- а) 100°C;      б) 300°C;      в) 500°C;      г) інше (пояснити).

30. Як впливають легувальні елементи (Cr, W, Mo, V, Co, Si) на максимальну температуру, при якій зберігається відпущений мартенсит?

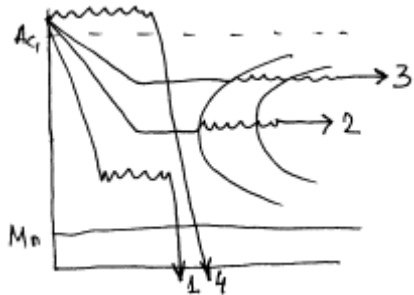
- а) підвищують;      б) знижують;
- в) не впливають;      г) інше (пояснити).

31. Вкажіть температурний інтервал виникнення незворотної відпускної крихкості:

- а) 150 – 250°C;
- б) 250 – 400°C;
- в) 400 – 550°C;
- г) 550 – 650°.

32. Вкажіть режим ВТМО:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4.



33. Вкажіть режим НТМО:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4.

34. Порівняйте температури  $M_n$  і  $M_d$ :

- а)  $M_n < M_d$ ;
- б)  $M_n = M_d$ ;
- в)  $M_n > M_d$ ;
- г) можливі всі варіанти при відповідному хімічному складі сплаву.

35. При збільшенні швидкості нагрівання температура фазового перетворення:

- а) знижується;
- б) підвищується;
- в) не змінюється;
- г) можливі різні варіанти (пояснити).

36. Вкажіть температуру деформування під час НТМО:

- а) 100 °C;                      б) 500 °C;                      в) 700 °C;                      г) 1000 °C;

37. Вкажіть температуру деформування під час ВТМО:

- а) 100° C;                      б) 500° C;                      в) 700° C;                      г) 1000° C;

38. Які сталі піддають НТМО?

- а) тільки нелеговані вуглецеві;
- б) нелеговані вуглецеві та низьколеговані;
- в) середньо- та високолеговані;
- г) інше (пояснити).

39. Які сталі піддають ВТМО?

- а) тільки нелеговані вуглецеві;
- б) нелеговані вуглецеві та низьколеговані;
- в) середньо- та високолеговані;
- г) інше (пояснити).

40. Яке явище полягає в основі зміцнення за рахунок старіння?

- а) мартенситне перетворення пересиченого твердого розчину;
- б) дифузійний розпад пересиченого твердого розчину з утворенням дисперсних виділень нових фаз;
- в) механічний наклеп;
- г) інше (пояснити)

## **4 ДОДАТКОВІ ПИТАННЯ**

1. Режим термообробки сталі 110Г13?
2. Твердість сталі 110Г13 після термообробки.
3. Твердість сталі 110Г13 після термообробки і пластичної деформації.
4. У чому принципова відмінність діаграм статичної і динамічної рекристалізації?
5. Процеси, що відбуваються під час рекристалізації.
6. Чи можливо загартувати чисте залізо? Відповідь обґрунтувати.
7. Що таке критична ступінь пластичної деформації?
8. Механізм зміцнення при пластичній деформації.
9. Як змінюються  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta$ ,  $\psi$  при збільшенні ступеню пластичної деформації?

## **5 ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

1. Вивчення характеристик міцності матеріалів.
2. Визначення температурних меж дифузії (самодифузії) для атомів металів і вуглецю в фериті і аустеніті.
3. Визначення оптимальної температури нагрівання під гартування сталі заданого хімічного складу.

## **6 ТЕМИ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ**

1. Залізо і його кристалічні форми. Структурні складові залізовуглецевих сплавів. Розчинність вуглецю в залізі різної кристалічної форми. Побудова діаграми Fe – C.

2. Дифузійне та бездифузійне перетворення. Побудова діаграми ізотермічного розпаду аустеніту.

3. Відпал і його різновиди. Нормалізація. Патентування. Вплив розміру зерна на міцність. Залежність Хола-Петча.

4. Гартування і його різновиди. Гартування без поліморфного перетворення. Матеріали, які піддають гартуванню без поліморфного перетворення. Старіння. Зміцнення дюралюмінів.

5. Гартування і його різновиди. Гартування з поліморфним перетворенням. Критична швидкість охолодження під час гартування. Характерні особливості мартенситного перетворення в залізовуглецевих сплавах.

6. Механічні властивості матеріалів після відпалу і гартування. Вплив хімічного складу аустеніту перед охолодженням на параметри процесів дифузійного перетворення під час охолодження.

7. Мартенсит деформації. Температури  $M_s$  та  $M_d$  та їх співвідношення. Гартування ТВЧ. Вплив швидкості нагрівання на температуру фазових перетворень.

8. Охолодження під час гартування. Напруження, що виникають через гартування. Середовища, які застосовують для гартування та їх характеристики.

9. Способи гартування. Зміна властивостей сплавів після гартування на мартенсит. Вплив вуглецю і легувальних елементів на твердість і міцність загартованих сталей.

10. Відпускання. Структурні перетворення під час відпускання загартованих сталей. Вплив легування на параметри процесу відпускання сталей.

11. Зміна механічних властивостей під час відпускання сталей і вибір режиму відпускання. Відпускна крихкість і як її усунути.

12. Вплив дефектів кришталевої структури на міцність матеріалів. Можливі шляхи підвищення міцності з точки зору дефективності кришталевої структури.

13. Визначення термомеханічної обробки. Різновиди термомеханічної обробки. Порівняльний аналіз НТМО і ВТМО.

14. НТМО сталей. Параметри НТМО. Фактори, які впливають на результати НТМО. Вплив НТМО на опірність втомі.

15. Зміцнення металевих матеріалів пластичною деформацією. Механізм зміцнення при пластичній деформації.

16. Рекристалізація. Процеси, які перебігають під час рекристалізації. Статична рекристалізація. Діаграми статичної рекристалізації. Динамічна рекристалізація. Діаграма динамічної рекристалізації.

17. ВТМО сталей. Рекомендації з проведення ВТМО. Вплив ВТМО на властивості сталей.

18. Різновиди термомеханічної обробки: ВТМІ<sub>3</sub>O, ТМІ<sub>3</sub>O, ПТМО.

19. Промислове устаткування і комплекси, які використовують для ТМО. Можливості проведення ТМО у технологічному циклі підприємства.

20. Технологія отримання бейніту. Особливості утворення бейнітної структури в залежності від хімічного складу аустеніту та температури бейнітного перетворення. Властивості бейніту.

## **7 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов.— 3-е изд., перераб. и доп.— М. : Metallurgiya, 1978.— 392 с.

2. Блантер М.Е. Теория термической обработки. - М.: Металлургия, 1984. 328 с.

3. Бернштейн М. Л., Термомеханическая обработка металлов и сплавов, т. 1—2, М., 1968.

4. М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капуткина. Термомеханическая обработка стали. — М.: «Металлургия», 1983.

5. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов: Учебное пособие-справочник / Под редакцией В.Д. Евдокимова. — Одесса Николаев: Изд-во НГТУ им. Петра Могилы, 2005. — 352 с.

6. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1990. — 306 с.

7. Шаврин О.И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. — М.: Машиностроение, 1983. — 176 с.

8. Третьяков В.А., Трофимов Г.К., Гурьянова М.К. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. — М.: Машиностроение, 1971 — 64 с.

9. Гуляев А.П. Металловедение. — М.: Metallurgia, 1986. — 544 с.

10. Шепеляковский К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М. : "Машиностроение", -1972, -288с.

11. Зоткин В.Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении. — М.: Высшая школа, 2004. — 264 с.

12. Косторнов А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов: в 2 т. / НАН Украины, Ин-т проблем материаловедения им. И.Н.Францевича — К. : Наукова думка, 2002. — 570 с.

13. Филиппов М. А. Стали с метастабильным аустенитом / Филиппов М. А., Литвинов В. С., Немировский Ю. Р. — М. : Metallurgia, 1988. — 256 с.

14. Малинов Л.С., Малинов В.Л. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии,

обеспечивающие эффект самозакалки : Монография / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов. – Мариуполь : Изд-во «Рената», 2009. – 568 с.

15. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steels. Transformations, microstructure and properties (Second edition) / H.K.D.H. Bhadeshia. - IOM Communications Ltd., 2001. - 478 p.