

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний
університет

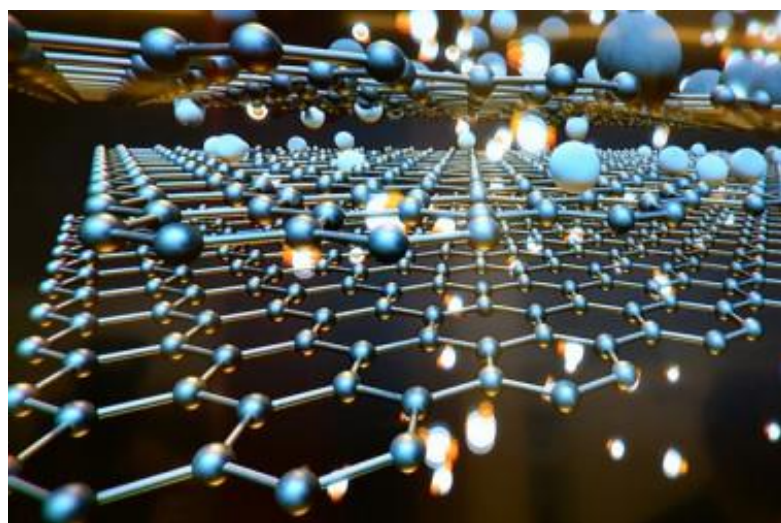
Кафедра “Матеріалознавство та ливарне виробництво”



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з курсу
“Порошкові та композиційні матеріали”

для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство”



Кропивницький 2025

Порошкові та композиційні матеріали. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Порошкові та композиційні матеріали" для студентів спеціальності 131 "Матеріалознавство". / Укл.: О. В. Скрипник, С. І. Шматько – Кропивницький: ЦНТУ, 2025. – 96 с.

Укладачі: О. В. Скрипник – канд. техн. наук, доцент

С. І. Шматько - фахівець 1 категорії, інженер кафедри

Рецензент: В. М. Кропівний – канд. техн. наук, професор

© Скрипник О.В.

© Тиражування РВЛ ЦНТУ

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра "Матеріалознавство та ливарне виробництво"

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання лабораторних робіт
з курсу "Порошкові та композиційні матеріали"**

для студентів спеціальності 132 "Матеріалознавство"

Затверджено на засіданні кафедри
"Матеріалознавство та ливарне виробництво"
протокол № 1 від 26. 08. 2025 р.

Кропивницький 2025

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	4
1. Визначення технологічних властивостей порошків.....	6
2. Визначення гранулометричного складу порошків методом ситового аналізу.....	11
3. Визначення гранулометричного складу порошків мікроскопічним методом.....	15
4. Вивчення структури та властивостей порошкових матеріалів з конструкційних легованих сталей	18
5. Антифрикційні матеріали.....	37
6. Визначення ударної в'язкості зразків порошкових та композиційних матеріалів.....	44
7. Визначення твердості матеріалу.....	50
8. Дослідження на втому зразків що працюють в умовах згину з крученням.....	61
9. Вивчення будови, властивостей і застосування в промисловості термопластичних та термореактивних пластмас.....	67
10. Вивчення будови і експлуатаційних характеристик композиційних матеріалів з полімерними матрицями.....	78
11. Вивчення клеїв, клейових з'єднань і герметиків.....	86
12. Дослідження структури та властивостей інтелектуальних композиційних матеріалів.....	90
Література.....	95

ВСТУП

Курс **"Порошкові та композиційні матеріали"** складається із двох змістових модулів: модуль 1 **"Порошкові матеріали"** – 7 тижнів; модуль 2 **"Композитні матеріали"** – 7 тижнів.

Методичні вказівки охоплюють питання модулів 1 і 2.

Проведення практичної роботи, оформлення і захист звіту

Лабораторні роботи проводяться під керівництвом викладача. В основу кожної лабораторної роботи покладено принцип максимальної самостійності студентів. Початку роботи передуює бесіда, у якій студенти одержують інструктаж з техніки безпеки і розписуються у відповідному журналі. Перед виконанням чергової роботи викладач перевіряє підготовку студентів до занять, повідомляє деякі теоретичні відомості, які відносяться до даної роботи. При виконанні лабораторної роботи студенти проводять експерименти та заносять результати у відповідні файли, виконують їх обробку і редагування. По закінченню роботи складається звіт. Оформлений звіт захищається студентом перед початком наступної роботи. Студенти, які пропустили лабораторну роботу, виконують її наприкінці семестру поза розкладом, за спеціальним графіком.

Звіт включає наступне:

- назва лабораторної роботи та мета її виконання;
- теоретичні відомості;
- опис матеріалів та обладнання, методики проведення експериментів;
- аналіз отриманих результатів, висновки, обґрунтування прийнятих рішень.

Порядок проведення поточного, і семестрового контролю

При вивченні курсу **"Порошкові та композиційні матеріали"** використовуються такі види контролю: вхідний, поточний, підсумковий. Вхідний

контроль проводиться на початку вивчення дисципліни і передбачає оцінку знань студентів на початку вивчення курсу.

Поточний контроль передбачає перевірку рівня засвоєння визначеної системи елементів знань та вмінь студента з тієї чи іншої теми. Поточний контроль проводиться під час лекцій, лабораторних занять або в позааудиторний час. Студент допускається до складання поточного контролю *за умови* повного виконання завдань, передбачених робочою навчальною програмою. Проведення поточного контролю проводиться у *тестовій* формі. Результати перевірки тестових контрольних завдань доводяться до відома студентів після проведеного поточного контролю.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРОШКІВ

Мета роботи – навчитися визначати насипну густину, густину після струшування, плинність, пресуємість металевих порошків

Теоретичні відомості

Насипною густиною порошку називається густина вільнонасипаного порошку. Насипна густина виражає здатність частинок порошку до укладання і залежить від питомої густини даного металу і фактичного заповнення порошком певного об'єму. Щільність укладання частинок порошку в об'ємі залежить від дисперсності, форми і питомої поверхні частинок. Оскільки насипна густина є дуже важливою характеристикою, що впливає на технологію виготовлення, то її вказують у всіх технічних умовах на металеві порошки, а метод її визначення стандартизовано. Насипну густину визначають за допомогою приладу, який називається *волюмометром* (рис. 1.1), який забезпечує однакові умови засипання [1]. Засипання порошку у волюмометр ведеться через велику приймальну воронку 1. З малої воронки 2 частинки порошку падають на систему пластин.

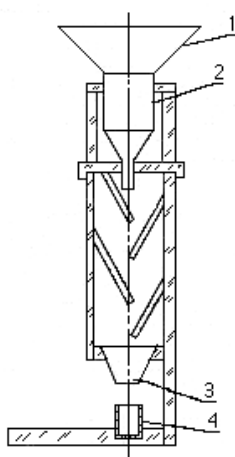


Рисунок 1.1 – Схема волюмометра Скотта (тестер насипної/об'ємної густини)

З останньої пластини частинки порошку через лійку скочуються в мірну склянку 4 місткістю 25 см³, яку встановлюють на відстані $22 \pm 0,5$ мм від торця

лійки 3, що спрямовує порошок у склянку. Склянку заповнюють порошком до верху з деяким надлишком, який знімається пластиною з алюмінію або покривним скельцем до рівня стінок.

Для порошоків з хорошою плинністю насипну густину визначають за допомогою установки, зображеної на рис. 1.2.

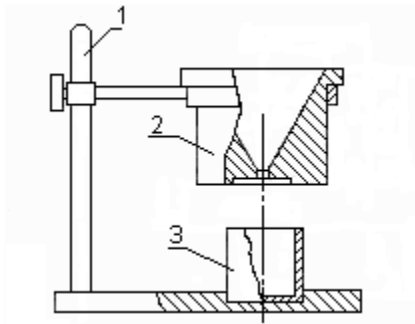


Рисунок 1.2 – Установка для визначення насипної густини

Установка складається зі стандартної лійки 2, яка закріплюється на штативі 1 і мірної склянки 3. *Густина після струшування* визначає здатність порошку до ущільнення під час струшування, що є важливим при конструюванні прес-форм. Густина після струшування визначається шляхом струшування певної кількості порошку і безпосереднього відліку цього об'єму в поділках мензурки. Для цієї мети порцію порошку поміщають у мензурку з невеликим поперечним перерізом і встановлюють на прилад із механічним струшувачем із частотою від 100 до 300 хв⁻¹. Після проведення експерименту визначають об'єм після струшування і масу порошку.

Плинністю називається здатність порошку заповнювати собою об'єм певної форми [2]. Плинність є дуже важливою, складною комплексною характеристикою, яка залежить від густини порошоків, гранулометричного складу, форми, стану частинок тощо. Основними факторами, що впливають на плинність порошоків, є тертя і зачеплення частинок одна об одну, які ускладнюють переміщення частинок. У зв'язку з цим вона знижується при зменшенні розмірів частинок, збільшенні питомої їхньої поверхні, шорсткості та ускладненні форми. Значно знижується плинність вологого порошку. Наявність окисної плівки, навпаки, покращує плинність, оскільки вона найчастіше знижує коефіцієнт тертя і, згладжуючи рельєф, зменшує питому поверхню. Відпал порошоків у захисних атмосферах за

рахунок агломерування частинок, згладжування їхньої поверхні і зниження вологості підвищує плинність. Плинність порошків визначається швидкістю витікання порошку через вихідний отвір носика лійки діаметром 2,5 мм. Для цієї мети просушену порцію порошку в 50 г насипають у воронку з кутом конуса 60° і носиком, зрізаним під прямим кутом на відстані 3 мм від конуса воронки. Перед засипанням порошку вихідний отвір лійки закривається заглушкою. Знизу підставляється циліндр-уловлювач. Після наповнення лійки порошком відкривають носик лійки і одночасно вмикають секундомір.

Устаткування та інструмент

Волюмометр або стандартна лійка для визначення насипної густини порошків, штатив, сталева мірна склянка об'ємом 25 см^3 , мензурка об'ємом 50 см^3 , прилад для визначення густини після струшування, мензурка об'ємом 20 або 10 см^3 , лійка для визначення плинності порошків, гідравлічний прес, прес-форма, мікрометр, штангенциркуль, ваги з похибкою зважування до 0,05 г, секундомір, порошки міді, заліза, алюмінію.

Хід виконання роботи

1. Визначаємо насипну густину досліджуваних порошків, для чого згідно з рис. 1.1 збираємо лабораторну установку.
2. Відміряємо 50 см^3 досліджуваного порошку за допомогою мензурки.
3. Зважуємо сталеву мірну склянку, встановлюємо склянку під лійку, висипаємо пробу порошку у лійку.
4. Після повного витікання порошку видалити надлишкову кількість порошку одним рухом алюмінієвої пластини або предметного скла.
5. Зважуємо склянку з порошком.
6. Обчислити масу порошку за формулою:

$$m = m_2 - m_1, \quad (1.1)$$

де m_2 - маса склянки з порошком, г;

m_1 - маса порожньої склянки, г.

7. Обчислюємо насипну густину досліджуваного порошку за формулою:

$$\rho_{\text{нас}} = \frac{m}{25} \quad (1.2)$$

8. Проводимо випробування на кожному з досліджуваних порошоків 3 рази, насипну густину визначити як середнє арифметичне, г/см³:

$$\rho_{\text{нас ср}} = \frac{(\rho_{\text{нас 1}} + \rho_{\text{нас 2}} + \rho_{\text{нас 3}})}{3} \quad (1.3)$$

9. Насипаємо 25 см³ досліджуваного порошку в мензурку, установлюємо її в тримач струшувача і проводимо випробування до припинення зміни об'єму порошку. Щільність після струшування обчислюють за формулою, г/см³:

$$m_{\text{стр}} = \frac{m}{V}, \quad (1.4)$$

де m - маса наважки порошку, г;

V - об'єм після утрушування, см³.

10. Густина після струшування визначається як середнє арифметичне результатів трьох випробувань.

11. Установлюємо лійку для визначення плинності на штатив, закриваємо отвір, висипаємо порцію порошку 50 г у лійку, відкриваємо отвір і одночасно вмикаємо секундомір.

12. Визначаємо час повного витікання порошку через лійку, обчислюємо плинність за формулою. г/с:

$$V = \frac{m}{t} \quad (1.5)$$

13. Випробування проводимо не менше 3^x разів, обчислюємо середнє значення плинності.

Контрольні запитання

1. Насипною густиною порошку називається?
2. Густина після струшування визначає?
3. Плинністю називається?
4. Основними факторами, що впливають на плинність порошоків, є?
5. Чим визначається плинність порошоків?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПОРОШКІВ МЕТОДОМ СИТОВОГО АНАЛІЗУ

Мета роботи – навчитися визначати гранулометричний склад металевих порошоків методом ситового аналізу

Теоретичні відомості

Розмір часток порошку є дуже важливою характеристикою. Величина частинок, і особливо так званий набір зернистості, тобто співвідношення кількостей частинок різних розмірів (фракцій), виражене у відсотках, входять у технічні умови на порошки як обов'язкова вимога. Від розміру частинок порошоків у поєднанні з іншими властивостями залежить насипна густина, усадка під час спікання і механічні властивості готових виробів. Під час спікання пресовок із дрібних порошоків зазвичай спостерігається усадка, тобто зменшення розмірів

виробів, а під час спікання пресовок із великих порошків, навпаки, іноді відбувається зростання, тобто збільшення розмірів. Тому, комбінуючи в певних пропорціях різні фракції крупності порошку, намагаються отримати таку суміш, яка забезпечувала б мінімальну зміну виробів під час спікання [3].

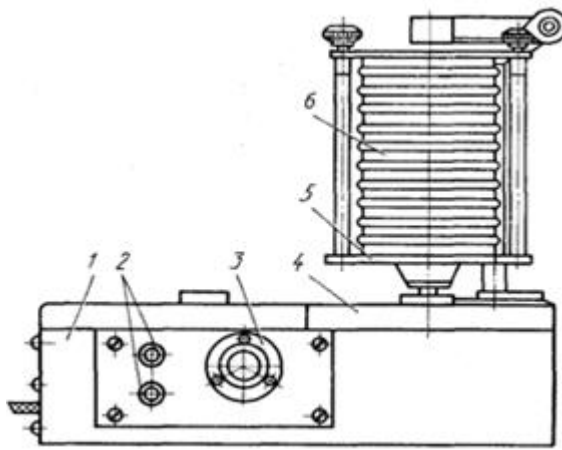
Ситовий аналіз - розсівання сипкого матеріалу, з метою визначення його гранулометричного складу, через стандартний набір сит і визначення процентного вмісту залишку на кожному з них по відношенню до маси вихідної проби. При цьому діаметр зерна визначається розміром отвору, через який воно проходить.

Ситовий аналіз здійснюють просіюванням проб матеріалу через набір стандартних сит зазвичай квадратними, рідше прямокутними отворами, розмір яких послідовно зменшується зверху вниз. В результаті матеріал поділяється на *класи, або фракції*, в кожній з яких частинки незначно розрізняються розмірами. При просіюванні частина матеріалу, розміри частинок якого менше розміру отворів d , проходить через сито (фракція – d , або прохід), а інша частина з більш великими частками залишається на ситі (фракція + d , залишок, або схід). Число фракцій, одержуваних при просіюванні через набір з n сит, становить $n + 1$ і не повинно бути менше 5 і більше 20. Крупність матеріалу позначають цифрами в міліметрах або мікронах, відповідно розмірам отворів сита, або його номером [4].

Аналіз можна проводити вручну або механічно (за допомогою пристроїв з різними приводами) і в залежності від крупності, властивостей матеріалу і необхідної точності аналізу.

Для проведення випробувань на гранулометричний склад металевих порошків застосовується установка приведена на рис. 2.1.

Комплект сит служить для визначення складу металевих порошків. Куліса перетворює обертальний рух в зворотно-поступальний і передає його ситам. Стіл з ситами отримує від ексцентрикового валу зворотно-поступальний рух за допомогою куліси. Струшування здійснюється за допомогою штовхача, рух якого передається кулачком. Кулачок у свою чергу отримує обертання від конічної пари. Режим роботи напівавтоматичний.



1 – корпус з редуктором; 2 – панель управління: тумблер для вмикання і вимикання апарату і регулятор зміни амплітуди коливань; 3 – реле часу для установки і тривалості розсіву; 4 – стіл вібратора; 5 – стіл для установки комплекту сит; 6 – набір сит; 7 – притискуючий пристрій; 8 – віброгасник з електромагнітом.

Рисунок 2.1 – Установка лабораторна для поділу металевих порошоків на фракції

Корпус призначений для монтажу всіх вузлів апарату, стіл - для установки комплекту сит. Стіл вібратора служить для передачі коливань від електромагніту столу і через нього ситам. Сита кріпляться до столу за допомогою притискуючого пристрою. Управління апаратом проводиться з панелі.

Апарат вмикається в роботу тумблером. Розсів триває протягом 15 хв і після автоматичного зупину апарату сита звільняються і знімаються зі столу.

Устаткування та інструмент

Установка лабораторна для поділу металевих порошоків на фракції, комплект сит, ваги, порошки заліза, міді, алюмінію.

Хід виконання роботи

1. Для проведення ситового аналізу сита встановлюємо одне над одним. Нагорі поміщається сито з найбільшими комірками, а внизу - з найдрібнішими.
2. Для аналізу беремо порція порошку в 50 г, яку насипаємо на верхнє сито і просіваємо за допомогою вібратора від 10 до 15 хв.

3. Залишки на кожному ситі і тазіку висипаємо окремо на глясовий папір або клейонку, при цьому ретельно прочищаємо дно і стінки сит м'яким пензликом. Таким чином вся випробовувана порція розподіляється на 12 частин (11 сит і тазик).
4. Після просіювання кожна фракція порошку зважується з точністю до 0,01 г.
5. Обчислюємо відсотковий вміст кожної фракції за формулою:

$$X = \frac{m_n}{\sum m_n} 100 \%, \quad (2.1)$$

де m_n - маса певної фракції.

6. Результати аналізу записати в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати експериментів по визначенню гранулометричного складу металевих порошоків

Номер сита	На ситі, г	Вміст фракції X, %
2,5		
1,6		
1,0		
0,63		
0,4		
0,315		
0,215		
0,16		
0,1		
0,063		
0,005		
Тазик		

7. Для кожного порошку ситовий аналіз проводимо щонайменше двічі і рахуємо середнє арифметичне результатів паралельних вимірювань.
8. Висновки представляємо у вигляді таблиці та графіку розподілу розміру частинок (вміст фракції - номер сита).

Контрольні запитання

1. Дайте визначення ситового аналізу?
2. З якою метою проводять ситовий аналіз матеріалів?

3. В результаті ситового аналізу матеріал поділяється?
4. Частинки матеріалу, які залишається на ситі називаються?
5. Крупність матеріалу позначають?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПОРОШКІВ МІКРОСКОПІЧНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи – навчитися визначати гранулометричний склад порошків прискореним мікроскопічним методом «січних».

Теоретичні відомості

Аналіз гранулометричного складу порошків шляхом безпосереднього вимірювання розмірів частинок є вельми кропітким і трудомістким методом. У зв'язку з цим нерідко використовують прискорений мікроскопічний метод, так званий метод «січних» [4]. За цим методом визначають розміри лише тільки тих частинок, які перетинаються лінійкою окуляр-мікрометра, при цьому записуються тільки лінійні розміри «перетинів» частинок. Після підрахунку всіх зерен шкала окуляр-мікрометра повертається на деякий кут, і знову проводиться підрахунок. Усього на кожному полі підрахунок проводять за трьох-п'яти січних. Загальна кількість виміряних частинок має бути не менше 200. Отримані дані в поділках шкали окуляр-мікрометра перераховують у мікрометрах і заносять у таблицю, де як підсумок подають процентний склад порошку за фракціями. Перерахунок у мікрометрах здійснюють за допомогою об'єкт-мікрометра, який представляє собою невелику скляну пластинку зі шкалою. Ціна поділки шкали вказується в паспорті об'єкт-мікрометра (зазвичай вона дорівнює 0,01 мм). Для вимірювання ціни поділки окуляр-мікрометра на столику мікроскопа зміцнюють об'єкт-мікрометр і розглядають його шкалу в мікроскопі. Переміщаючи столик мікроскопа,

поєднують перші штрихи обох шкал, а потім знаходять другу пару збіглих штрихів. Ціна поділки окуляр-мікрометра визначиться за формулою:

$$a_1 = \frac{(a_2 n_2)}{n_1}, \quad (3.1)$$

де a_2 - ціна поділки шкали об'єкт-мікрометра (0,01 мм);

n_2 - кількість поділок шкали об'єкт-мікрометра;

n_1 - кількість поділок шкали окуляра в межах збігів штрихів.

Устаткування та інструмент

Оптичний мікроскоп, об'єкт-мікрометр об'єкт-мікрометр, порошки заліза, міді, алюмінію.

Хід виконання роботи

1. Порцію порошку масою 10 г ретельно перемішуємо, невелику кількість переносимо на предметне скло і поміщаємо на стіл мікроскопа.
2. Наводимо мікроскоп на різкість.
3. Підбираємо збільшення таким чином, щоб найбільші частинки займали від 3 до 5 поділок шкали окуляр-мікрометра.
4. Виміряємо розміри і підраховуємо кількість частинок, які лежать на шкалі окуляра в такому порядку: <1 діл., 1 - 2, 2 - 3, 3 - 4, 4 - 5 діл., дані вносимо в табл. 3.1.
5. Повертаючи шкалу, повторюємо вимірювання в 3 - 4 її положеннях, потім повторюємо п. 1 - 4 на 3 - 4 полях зору.
6. Визначаємо ціну поділки шкали окуляра, перерахувати розміри частинок у мкм, вносимо в таблицю. 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані вимірів

№ поля	№ перетину	Кількість частинок, мкм				
		<1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5
1	1					
	2					
	3					
2	4					
	5					
	6					
3	7					
	8					
	9					
4	10					
	11					
	12					
Кількість частинок кожної фракції, n						
d _{ср} , мкм						
V _ф , мкм ³						
V _{заг} , мкм ³						
X, %						

7. Повертаючи шкалу, повторюємо вимірювання в 3 - 4 її положеннях, потім повторюємо п. 1 - 4 на 3 - 4 полях зору.

8. Визначаємо ціну поділки шкали окуляра, перерахувати розміри частинок у мкм, вносимо в таблицю. 3.1.

9. Обчислюємо середній розмір часток кожної фракції за формулою, мкм:

$$d_{\text{ср}} = \frac{(d_{\text{min}} + d_{\text{max}})}{2}, \quad (3.2)$$

де d_{min} і d_{max} - граничні розміри частинок даної фракції.

10. Обчислюємо середній об'єм однієї частинки фракції, мкм³:

$$V_{\text{ч}} = d_{\text{ср}}^3 \quad (3.3)$$

11. Обчислюємо середній об'єм усіх частинок кожної фракції, мкм³:

$$V_{\text{ф}} = nV_{\text{ч}} \quad (3.4)$$

9. Обчислюємо загальний об'єм усіх частинок усіх фракцій, мкм³:

$$V_{\text{заг}} = \sum V_{\phi} \quad (3.5)$$

12. Визначаємо гранулометричний склад порошку за формулою:

$$X = \frac{\left(\frac{V_{\phi}}{V_{\text{заг}}}\right)}{100 \%} \quad (3.6)$$

Контрольні запитання

1. За методом «січних» визначають?
2. Загальна кількість вимірних частинок має бути?
3. Об'єкт-мікрометр представляє собою?
4. За якою формулою розраховується ціна поділки окуляр-мікрометра?
5. Як визначається середній об'єм однієї частинки фракції?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ З КОНСТРУКЦІЙНИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Мета роботи – дослідження особливостей складу, структури та властивостей порошкових легованих сталей.

Теоретичні відомості

Для порошкових сталей загального призначення - прийняті наступні позначення: СП сталь порошкова; наступні дві цифри - вміст вуглецю в сотих частках відсотка (СП30 - сталь із ~ 0,3 % С); наступні букви, як і для литих сталей, - легувальні елементи (Д - мідь, Х - хром, Г - марганець, Н - нікель, П - фосфор і ін

[5]. Цифри після символів вказують вміст цих елементів у відсотках, а цифра після дефіса показує пористість матеріалу у %. Наприклад, СП90ДЗ-3 - сталь порошкова з вмістом 0,9 % С, 3 % Сu з пористістю біля 3 %. Для залізграфітових матеріалів у радянській літературі можна зустріти і іншу систему позначення: так, вищенаведена сталь позначається ЖГрДЗ. Американський стандарт, випущений в 1984 р. Федерацією промисловості порошкової металургії, передбачає іншу систему позначень. Наприклад, схожа марка матеріалу системи залізо - графіт - мідь позначається FC-0208-60: 2 % Сu, 0,8 % С, мінімальне значення границі плинності 6×10^3 фунтів на квадратний дюйм (psi), або 420 МПа. Для позначення легувальних елементів прийняті наступні символи: С - мідь, N - нікель, М - марганець, Y - фосфор і ін.

На структуру та властивості порошкових легуваних сталей суттєво впливає технологія їх виробництва. Вона багато в чому визначає гомогенність та пористість кінцевого продукту [6].

Найбільш гомогенний розподіл легувальних елементів мають сталі отримані з готових легуваних порошків, зокрема отриманих розпиленням рідкого металу, але внаслідок вищої твердості цих порошків, що уявляють собою леговану сталь, виникає необхідність у підвищенні тиску пресування, (майже на 40 %) що приводить до пришвидшеного зношування прес-форм. Крім того такі порошки більш коштовні порівняно з порошками отриманими іншими способами.

Вказаний недолік менш притаманний так званим частково легуваним порошкам, у яких частинки легувальних елементів як би скріплені із порошинками заліза. Однак незважаючи на очевидні переваги використання легуваних або частково легуваних порошків, для виготовлення конструкційних деталей досить широко застосовують і шихтовий варіант, що представляє з себе полікомпонентну суміш.

Він технологічно найбільш простий та найменш коштовний. Його недоліком є необхідність у тривалих витримках при спіканні для покращення гомогенності структури сталі. Проте в багатьох випадках непотрібна висока

ступінь гомогенності і достатньо проведення короткочасного, але економічно вигідного спікання [7].

Тривалий час порошкові сталі загально машинобудівного призначення внаслідок підвищеного вмісту шкідливих домішок та пористості поступалися за властивостями сталям отриманим традиційними металургійними методами і покращувати їх якість легуванням та термообробкою в багатьох випадках було економічно невигідним. На сьогодні розвиток МПМ дозволив зменшити вплив вказаних недоліків у зв'язку з чим набуло актуальності вивчення можливостей підвищення властивостей таких матеріалів легуванням та термообробкою.

Одним із найбільш важливих легувальних елементів порошкових сталей є *мідь*. Оскільки вона більш пластична та менш тверда порівняно з залізом додавання її в порошок покращує пресуємість та формуємість. Відповідно результатам досліджень Азенкольба додавання міді підвищує міцність спеченої сталі, особливо при невисокому вмісту вуглецю; зменшує усадку пресовок, що дозволяє отримувати деталі чи заготовки точних розмірів, а відповідно зменшити припуски на наступну обробку.

Вказаний вплив міді пояснюється:

- розширенням решітки заліза внаслідок розчинення міді;
- пенітрацією кристалічних границь і поширенням по ним рідкої міді.

Якщо міжповерхнева вільна енергія на границі твердої та рідкої фаз (γ_{SL}) менше вільної енергії кристалічної границі (γ_{gb}) більше ніж на половину рідка фаза проникає через кристалічну границю, що спостерігається в системі залізо мідь. Ця теорія задовільно пояснює зростання формовок заліза з міддю при температурах вище температури плавлення міді. Завеликий ріст формовок з міддю можна дещо компенсувати додаванням інших елементів, наприклад нікелю.

Залізомідні сплави мають схильність до дисперсійного твердіння, що можна використовувати для їх зміцнення гартуванням з старінням.

З метою підвищення властивостей залізомідних сплавів в них додають *графіт*. При цьому твердість та міцність підвищуються в більшому ступені ніж це можна було очікувати від цих елементів при веденні їх окремо. Додавання графіту у

вказані сплави зменшує ріст формовок при спіканні, а додавання міді сприяє отриманню більш однорідної структури, зменшує усадку, що стабілізує розміри заготовок та підвищує твердість. Введення в залізографітові сплави 2 % мас. міді підвищує зносостійкість внаслідок утворення твердого розчину та протіканню процесів дисперсійного твердіння. Підвищення властивостей даних матеріалів досягається і якщо в залізну основу вводити не чисту мідь, а наприклад, бронзу або використовувати міднення залізних порошків, з наступним нанесенням на них шару олова. В процесі подальших технологічних операцій (пресування та спікання) деяка частка міді розчиняється в залізі і тим самим зміцнює його, а інша частка розчиняє в собі олово, утворює бронзу, що підвищує антифрикційні властивості. Матеріали отримані у такий спосіб наближаються за властивостями до литих бронз.

Кремній набув широкого застосування для одержання електротехнічної та спеціальної графітізованої сталі, у структурі якої після відпалу утворюються включення вуглецю відпалу (графіту). Графітізовану сталь застосовують для виготовлення виробів, що працюють в умовах зношування. У порошкові матеріали на залізній основі теж вводять кремній для одержання магнітно-м'яких матеріалів, конструкційних та графітізованих сталей. Кремній відноситься до числа елементів, що повільно розчиняються в залізній основі, тому одержання гомогенного твердого розчину в порошкових залізнокремнистих матеріалах можливо лише при застосуванні підвищених температур і тривалих витримок, наприклад 1300 °C протягом 20 годин.

Структура матеріалу, отриманого МПМ спеченого при більш низьких температурах та менших витримках, представляє з себе кремнистий ферит, що відрізняється від виплавляемого меншою однорідністю за хімічним складом. Крім того, у структурі порошкових залізнокремнистих матеріалів присутні включення розташовані по границях зерен у вигляді суцільної або розірваної сітки, які уявляють собою дісіліциди заліза.

Здійснення спікання за більш економною технологією, наприклад, при температурі 1150 °C впродовж 2 годин приводить тільки до розчинення частинок кремнію в залізній основі. Проте дана технологія спікання хоча і приводить до

розчинення кристалів кремнію в залізі, але не забезпечує завершення процесу гомогенізації твердого розчину. На місці частинок, що розчинилися, утворюються області з підвищеним вмістом кремнію. Вміст кремнію усередині контуру ділянки де знаходилась частинка кремнію, що розчинилась, у середньому від 5 до 10 разів більше його вмісту за межею контуру, а на деякій відстані від областей, оточених контурами частинок, що розчинилась, присутність кремнію взагалі не виявляється.

Графітизація порошкових сталей знижує механічні і позитивно впливає на антифрикційні властивості, зокрема, на коефіцієнт тертя, зменшуючи його в 2 - 2,5 рази порівняно зі сталями, спеченими без утворення структурно-вільного вуглецю. Оптимальний комплекс механічних властивостей серед графітизованих сталей має кремнієвомідниста сталь. Гартування та низький відпуск графітизованих сталей, підвищує міцність і твердість металічної матриці, що сприяє збільшенню припустимих робочих навантажень та зниженню коефіцієнту тертя. Наприклад, якщо між чавунними деталями схоплювання відбувається при напруженні 3,67 МПа, то в порошкових сталей цього не спостерігається навіть при напруженні 5,15 МПа.

Хром підвищує міцність, прогартованність, надає сталі особливих властивостей, тому його застосовують для легування порошкових сталей.

Властивості порошкових хромистих сталей в значній мірі залежать від способу введення хрому і формуємої в залежності від цього структури. Введення хрому у виді чистого порошку поліпшує технологію виробництва, проте приводить до формування гетерогенної структури, що обумовлено сповільненням процесів розчинення хрому в залізній основі внаслідок його високої здатності до окислювання та карбідоутворення. Так при спіканні хромистої сталі, отриманої з механічної суміші чистих компонентів, завдяки дифузії вуглецю та заліза до частинок хрому починається утворення карбідів. На місці нерозчинившихся частинок хрому утворюються карбіди $(Fe,Cr)_3C$ і $(Fe,Cr)_{23}C_6$, що мають твердість від 892 до 1430 HV. Навколо карбідів з'являється зона, збагачена вуглецем, яка уявляє собою твердий розчин хрому в залізі з підвищеною концентрацією і має високу мікротвердість від 376 до 592 HV. Біля зони, збагаченої вуглецем,

розташовуються ділянки мікроструктури, збіднені вуглецем, які далі переходять в основу, що складається з ділянок хромистого фериту та евтектоїда $Fe_{\alpha} + (FeCr_3)C$ з мікротвердістю відповідно від 80 до 100 і від 224 до 322 HV.

В процесі витримки при спіканні відбувається деяке вирівнювання концентрації вуглеці та хрому, але повної гомогенізації твердого розчину при температурах спікання від 1150 до 1200 °C не відбувається, в результаті чого в спеченій хромистій сталі спостерігається весь спектр структур від феритної до троостомартенситної. При цьому твердість основи коливається від 1,02 до 6,52 ГПа. Зі збільшенням кількості хрому росте об'ємна частка первинних карбідів, середній розмір яких становить від 18 до 22 мкм.

Одержання хромистих сталей з легованих порошків хоча і ускладнює технологію виробництва, проте забезпечує формування більше однорідної структури. Пластичність сталей з легованих порошків у три - чотири рази вище, ніж сталей отриманих із сумішей порошків. Міцність на розрив приблизно така ж як і для низьколегованих сталей та трохи вище для високолегованих сталей з легованих порошків порівняно з сталями отриманими з суміші окремих елементів. Низька пластичність і зниження міцності високолегованих хромистих сталей, отриманих змішуванням порошків окремих елементів, пов'язані з підвищеною гетерогенністю структури.

Зменшення гетерогенності структури може бути досягнуто збільшенням дисперсності вихідних порошків, або введення в суміш порошків легувального елемента у виді його карбіду, наприклад, хрому у виді Cr_3C_2 . Цей вид карбіду досить стійкий проти окислювання і при спіканні добре розчиняється в залізі. Введення вказаного карбіду у виді частинок розмірами від 5 до 10 мкм забезпечує одержання гомогенної структури при температурі 1200 °C за 1 годину. При цьому максимум міцності (700 МПа) досягається при вмісті карбіду не більше 4 %. Гомогенна структура такого матеріалу без додавання вказаного карбіду досягається лише спіканням при 1280 °C в продовж 1,5 год. Проте зважаючи на необхідність в цьому випадку додаткових витрат на подрібнення, або застосування твердих частинок карбідів робить більш доцільним для одержання стабільної

структури та високого рівня міцносних характеристик використання гомогенних порошків легованих сталей.

Збільшення ступеня однорідності структури хромистих сталей можна одержати, застосуванням різних способів хіміко-термічної обробки, введенням до складу матеріалу солей, що містять хром, і порошки ферохрому.

Подальшого підвищення властивостей порошкових залізохромистих композицій можна досягнути сполученням легування з одержанням волокнистої структури. Наприклад, як вихідний матеріал можна використати суміш порошків, що містить 98 % залізного порошку ПЖ2М, 0,8 % олівцевого графіту та 4 % порошку високохромистої сталі ПХ30 до складу якої входить 30 % хрому. Після спікання та пресування заготовка з такої суміші має гетерогенну структуру, що складається із залізвуглецевої матриці та неповністю розчинених частинок хромистої сталі ПХ30. Дану заготовку піддають штампуванню з метою надати їй потрібну форму, зокрема, шестерні. При цьому пластичне формоутворення зуба приводить до утворення в поверхневому шарі волокнистої структури, яка складається з частинок сталі ПХ30 у виді волокон, що неповністю розчинилися при спіканні та волокон з залізвуглецевої матриці. Напрямок (волокон як тих так і інших) співпадає з напрямком розтягувальних напружень у корені зуба.

Після термообробки високоміцні хромисті волокна набувають структуру легованого мартенситу з мікротвердістю від 850 до 910 HV, а залізвуглецева матриця (теж у виді волокон) структуру високовуглецевого мартенситу з мікротвердістю від 590 до 630 HV. Така структура забезпечує високі значення втомної міцності матеріалу зубців та значний опір росту втомної тріщини.

Схильність порошкових сталей, отриманих з механічних сумішей чистих компонентів, до формування гетерогенної структури, може бути використана як позитивна властивість при створенні зносостійких матеріалів, що мають нерівноважну грубогетерогенну структуру. Така гетерогенна структура дозволяє знизити схильність до мікросхоплювання і підвищити зносостійкість даних матеріалів.

Прикладом таких матеріалів є порошкова конструкційна хромиста сталь марки ЖЧ25Х3, більш зносостійка, ніж сталь ШХ15 та цементована сталь 20Х. Температура спікання цих сталей вибирається такою, щоб не відбувалася гомогенізація хрому. Структура матеріалу уявляє собою перлітоферит з відносно великими включеннями ферохрому, які мають високу порівняно, з гомогенною металевою матрицею твердість. Створена як аналог (за хімічним складом) сталі ШХ15 порошкова сталь ЖЧ20Х3 має більшу зносостійкість, незважаючи на пористість у 10 – 12 % хоча поступається їй за міцністю та твердістю. Випробування в режимі граничного тертя зі сталлю Р9 при швидкості 2,5 м/с і тиску 3,4 МПа показали, що матеріал ЖЧ20Х3 за зносостійкістю перевершує сталь ШХ15 в 5 разів. Промислове застосування порошкових деталей масляного насоса ковальсько-пресового встаткування, виготовлених зі сталі ЖЧ20Х3, дозволило підвищити ресурс масляного насоса з 3 до 12 тис. год [8].

Молибден сприятливо впливає на антифрикційні властивості залізграфітових матеріалів: зменшує коефіцієнт тертя й зношування, підвищує максимальне навантаження до схоплювання. Особливо цей вплив помітно на матеріалах, підданих хіміко-термічній обробці. В присутності вуглецю коефіцієнт дифузії молибдену в залізі вище, ніж коефіцієнт дифузії хрому, тому структура матеріалів, легованих молибденом, більше однорідна і уявляє в спеченому стані легований перліт з карбідами, а після хіміко-термічної обробки – мартенсит із залишковим аустенітом і карбідами типу $Me_{23}C_6$ і Me_3C . Мікротвердість основи сталей з збільшенням в них концентрації молибдену безупинно підвищується. Більш висока однорідність молибденових сталей у порівнянні із хромистими пояснюється також і тим, що карбід хрому утворюється при температурах від 900 до 950 °С, у той час як утворення карбіду молибдену починається лише при температурах 1100 °С і вище. Таким чином, розчинення молибдену здійснюється дифузиею молибдену в залізо, а у хромистих сталях спочатку утворюється карбід хрому, а потім уже починається його розчинення в залізній основі. У сталях, легованих молибденом, об'ємна частка карбідів більше, а їх середній розмір значно менше, ніж у хромистих сталях.

Зазвичай молібден додається в порошкові сталі разом з нікелем, міддю та марганцем. Це обумовлено тим, що молібден коштовний легувальний елемент. Додавання молібдену в сталі, які містять 2 % нікелю, 1 % марганцю та 0,4 % вуглецю, підвищує границю міцності приблизно на 130 МПа та твердість, але відносне подовження при цьому знижується до 1 %, проте його можна покращити підвищенням температури спікання.

Сумісне легування сталі хромом і молібденом дає можливість виробляти сталі, що мають більш високу зносостійкість порівняно з хромистими та нижчу коштовність ніж молібденові. Структура хромомолібденової сталі більш однорідна порівняно з хромистою та молібденовою. Найнижчу гетерогенність має сталь, що містить приблизно однакові кількості молібдену та хрому. Підвищення температури та часу витримки спікання даних сталей сприяє дифузійній рухомості атомів і інтенсифікує процеси розчинення легувальних елементів, що в свою чергу приводить до насиченості ними твердого розчину і відповідно збільшенню кількості залишкового аустеніту.

Для підвищення властивостей сталі даного типу піддають цементації з наступною термообробкою. Сприятливий вплив хіміко-термічної обробки на антифрикційні властивості хромомолібденових сталей пояснюється, як суттєвим підвищенням твердості, так і зменшенням гетерогенності структури. При цьому, якщо структура спеченої сталі складається з мартенситу, тростомартенситу, залишкового аустеніту та карбідів розміром від 2 до 30 мкм в кількості від 5 до 10 % об'ємн., то сталь після хіміко-термічної обробки має мартенситну структуру з рівномірно розподіленими спеціальними карбідами частка яких збільшується до 45 % об'ємн. В даному випадку дрібні рівномірно розташовані карбіди, що виступають над поверхнею тертя, сприймають навантаження та зрізують містки захоплення і тим самим зменшують коефіцієнт тертя [5].

Інший спосіб виробництва хромомолібденових сталей з однорідною структурою – науглецювання попередньо спеченої хромомолібденової безвуглецевої композиції. Відсутність вуглецю сприятливо впливає на розчинення легувальних елементів оскільки не відбувається зв'язування їх в карбіди, що

перешкоджає дифузії їх складових в твердий розчин. Спечені заготовки потім піддають хіміко-термічній обробці. Структура науглецьованого шару після такої обробки уявляє собою мартенсит з рівномірно розташованими дисперсними карбідами, що мають середній розмір 1 мкм. При цьому порошкова сталь характеризується високим ступенем гомогенності твердого розчину за хромом та молібденом.

Підвищити властивості порошкових матеріалів можна захистом від корозії, покращенням їх структури різними видами термічної, хіміко-термічної та термомеханічної обробки. Наприклад, зміцнення може бути досягнене утворенням твердих розчинів, змінення дисперсності гетерогенних структур або фіксуванням метастабільних структур типу мартенситу. Вказані види обробок порошкових сталей мають ряд особливостей, обумовлених насамперед залишковою пористістю, а також хімічною і структурною неоднорідністю, зниженою тепло - та температуропровідністю.

Залишкова пористість порошкових сталей впливає на ріст зерна аустеніту при нагріванні сталей. Спикання порошкових сталей виконується при температурах 1100 – 1200 °С, що набагато перевищує температурний інтервал перлітоаустенітного перетворення. З огляду на тривалість спікання, що становить від 1 до 2 год і більше, ця технологічна операція, здавалося б, повинна приводити до формування дуже великого аустенітного зерна. Проте, грубозернистої структури в порошкових сталях, як правило не спостерігається. Схильність до росту зерна аустеніту в порошкових сталях значно нижча, ніж у кованих. Наявність пор, а також особлива будова контактних ділянок між вихідними частинками порошків перешкоджають росту зерна аустеніту аналогічно впливу гетерогенних включень у литих сталях. Границі зерен, що ростуть при зустрічі з порами блокуються ними і залишаються нерухомими навіть при тривалій аустенітизації. Найбільш сильне гальмування границь зерен спостерігається біля пор з неправильною розгалуженою формою. При тривалих витримках і високих температурах, коли починається процес сфероїдизації та збільшення крупніших

пор за рахунок зменшення дрібних, їх гальмувальна дія знижується і ріст зерна прискорюється.

Особливості структурного стану порошкових сталей, зокрема, пористість впливає на кінетику фазових перетворень в сталі при нагріванні та охолодженні. Встановлено, що збільшення пористості викликає зниження критичних точок перліто-аустенітного перетворення при нагріванні та підвищення - при охолодженні, що приводить до зменшення інтервалу теплового гістерезису. Особливо добре помітний даний ефект при підвищених швидкостях нагрівання і охолодження [5].

Пористість підвищує температуру початку мартенситного перетворення. Причому вказане явище супроводжується падінням твердості мартенситу, що ймовірно, відбувається внаслідок самовідпуску в процесі охолодження від температури M_p до кімнатної. Відповідно рентгеноструктурним даним при постійному складі та однакових умовах гартування зі збільшенням пористості зменшується тетрагональність мартенситу. Так, якщо для литої сталі У8 тетрагональність мартенситу дорівнює 0,1088, то для порошкової з таким же вмістом вуглецю – 0,1035 при пористості від 7 до 9 % і 0,1022 при пористості від 26 до 28 %.

Пористість впливає не тільки на температуру перліто-аустенітного та мартенситного перетворень, але й на кінетику розпаду аустеніту як в ізотермічних умовах, так і при безперервному охолодженні. Так у сталі ЖГр0,8 зі збільшенням пористості до 25 % стійкість переохолодженого аустеніту зменшується. При цьому С- подібні криві зміщуються вліво, область мінімальної стійкості аустеніту переміщується убік підвищених температур, а загальний час ізотермічного розпаду Аустеніту зростає.

Термокінетичні діаграми порошкової сталі ЖГр0,8 різної пористості, свідчать про те, що і в цьому випадку вплив пористості в основному позначається на зниженні стійкості аустеніту. Зі збільшенням пористості час інкубаційного періоду зменшується, а область мінімальної стійкості аустеніту зміщується убік більш високих температур. Ці дані показують, що і при безперервному

охлажденні порошкових сталей ступінь переохолодження, зі збільшенням пористості зменшується.

При дослідженні закономірностей перетворення аустеніту порошкових сталей, легованих хромом, нікелем, молібденом, в умовах безперервного охолодження встановлено, що зниження пористості досліджених сталей супроводжується збільшенням стійкості аустеніту відповідно зменшенням критичної швидкості гартування та зниженням температури початку мартенситного перетворення. Збільшення пористості порошкових сталей викликає підвищення критичних точок A_{r1} і A_{r3} .

Таким чином, пористість впливає на кінетику і положення критичних точок аустеніто-перлітного перетворення, знижує стійкість переохолодженого аустеніту та підвищує температуру початку мартенситного перетворення. Це можна пояснити тим, що пористий аустеніт має вищу поверхневу енергію і тому є термодинамічно менш стійким у порівнянні з переохолодженим аустенітом литих сталей. Крім того, вільна від контактів поверхня пор зменшує роботу утворення зародків нової фази, тим самим створює сприятливі умови для їхньої швидкої появи при високих температурах.

В даному випадку при вивченні впливу пористості на вказані параметри, необхідно обов'язково враховувати зменшення теплопровідності з підвищенням пористості порошкових матеріалів, що може привести до суттєвих методичних помилок, зокрема у визначенні температури зразка або зменшенню ступеня переохолодження.

Одержання порошкових легованих сталей за допомогою механічного змішування порошків не дає того ступеня гомогенності твердого розчину, що може бути досягнута у випадку застосування легованого порошку. У зв'язку з цим термічна обробка порошкових легованих сталей, отриманих із механічних сумішей вихідних компонентів, має свої особливості.

Ступінь гомогенності твердого розчину впливає на критичну швидкість гартування порошкових сталей. Так, для сталі, отриманої шляхом змішування порошків, що містить 2 % Ni, 0,5 % Mo; 0,9 % C критична швидкість гартування

складає $19 \pm 1,3$ °C/с, у той час як у сталі того ж складу, але отриманої з гомогенізованого легованого порошку - $2,25 \pm 0,07$ °C/с.

За даними Гуляєва А.П. ділянки мікронеоднорідності, можуть бути центрами кристалізації, і тому вони є найбільш імовірними місцями гетерогенного виникнення зародків нової фази, що створює сприятливі умови для перліто-аустенітного і аустеніто-перлітного перетворень та для виникнення зародків мартенситу при мартенситному перетворенні. При цьому, якщо концентраційна неоднорідність досягає певної величини в достатній для утворення зародка критичного розміру області простору, то можлива поява центра нової фази. Неоднорідність розподілу концентрацій може бути джерелом концентраційних напружень, що викликають дифузійні потоки усередині продукту розпаду, внаслідок чого ріст зародків нової фази прискорюється.

Оскільки неоднорідність твердого розчину спечених сталей зростає зі збільшення вмісту легувальних елементів, вона повинна впливати на стійкість переохолодженого аустеніту порошкових сталей з різним ступенем легованості.

Побудова діаграм ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту порошкових хромомолібденових сталей, показала, що вони так само як і литі, мають дві області мінімальної стійкості аустеніто-перлітну та проміжну. Зі збільшенням кількості легувальних елементів у вказаних сталей спостерігається деяке розширення області максимальної стійкості аустеніту. Проте, незважаючи на високий ступінь легованості, при ізотермічній витримці, розпад аустеніту в спечених сталях починається раніше, ніж у литих того ж складу. Збільшення сумарного легування з 4 до 15 % практично не приводить до підвищення стійкості аустеніту порошкових сталей. Це пояснюється тим, що зі збільшенням кількості легувальних елементів не тільки сповільнюється дифузія, але і зростає неоднорідність твердого розчину. Присутність у матриці областей мікронеоднорідності сприяє прискоренню перетворення, у зв'язку з тим, що в цих областях легше виникають зародки нової фази [9].

Аналізу діаграм ізотермічного перетворення аустеніту також показує, що з підвищенням гомогенності твердого розчину відбувається розширення

температурного інтервалу максимальної стійкості аустеніту. Наприклад, якщо для сталі, спеченої при 1100 °С, цей інтервал лежить між 400 і 600 °С, для сталі, спеченої при 1200 °С, - між 350 і 600 °С, то для сталі, спеченої при 1280 °С, - між 300 і 700 °С.

Зазначимо ще одну закономірність. З підвищенням температури спікання кількість аустеніту, який розпався при наступному ізотермічному перетворенні, зменшується. Так, за три години ізотермічної витримки максимальна кількість аустеніту, що розпався, становить 90 % для сталі, спеченої при 1100 °С, 70 % - для сталі, спеченої при 1200 °С і лише 50 % - для сталі, спеченої при 1280 °С. Тобто з підвищенням гомогенності збільшується частка аустеніту залишкового.

Відомо, що хром помітно підвищує стійкість аустеніту як у перлітній, так і в проміжній областях. З підвищенням вмісту хрому в сталі відбувається зсув перлітної області угору, а проміжної вниз по температурній шкалі. Молібден значно підвищує стійкість аустеніту в перлітній області і порівняно мало впливає на кінетику розпаду в проміжній. Проте при збільшенні вмісту молібдену мінімум проміжної області зміщується у бік низьких температур. У випадку хромомолібденової сталі з підвищенням температури спікання внаслідок більш повної гомогенізації аустеніту, в процесі якої він насичується хромом та молібденом, підвищується його стійкість як в перлітній так і в проміжній областях, що і приводить до розширення температурного інтервалу максимальної стійкості аустеніту [9].

Відомо, що температура гартування сталей, насамперед залежить від положення критичних точок A_1 і A_3 . Проте використання діаграми стану залізо вуглець, навіть з урахуванням впливу легувальних елементів, для визначення температури гартування порошкових сталей недостатньо, оскільки їх твердий розчин характеризується значною неоднорідністю за хімічним складом і, як правило, режим термообробки потребує експериментального уточнення.

Як показують накопичені експериментальні результати, з підвищенням вмісту легувальних елементів збільшується значення оптимальної (з точки зору отримання найвищої твердості) температури гартування та тривалість витримки.

Також відмітимо, що з підвищенням концентрації легувальних елементів в порошкових сталях знижується їх твердість у загартованому стані. Пояснити дані особливості порошкових сталей можна утворенням первинних важкорозчинних спеціальних карбідів в процесі спікання. Наприклад тригональний карбід Me_7C_3 може не розчинятись в сталі при температурах спікання, що значно перевищують оптимальні температури гартування. В результаті зв'язування вуглецю в важкорозчинних карбідах зменшується його концентрація в твердому розчині, що приводить до утворення маловуглецевого мартенситу та троститу і знижує твердість сталі.

Відомо, що оптимальний комплекс механічних властивостей може бути забезпечений двома типами структурних станів:

- продуктами відпуску мартенситу;
- продуктами розпаду аустеніту в проміжній області перетворень, які утворюються при ізотермічному гартуванні.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що для порошкових конструкційних сталей, легованих хромом, нікелем, молібденом, отриманих з полікомпонентних шихт, доцільним є другий варіант досягнення оптимального комплексу механічних властивостей – ізотермічне гартування. Застосування цього виду термічної обробки особливо доцільно для хімічно-неоднорідних сталей, оскільки при такій обробці менше рівень залишкових напружень і нижча їх концентрація поблизу пор. Наприклад, ізотермічне гартування порошкової сталі СП45Х2Н4М на структуру бейніту забезпечує істотне підвищення її механічних властивостей завдяки меншому рівню залишкових напружень і нижчій їх концентрації поблизу пор. В результаті такої термічної обробки міцність хімічно-неоднорідної сталі збільшується на 15 % у порівнянні зі спеченим станом і на 25 % у порівнянні із загартованим на мартенсит і відпущеним при температурі ізотермічної витримки. Ударна в'язкість після ізотермічного гартування теж вище, ніж при гартуванні на мартенсит.

Пористість і хімічна неоднорідність, характерні для порошкових сталей, суттєво впливають на процес їх відпуску. Експериментальні дослідження показали,

що в більш пористих зразках розпад мартенситу при здійсненні вказаної операції відбувається активніше, що відображається в зменшенні ступеня його тетрагональності. Так, при дослідженні зразків сталі ЖГр1,3 з вмістом біля 0,75 % С, після гарту та відпуску при 100 °С спостерігали зниження вмісту вуглецю з підвищенням пористості. Наприклад, у зразках з відносною густиною 90 % вміст вуглецю у мартенситі знизився до 0,55 %, а в зразках з відносною густиною 82 і 76 % відповідно до 0,48 і 0,25 %.

Активізація розпаду мартенситу при збільшенні пористості, ймовірно, пояснюється створенням більше сприятливих умов дифузії атомів вуглецю в дефектній пористій структурі, що має надлишок вільної енергії внаслідок більш розвинутої поверхні та більшого рівня спотворень кристалічної ґратки. Відповідно результатам експериментальних досліджень підвищення температури відпуску приводить до росту областей когерентного розсіювання і релаксації напружень другого роду. Проте при тих самих температурах відпуску, чим вище пористість зразків, тим дисперсніше області когерентного розсіювання та вище рівень напружень другого роду.

Ділатометричні дослідження показали, що в міру збільшення пористості спостерігається зсув температурних інтервалів чотирьох перетворень при відпуску в область більш низьких температур.

Це свідчить про активізацію розпаду мартенситу, а також усіх інших процесів, що відбуваються при відпуску, під впливом пористості. Наприклад, якщо при пористості 10 % інтервали чотирьох перетворень при відпуску становлять: перше перетворення – 120 ... 190 °С, друге – 190 ... 290 °С; третє – 290 ... 340 °С; четверте – 340 ... 710 °С, то при пористості 24 % відповідно 110 ... 170, 170 ... 280, 280 ... 330 і 330 ... 685 °С.

Збільшення тривалості спікання зразків сталі ЖГр1Г1 при температурі 1200 °С з 0,5 до 7 год. приводить до очікуваного підвищення однорідності розподілу марганцю та більш однорідної мікроструктури спеченої сталі. При цьому підвищення хімічної однорідності зразків сталі, спечених протягом 7 год., приводить до росту стійкості аустеніту і до збільшенню його кількості як після

гартування, так і низького відпуску в порівнянні зі зразками, спікання яких тривало 0,5 год.

Хімічна неоднорідність, характерна для порошкових сталей, отриманих з полікомпонентних шихт, впливає і на тонку структуру загартованих і відпущених зразків. Наприклад, при температурах до 400 °С рівень мікронапружень приблизно однаковий для зразків сталі ЖГр1Г1, після спікання з різними витримками. При більш високих температурах відпуску зняття напружень відбувається швидше в зразках, спечених протягом 7 год, порівняно з зразками, спікання яких тривало 0,5 год. Наявність мікрообластей з підвищеним та зниженим вмістом марганцю, очевидно, перешкоджає переміщенню дислокацій. З ростом хімічної неоднорідності кількість таких ділянок збільшується, що утрудняє релаксацію напружень.

Збільшення хімічної неоднорідності розподілу марганцю приводить до деякого прискорення розпаду мартенситу в процесі відпуску при 100 °С. Наприклад, за допомогою дилатометричного методу було встановлено, що в зразка, спечених протягом 7 год. зменшення довжини починається приблизно через 3 хв після початку ізотермічної витримки, а в зразка, спікаємих впродовж всього 0,5 год., зменшення довжини починається на перших секундах витримки. Проте уже через 40 хв. дилатометричні криві співпадають і подальший розпад іде з однаковою швидкістю. Оскільки ділянки концентраційних мікронеоднорідностей, можуть бути центрами гетерогенного зародження нової фази, вони сприяють збільшенню кількості ділянок початку розпаду мартенситу, що і приводить до прискорення розпаду мартенситу в хімічно менш однорідній сталі [10].

Для порошкових сталей, отриманих з полікомпонентних шихт спіканням при 1200 °С у продовж 0,5 год міцність на розтягнення з підвищенням температури відпуску росте, досягає максимального значення і потім зменшується. Характер цієї залежності пояснюється тим, що більше високий рівень концентраційної неоднорідності сталі, спеченої при 1200 °С у продовж 0,5 год, утрудняє релаксацію напружень і зберігає їх до більше високих температур у порівнянні зі сталлю,

спеченою протягом 7 год. очевидно з цієї причини, і відбувається зсув максимального значення міцності убік більш високих температур відпуску.

У процесі відпуску з підвищенням температури відбувається ріст ударної в'язкості внаслідок розпаду мартенситу, зняття напружень і коагуляції карбідів. Підвищення хімічної неоднорідності, перешкоджає зняттю напружень, і тим самим сповільнює ріст ударної в'язкості.

На сьогодні основну частку виробів, що виготовляють МПМ, представляють вироби на основі заліза для яких характерна складною форма та великі розміри.

Порошкові конструкційні вироби за величиною напружень можна класифікувати на *мало-, середньо- і важконавантажені*.

До *малонавантажених* деталей відносяться втулки, кришки, шайби з пористістю до 15 - 16 %. Їх одержують однократним холодним пресуванням при тиску від 600 до 800 МПа з наступним спіканням при температурі 1150 – 1200 °С у захисній атмосфері. Для підвищення точності розмірів застосовують калібрування. Для досягнення герметичності вироби просочують металевими або неметалічними розплавами, або наносять на деталі захисні покриття.

Середньонавантажені деталі з пористістю 10 – 15 % одержують дворазовим холодним пресуванням при тиску від 600 до 800 МПа з наступним спіканням. Перше спікання проводять при 800 – 850 °С у впродовж біля 1 год, заключне – при 1150 – 1200 °С з витримкою біля двох годин. Точність розмірів досягається або калібруванням, або механічною обробкою. Для надання деталям необхідних фізико- механічних властивостей їх піддають термічній або хіміко-термічній обробці.

Важконавантажені деталі (шестірні, кулачки, важелі, фланці), одержують дворазовим спіканням, гарячим пресуванням, гарячим або холодним штампуванням, просоченням рідкими металами попередньо сформованих пресовок. При необхідності застосовується додаткова обробка для досягнення потрібної точності розмірів. Крім того, залежно від умов експлуатації дані деталі піддають термічній, термомеханічній або хіміко-термічній обробці.

Головним завданням підприємств порошкової металургії є освоєння технологій виробництва деталей складної форми з низькою пористістю. Серед різноманітних методів одержання низькопористих порошкових деталей найбільше поширення одержав метод гарячого штампування (ГШ) пористих заготовок. Гаряче штампування дозволяє одержувати заготовки, з невеликими розмірними допусками та високими механічними властивостями.

Штамування спечених, заготовок використовується в автомобілебудуванні для виробництва сідел клапанів, деталей шатунів, маточин коліс, кульових шарнірних чаш, муфт карданних валів, синхронізаторів коробок передач, фланців осей, різних шестерень, кулачків муфт та ін.

Цей метод виготовлення щільних високоміцних деталей має ряд переваг перед звичайними ливарними. Структура отримується більш дрібнозерниста, забезпечується висока однорідність властивостей виробів, значно нижче витрати на механічну обробку деталей, стійкість штампів підвищується на 20 – 30 % в наслідок менших навантажень при пластичній деформації пористого металу, порівняно з штампуванням безпористого матеріалу. Даний метод піддається високому ступеню автоматизації від одержання порошку до виготовлення кінцевого виробу.

Устаткування та інструмент

Набір зразків порошкових легованих сталей отриманих різними методами. Мікроскоп. Випробувальна машина. Термічна піч.

Хід виконання роботи

1. Ознайомлюємося з технологіями виробництва порошкових легованих сталей.
2. Досліджуємо структуру, властивості та застосування даних матеріалів.
3. Виконуємо аналіз результатів дослідження структури.

Контрольні запитання

1. Опишіть способи маркування порошкових легованих сталей?
2. Порівняйте гомогенність та технологічні властивості легованих сталей отриманих з розпилених порошоків, частково-легованих порошоків та полікомпонентних сумішей?
3. Опишіть вплив міді, кремнію, хрому та молібдену на структуру та властивості порошкових легованих сталей?
4. Вкажіть на способи підвищення гомогенності порошкових легованих сталей?
5. Наведіть приклади позитивних якостей негомогенних структур?
6. Яким чином ступінь гомогенності твердого розчину впливає на стійкість аустеніту та критичну швидкість гартування порошкових сталей?
7. Обґрунтувати застосування ізотермічного гартування порошкових сталей?
8. Яким чином пористість та ступінь гомогенності впливають на процес відпуску порошкових сталей?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Мета роботи – вивчення структури, властивостей та технології виготовлення антифрикційних матеріалів.

Теоретичні відомості

Ефективність роботи багатьох об'єктів транспорту, машинобудування, енергетики, побутової та військової техніки визначається якістю вузлів тертя – підшипників. Загальними вимогами до цих матеріалів є висока зносостійкість і добра припрацьовуваність. У цих матеріалах повинні сполучатися суперечливі характеристики, тому ці матеріали в більшості є багатофазними.

Основні вузли тертя, де використовують антифрикційні матеріали, – це підшипники, підп'ятники, вкладиші, ущільнення, шарнірні пристрої, струмозмінальні пристрої та ін. Умови роботи цих, вузлів різноманітні – тертя зі змащенням, без змащення, у вакуумі, у широкому діапазоні температур, у рідких і газоподібних середовищах, в тому числі агресивних. Швидкості ковзання можуть становити до сотень метрів у секунду, навантаження - до десятків МПа (як статичні так і динамічні). Зношування може бути обумовлене не тільки чисто механічними та корозійними причинами, але і електроерозією. Як експлуатаційну характеристику антифрикційних матеріалів часто використовують добуток навантаження на швидкість $P \times v$, хоча така оцінка не враховує повною мірою умов змащення, температури та ін [11].

Відомо, що кращі антифрикційні властивості мають матеріали з дрібнозернистою структурою, яка складається із твердих і м'яких складових. Саме таку структуру забезпечують пористі матеріали, які доцільно виготовляти МПМ. Наявність пор у спечених матеріалах забезпечує добру приробляємість, що дозволяє використовувати для підшипників матеріали, які в компактному стані не мають антифрикційних властивостей, наприклад, залізо. Крім того, пори утворюють постійний резервуар мастила, яке забезпечує низький коефіцієнт тертя. Пористі підшипники відрізняються від кулькопідшипників безшумною роботою і значно простішою технологією виготовлення. Вихідні матеріали спечених пористих підшипників дешевше, ніж литих підшипників. Проте доцільність використання багатьох спечених антифрикційних матеріалів, визначається насамперед обсягом виробництва та ресурсом роботи.

Дані матеріали виготовляють на основі заліза, міді і їх сплавів, а також на основі титана, алюмінію та тугоплавких з'єднань. У табл. 5.1 представлені властивості деяких антифрикційних пористих матеріалів на основі заліза відповідно до ГОСТ 26802- 86.

Наведені в табл. 5.1 відомості відносяться до швидкостей ковзання від 2 до 3 м/с. До складу матеріалів входить графіт, мідь і ін.

Таблиця 5.1 – Склад та властивості антифрикційних матеріалів

Марка	Вміст вуглецю	Пористість	S _B , МПа	P _v , МПа×м/с	Граничне навантаження, МПа
ПА-Ж	< 0,3	17 ... 24	85	2,5 ... 5	2 ... 2,5
ПА-ЖГр	0,5 ... 1,2	15 ... 25	120	2,5 ... 10	3 ... 10
ПА-ЖГр2	1,4 ... 2,0	15 ... 25	100	8 ... 10	4 ... 5
ПА-ЖГр3	2,2 ... 3,2	15 ... 25	70	7 ... 29,5	3 ... 7
ПА-ЖГрК	0,6 ... 1,2	17 ... 23	100	12 ... 60	5 ... 25

Примітка. ПА – порошковий антифрикційний матеріал; Ж – залізо, Гр – графіт, Д – мідь, К – сірка. Параметри міцності і твердості вказані мінімальні.

Присутність *графіту* в антифрикційних матеріалах необхідно, з одного боку, як компонента, що змащує, а з іншого боку, для науглецювання металічної основи при спіканні, внаслідок чого утворюється перліт, що підвищує міцність і твердість виробів. Включення цементиту сприяють підвищенню зносостійкості, однак при цьому може підвищуватися і зношування валу, що є небажаним з економічної точки зору (доцільніше замінювати підшипники ніж ремонтувати вал). З підвищенням вмісту графіту до 3 – 4 % твердість та границя міцності підвищуються, а при збільшенні вмісту графіту > 4 %, знижуються.

Сірка, яка є присутньою в антифрикційних матеріалах у вигляді сульфідів сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей. Вона вводиться в шихту або в елементарному виді, або методом просочення спечених виробів розплавленою сіркою з наступним відпалом.

Присадка *міді* покращує пресуємість і міцність пресовок. За допомогою добавок міді у виробництві антифрикційних і конструкційних матеріалів регулюють об'ємні зміни при спіканні - процеси гетеродифузії, що відбуваються в системі Fe - Cu при спіканні, сприяють росту зразків, і тим самим компенсують усадку, що сприяє зменшенню припусків та підвищенню точності розмірів.

Легування міддю забезпечує підвищення міцності і твердості виробів від 30 до 60 % в результаті утворення твердих розчинів і цементування зерен спеченої залізної основи. Сплави залізо-мідь відносяться до сплавів з обмеженою розчинністю (рис.5.1).

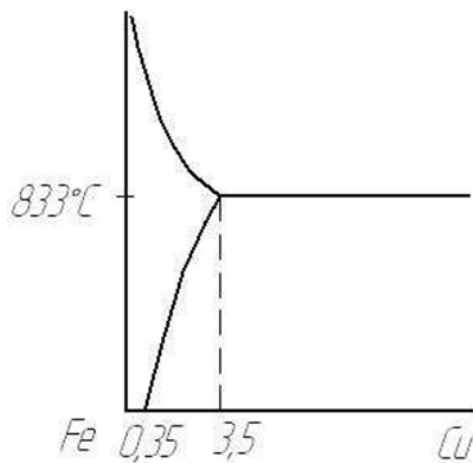


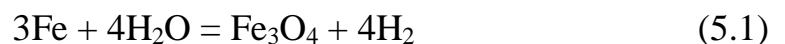
Рисунок 5.1 – Частина діаграми стану залізо – мідь

В них при старінні відбувається дисперсійне твердіння, що також може використовуватись для підвищення міцності та твердості. При вмісті міді від 5 до 7 % вона не виявляється в структурі сплаву. Вміст міді вище 7 % викликає виділення мідної складової по межах зерен, що знижує міцність сплаву, а також приводить до налипання її на вал, що пришвидшує зношування підшипника.

В умовах підвищених температур (до ~ 350 °C) і значних навантажень в агресивних середовищах можуть працювати антифрикційні матеріали на основі залізофторидних композицій (Fe + CaF₂). Композиції на основі сульфідів, селенідів, телурідів працюють при низьких температурах і у вакуумі.

На основі порошків нержавіючих сталей розроблені антифрикційні матеріали, що працюють у газовому та рідкому агресивному середовищах у інтервалі температур від 250 до 600 °C при швидкостях ковзання від 60 до 80 м/с [12]. На відміну від зливків такі порошкові заготовки не мають дефектів кристалізації, що виникають при переході з рідкого стану у твердий.

Для підвищення зносостійкості антифрикційних матеріалів також застосовують обробку паром при 500 – 600 °C. На поверхні частинок утворюються окисли за реакцією:



Обробка паром покращує корозійну стійкість і твердість. Цю обробку застосовують для підшипників, які працюють при підвищеній температурі, в вологій атмосфері, при різких коливаннях температур.

Технологія виготовлення антифрикційних матеріалів на основі заліза традиційна - змішують компоненти, пресують при тиску від 300 до 700 МПа. Для отримання визначеної залишкової пористості пресуванням здійснюють при визначеному питомому тиску, або застосовують пресуванням з обмежувачем висоти (пресування до упора) [13].

Спінання здійснюють при 1100 – 1150 °С у захисному середовищі. Отримані пористі заготовки потім калібрують і насичують мастилом. Калібрування не тільки забезпечує отримання деталей високої точності і чистоти поверхні, а також поліпшує фізико-механічні властивості деталей внаслідок зміцнення їх поверхневого шару.

Остаточними операціями при виготовленні антифрикційних деталей можуть бути калібрування та насичення олією. Метою калібрування є забезпечення кінцевих розмірів деталей та високої чистоти поверхні. Згідно з умовами експлуатації для підвищення антифрикційних властивостей перед калібруванням деталі насичують олією.

Бронзографітові втулки. Дані матеріали на основі міді додатково можуть містити: 1 – 4 % С; 8 – 12 % Sn. Існує два способи виготовлення бронзо-графітових підшипників: із порошку готової бронзи та із порошків металів, що входять до складу бронз.

Виготовлення пористих бронз за другим способом дозволяє отримати більш міцні пресовки порівняно з пресовками отримуваними за першим способом внаслідок присутності в суміші більш м'яких порошків олова.

В процесі спікання при нагріванні вище температури плавлення олова утворюється рідка фаза, яка обволікає тонким шаром частинки Cu і поступово зникає внаслідок утворення твердої h-фази CuSn. При цьому реалізуються переваги спікання з наявністю рідкої фази, що зникає до кінця даної операції. Далі на межі між h-фазою і Cu утворюється ε-фаза; взаємодія ε-фази з Cu приводить до

утворення δ -фази, яка поступово розчиняється в Cu з утворенням твердого розчину збагаченого оловом.

Вплив графіту на процес спікання в даних сплавах проявляється в механічному гальмуванні дифузійних процесів в результаті екранування контактних ділянок метал-метал. Графіт переміщує стадії спікання в область більш високих температур.

Основні властивості спечених пористих підшипників: це самозмащування, добра приробляємість, зносостійкість, міцність.

З механічних причин пориста поверхня може витримати менше навантаження, ніж суцільна. Тому при високих швидкостях обертання значення допустимих навантажень у пористих підшипниках нижче, ніж у литих [14].

Приробляємість, яка визначається часом, необхідним для зниження коефіцієнта тертя, між підшипником і валом у пористих втулок залежить від величини пористості. При надмірному збільшенні пористості приробляємість погіршується, що можна пояснити зменшенням міцності матеріалу, що приводить до руйнування метала на поверхні тертя, яке обумовлене викришуванням частинок. З цієї причини матеріали з крупних порошків приробляються гірше, ніж з дрібних. Вони мають меншу міцність і нерівності на поверхні ковзання більш крупних розмірів. Це приводить до підвищення коефіцієнта тертя і як наслідок зношування збільшується.

Багатошарові антифрикційні матеріали складаються із сталльної стрічки, що забезпечує міцність конструкції і напресованого пористого мідно-нікелевого шару, який після спікання просочують бабітом, утворюючим над ним тонкий (від 20 до 75 мкм) антифрикційний шар. Більша площа контакту бабіту зі спеченим мідно-нікелевим шаром забезпечує міцне механічне зчеплення, а нерівності рельєфу мідно-нікелевого скелета перешкоджають поширенню тріщин втоми. Підшар (мідно-нікелевий сплав) сам по собі являється антифрикційним матеріалом і оскільки оголювання підшару при зношуванні не призводить до аварії можна знизити товщину бабітового шару з 500 до 20 мкм [15].

Контроль спечених залізо графітових і залізо-мідь-графітових пористих виробів проводять по мікроструктурі, густині і твердості. Мікроструктура залізо-графітових виробів, спечених при 1050 °С, повинна уявляти собою перлітну основу з включеннями графіту, пор і фериту. Мікроструктура залізо-мідь-графітових виробів, спечених при 1150 °С, має перлітну основу з включеннями графіту, пор і фериту. Вміст фериту не повинен перевищувати від 10 до 15 %.

Ущільнювальні матеріали, використовують для усунення зазорів і запобіганню витoku пари, рідини, газу, у турбінах, насосах, компресорах (для торцевих і радіальних ущільнень, поршневих кілець і ін.). Ці матеріали виготовляють на основі нікелю з добавками міді, графіту, алюмінію, нітриду бору, фторидів. З одного боку, металеві складові забезпечують міцність та достатню пластичність матриці. З іншого боку, включення графіту та нітриду бору (графітоподібної модифікації) створюють сприятливі умови тертя. Підвищити жаростійкість матеріалу і розширити температурний інтервал його застосування можна легуванням матриці. Наприклад, працездатність двигунів внутрішнього згорання багато в чому визначається якістю поршневих кілець, експлуатованих при температурах від 300 до 400 °С і високих навантаженнях в умовах тертя. Для їх виробництва застосовують сплави на основі заліза з добавками міді, вуглецю, хрому, нікелю, молібдену, сульфідів. Виготовлені з таких матеріалів МПМ поршневі кільця мають в 2 - 2,5 рази більше високу зносостійкість порівняно з кільцями із сірого чавуну, проте дещо поступаються хромованим кільцям (більш коштовним) [16].

Устаткування та інструмент

Набір шліфів і деталей з антифрикційних матеріалів. Мікроскоп.

Хід виконання роботи

1. Ознайомлюємося зі зразками та деталями із антифрикційних матеріалів та технологією їх виготовлення.

2. Проводимо дослідження їх структури.
3. Виконуємо аналіз результатів дослідження структури.

Контрольні запитання

1. Призначення порошкових антифрикційних матеріалів, особливості їх експлуатаційних характеристик?
2. Обґрунтувати доцільність виготовлення та використання пористих матеріалів отриманих методами порошкової металургії. Особливості їх пресування та спікання?
3. Охарактеризувати технологію виготовлення та доцільність застосування методів порошкової металургії для отримання антифрикційних матеріалів на основі міді?
4. Охарактеризувати технологію виготовлення антифрикційних матеріалів на основі заліза?
5. Які процеси відбуваються при спіканні залізо-графітових матеріалів?
6. За якими технологіями виробляють бронзографітові деталі?
7. Як здійснюють контроль структури та властивостей деталей?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ВИЗНАЧЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ ЗРАЗКІВ ПОРОШКОВИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи - ознайомитися з методикою визначення ударної в'язкості зразків з принципом роботи маятникових копрів та дослідженням мікроструктури і характером зламу

Теоретичні відомості

Механічні властивості полімерів – комплекс властивостей, що визначають поведінку матеріалів при дії на них по-різному прикладених зовнішніх сил. При

впливі зовнішніх сил полімерні матеріали деформуються, а при значних і тривалих впливах руйнуються. Тому полімери характеризують за деформацією властивостями міцності [17].

Деформація – зміна структури, об'єму і лінійних розмірів тіла під тиском зовнішніх сил.

Міцність – це стійкість твердого тіла до дії зовнішніх сил без зміни форми і руйнування, що характеризується межею міцності, тобто величиною напруги, при якій ще не відбувається руйнування матеріалу в умовах навантаження. Граничні можливості матеріалу протистояти впливу зовнішніх сил характеризуються навантаженням, відповідним руйнуванню зразків (виробів).

Довговічність – це тривалість від моменту прикладання навантаження до моменту руйнування матеріалу. Залежить від структури матеріалу, внутрішнього напруження, а також від величини прикладених навантажень і температури випробування. Істотно впливають на довговічність технологія переробки і подальшої обробки виробів, умови експлуатації.

При стандартних випробуваннях, наприклад, на розтягнення і вигин, матеріал поглинає енергію повільно. Реально матеріали дуже часто швидко поглинають енергію прикладеного зусилля, наприклад, від падаючих предметів, ударів, зіткнень, падінь і т.д. Метою випробувань на міцність при ударі є імітація таких умов. Тому дуже важливим залишається питання в при виборі матеріалу для того чи іншого роду діяльності.

Ударна в'язкість часто є вирішальним фактором при виборі матеріалу. Багато пластмас, що мають цінні властивості, виявляються непридатними для застосування в машинобудуванні та інших галузях тільки тому, що під дією ударного навантаження мають тенденцію до крихкого руйнування. Проблема особливо важлива для матеріалів, які вважаються пластичними на підставі випробувань на розтяг з низькою або середньою швидкістю деформації. Ймовірність їх крихкого руйнування особливо висока в тому випадку, якщо концентрація напружень обумовлена конструктивними особливостями виробів або наявністю подряпин та інших дефектів [18].

Розроблені численні види випробувань на удар. Левер і Рис описують близько 15 різних методів, однак список можна продовжити. Ця велика кількість методів випробувань свідчить про труднощі порівняння результатів стандартних випробувань з експлуатаційними якостями. У випробуваннях всіх видів вимірюється енергія, що поглинається при зламі стандартного зразка стандартним ударником.

Методи випробування можна розділити на дві групи:

- методи обмеженої енергії, в яких енергія удару ударника забезпечує руйнування певної частки зразків;
- методи надлишкової енергії, при яких кінетична енергія ударника значно вища, ніж необхідна для руйнування зразків.

Випробування методом падаючого вантажу належать до першої групи, а випробування за Шарпі, Ізодом та на ударне розтягнення – до другої. Ці чотири методи включені до офіційних стандартів ASTM, BS, DIN, ISO і тому використовуються частіше за інші випробування на удар.

Для масових динамічних випробувань практично застосовується один метод – ударний вигин призматичних зразків з надрізом. Випробування проводять на маятникових копрах. У результаті таких випробувань визначається ударна в'язкість (a_n), яка є характеристикою опору матеріалу впливу динамічних навантажень.

Ударна в'язкість – це відношення роботи, витраченої на деформацію і руйнування зразка при ударному вигині (A_n), до площі поперечного перерізу зразка в місці надрізу (F).

$$a_n = \frac{A_n}{F} \quad (6.1)$$

Таким чином, розмірність ударної в'язкості кгс/см^2 , Дж/м^2 . *Ударна в'язкість* – складна механічна характеристика. Величина її залежить і від пластичності, і від міцності випробовуваного матеріалу. Чим вища пластичність і більше напруження на всьому протязі випробувань, тим більша робота, яку необхідно затратити на пластичну деформацію та руйнування в процесі випробування, тобто тим більша

ударна в'язкість. Тому випробування на ударну в'язкість зазвичай більш чутливі до зміни факторів, що впливають на міцність і пластичність (хімічний склад, дисперсність структури, форма зерен і т.д.), ніж статичні випробування, при яких окремо оцінюються характеристики міцності і пластичності [5].

Проведення випробувань на ударну в'язкість може мати різне призначення:

1. Оцінка поведінки матеріалу при динамічних навантаженнях, якщо деталі або вироби з цього матеріалу піддаються в процесі експлуатації таким навантаженням, тому що, як уже говорилося, механічні властивості при динамічних навантаженнях можуть відрізнятися від тих, які матеріал виявляє при статичному руйнуванні.
2. Контроль якості матеріалу, оскільки динамічні випробування більш чутливі до різних дефектів, що виникають в процесі виробництва й обробки (мікротріщини, неметалеві включення, шкідливі домішки, неоднорідність хімічного складу та структури і т.д.).
3. Оцінка схильності матеріалу до холодноламкості, тобто до переходу з в'язкого стану в крихкий при зниженні температури. Статичні випробування зазвичай не дають змоги оцінити схильність металу до переходу в крихкий стан і температуру цього переходу, тому що при статичних випробуваннях зразки можуть зберігати значну пластичність при охолодженні до дуже низьких температур.

Устаткування та інструмент

Для того, щоб зробити напружений стан більш жорстким для динамічних випробувань на вигин, застосовують зразки з надрізом (для випробувань крихких матеріалів, наприклад, чавуну, можуть застосовуватися динамічні випробування на ударну в'язкість на зразках без надрізу). Крім того, застосування зразків з надрізом значно зменшує енергію, необхідну для їх руйнування, що дозволяє зменшити розміри копра.

За ГОСТ 9454–78 (ISO 83:1976; ISO148:1983) (випробування на ударну в'язкість) застосовується кілька типів зразків. Основним вважається тип I (рис.6.1 а).

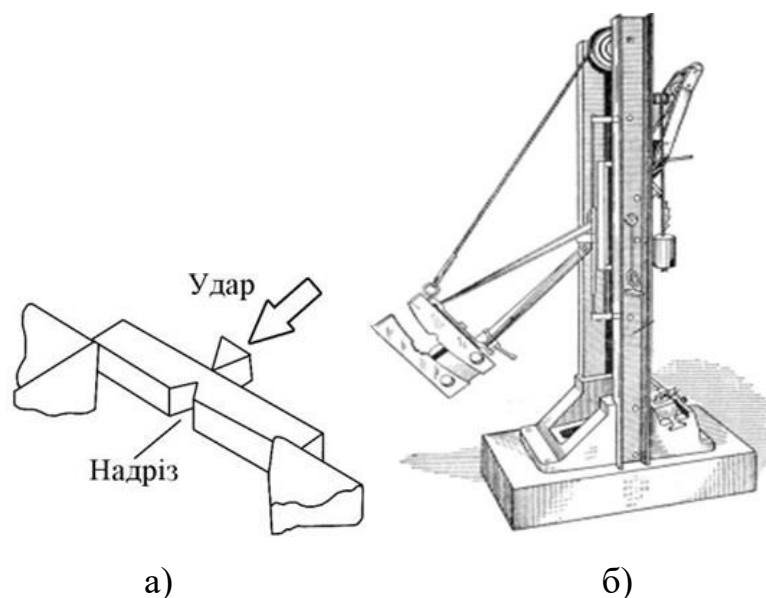


Рисунок 6.1 - Схема розміщення зразка для досліджень на ударну в'язкість (а), маятниковий копер МК-05-1 (б)

Оскільки при випробуваннях на ударну в'язкість умова подібності не реалізується, не можна перераховувати і порівнювати результати визначення ударної в'язкості на зразках різних розмірів і різної форми. Бажано, щоб зразки мали шліфовані поверхні, на них не повинно бути тріщин, задирок. Поверхня надрізу не повинна мати малюнка, подряпин і інших дефектів, – вони можуть істотно спотворити результати випробувань, адже саме дно надрізу зазвичай є місцем початку утворення тріщини, розвиток якої призводить до руйнування зразка. Якщо потрібно провести випробування термічно оброблених зразків, то надріз на них робиться після термічної обробки.

Для випробувань на ударну в'язкість найбільшого поширення набули маятникові копери. У даній роботі випробування проводяться на маятниковому копрі МК-05-1 (рис.6.1 б). Відстань до центру удару 325 мм, маса маятника в горизонтальному положенні з молотом 7,88 Н (0,804 кгс), в системі СІ – 1 кгс = 9,8 Н. Основною частиною копра є масивний маятник, який може гойдатися на осі. У піднятому положенні маятник має певний запас енергії (в залежності від висоти підняття). При падінні маятник, проходячи через вертикальне положення, вдаряє по зразку і руйнує його, на що витрачається частина енергії маятника. Частина енергії витрачається на підняття маятника після удару. Швидкість руху маятника в момент удару по зразку повинна бути в межах 4 – 7 м / с, що відповідає швидкості

деформації стандартних зразків порядку $\sim 1 \text{ сек}^{-1}$. Знаючи висоту підйому маятника до і після удару та його масу, можна підрахувати роботу, витрачену на руйнування зразка. Після удару маятник, переміщує уздовж шкали стрілку до рівня, його енергії після удару. Для обчислення ударної в'язкості потрібно витрачену при випробуванні роботу розділити на площу поперечного перерізу зразка.

Хід виконання роботи

1. Перш ніж приступити до випробувань зразків на копрі, потрібно перевірити правильність його роботи. Для цього піднімають і фіксують на якійсь висоті маятник копра. При цьому рамка зі шкалою встановлюється в певному положенні, відповідному збереженій енергії маятника. Після цього маятник відпускають без установки зразка на опори копра, і він повинен піднятися на ту ж висоту, з якої його відпустили і, якщо копер працює нормально, поводок маятника підніме стрілку приладу до нульової поділки шкали, бо енергія маятника ні на що не витрачається (якщо знехтувати втратами енергії на тертя в опорах осі маятника, на опір повітря і іншими втрати, які дуже малі). Якщо при такій перевірці стрілка зупиниться не на рівні нульової поділки шкали, необхідно з'ясувати причини цього і усунути їх.
2. Перед випробуваннями потрібно заміряти штангенциркулем з точністю до 0,1 мм довжину, ширину і товщину зразків, бо при їх виготовленні можливі відхилення від стандартних розмірів. Результати замірів занести в таблицю або протокол випробувань. Після цього можна приступати до роботи.
3. Для випробування зразка потрібно звести маятник, перевірити стан шкали і встановити зразок на опори копра. Зразок встановлюється так, щоб надріз був розташований посередині відстані між опорами (відстань між опорами копра 40 мм) і маятник бив по грані зразка, протилежній тій, на якій зроблено надріз. При перевірці установки шкали та встановлення зразка на опорах маятник обов'язково повинен бути закріплений фіксатором щоб уникнути випадкового його падіння.
4. При роботі на копрі необхідно користуватися огорожею, адже уламки зразка після руйнування можуть розлітатися в різні боки з великою швидкістю. Після

руйнування зразка потрібно описати руйнування і зібрати уламки зразка для дослідження мікроструктури і характеру зламу.

5. За вимірним значенням розмірів поперечного перерізу зразків і роботи, витраченої на їх руйнування, визначається ударна в'язкість для кожного зразка. Підраховується середнє значення ударної в'язкості за результатами випробувань трьох зразків. Всі дані заносяться в табл. 6.1. Ці результати співставляють з результатами вивчення характеру зламів і мікроструктури.

Таблиця 6.1 - Протокол випробувань

№	Довжина (l), мм	Ширина (a), мм	Висота (в), мм	Енергія удару (E), Дж	Ударна в'язкість (ан), кДж/м ²
1					
2					
3					

Контрольні запитання:

1. Що таке механічні властивості матеріалів?
2. Що таке деформація, міцність, довговічність?
3. Що таке ударна в'язкість?
4. За якою формулою визначається ударна в'язкість?
5. В яких одиницях за системою СІ вимірюється ударна в'язкість?
6. Як залежить величина ударної в'язкості від пластичності і міцності випробовуваного матеріалу?
7. Яке призначення може мати випробування на ударну в'язкість?
8. Які зразки використовують для випробування на ударну в'язкість?
9. Яке обладнання застосовують для випробувань на ударну в'язкість?
10. Опишіть методику проведення випробування на ударну в'язкість.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МАТЕРІАЛУ

Мета роботи - ознайомитись з методикою визначення твердості зразків за методами Брінелля, Віккерса, Роквелла, принципом роботи твердоміра 2074 ТПР та визначити твердість запропонованих викладачем зразків композиційних матеріалів.

Теоретичні відомості

Під *твердістю* розуміють властивість поверхневого шару чинити опір пружній і пластичній деформаціям або руйнуванню при місцевих контактних впливах з боку іншого, більш твердого тіла (індентора) певної форми та розміру [7].

Багатоманітність методів, які застосовуються, і різний фізичний зміст числа твердості ускладнюють формулювання загального визначення твердості як механічної властивості. У різних методах і при різних умовах проведення випробувань числа твердості можуть характеризувати пружні властивості, опір малим і великим пластичним деформаціям, опір матеріалу руйнуванню.

Для багатьох сплавів встановлена чітка залежність між твердістю, механічними та технологічними характеристиками (міцністю, зносостійкістю, обробкою різанням, тиском тощо). Тому вимірювання твердості є найбільш поширеним методом механічних випробувань. Способи визначення твердості поділяють на статичні та динамічні, залежно від швидкості прикладання навантаження, а за способом його прикладання – на методи вдавлювання та шкрябання. Найбільш розповсюджені методи, де використовується статичне навантаження індентора перпендикулярно до поверхні зразка. Це методи Брінелля, Роквелла та Віккерса [2].

Метод вдавлювання алмазної пірамідки (метод Віккерса). Цей метод є найточнішим і універсальним. Його використовують для контролю твердості відповідальних деталей, при проведенні дослідних робіт і т.д.

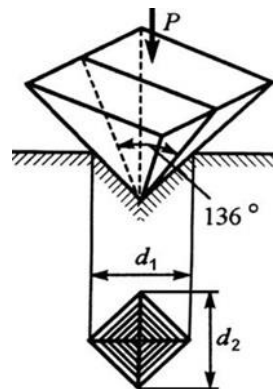


Рисунок 7.1 – Схема вимірювання твердості за Віккерсом

Завдяки застосуванню малих навантажень, цей метод може бути використаний для контролю твердості тонких виробів і взагалі виробів малих розмірів. Недоліками методу Віккерса являється тривалість процесу випробування, пов'язана з необхідністю вимірювання відбитка за допомогою мікроскопа. У всіх методах випробування на твердість дуже важливо правильно підготувати поверхневий шар зразка. Він повинен по можливості повно характеризувати досліджуваний матеріал.

Всі поверхневі дефекти (окалини, вм'ятини, грубі риски і т.п.) повинні бути видалені. Вимоги до якості випробовуваної поверхні залежать від індентора, що застосовується, і величини прикладеного навантаження. При випробуванні на твердість за методом Віккерса в поверхню матеріалу вдавлюється алмазна чотиригранна пірамідка з кутом при вершині 136° (див. рис. 7.1). Твердість характеризується площею відбитка. Індентор вдавлюється при навантаженнях 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 або 120 кгс. Після зняття навантаження, за допомогою мікроскопу, встановленого на твердомірі, вимірюють діагоналі відбитків d_1 і d_2 , що залишились на поверхні зразка, з точністю до 0,001 мм. Число твердості за Віккерсом HV розраховується як відношення навантаження P до вимірюваного значення діагоналі відбитку M :

$$HV = 2 \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} P = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (7.1)$$

де α – двогранний кут при вершині піраміди, який дорівнює 136^0 ;

P – навантаження на піраміду;

Середнє арифметичне значення d визначається за формулою:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (7.2)$$

де d_1, d_2 – значення довжини обох відбитків діагоналей, виміряних після зняття навантаження, мм.

Число твердості по Віккерсу позначається символом HV із зазначенням навантаження P та часу витримки під навантаженням, причому розмірність числа твердості ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) не ставиться. Тривалість витримки індентора під навантаженням для сталей 10 – 15 с, а для кольорових металів – 30 с.

Наприклад, 450 $HV_{10/15}$ означає, що число твердості за Віккерсом 450 отримано при навантаженні $P = 10$ кгс (98,1 Н), яке надається алмазній пірамідці протягом 15 с.

Чим менша глибина вдавнення індентора, тим краще повинна бути підготовлена поверхня і тим вимогливіше треба стежити за тим, щоб властивості поверхневого шару не змінилися внаслідок наклепу або розігріву при шліфуванні і поліруванні [3].

Твердість за методом Брінелля. Твердість за цим методом визначається відповідно до ГОСТ 9012-59. Як індентор використовується сталева загартована кулька діаметром 10; 5 або 2,5 мм, яка вдавлюється у поверхню матеріалу під навантаженням від 153 до 29400 Н (під 15,6 до 3000 кг). На поверхні зразка утворюються відбиток (лунка) у формі кульового сегмента діаметром d (рис. 7.2).

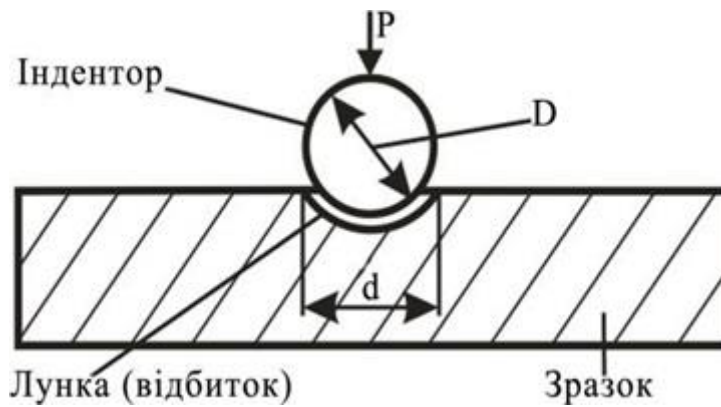


Рисунок 7.2 - Схема вимірювання твердості за Брінеллем

Цей діаметр вимірюють за допомогою спеціального мікро-скопа, на окуляр якого нанесена вимірювальна шкала, ціна поділки становить одну десяту міліметра. Діаметр відбитка визначають середнім значенням двох його вимірювань у взаємно перпендикулярних напрямках з точністю до 0,05 мм. Число твердості за Брінеллем, яке позначається літерами *HB* (*H* – від англ. hardness – твердість, *B* – Брінелль), вимірюється відношенням навантаження *P*, що діє на кульку діаметром *D*, до площі відбитка *F*:

$$HB = \frac{P}{F} \quad (7.2)$$

Площа шарового сегменту складе:

$$F = \frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (7.2)$$

Тоді:

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} = \frac{P}{\pi D h}, \quad (7.3)$$

де *P* – прикладене навантаження, кПа;

D – діаметр шарика, (мм);

d – діаметр відбитку, мм;

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \text{ – глибина відбитку, (мм).}$$

Одиниця вимірювання твердості за Брінеллем – кг/мм² або МПа (МН/ мм²).

В першому випадку твердості записуються так: *HB* 200, *HB* 250, де 200; 250 – величина твердості в кг/мм². Якщо твердість вимірюється в МН/м², то запис такий: *HB* 2000 МПа, *HB* 2500 МПа. Діаметр кульки, навантаження та час витримки під навантаженням вибирають залежно від очікуваної твердості та товщини матеріалу. При вимірюванні твердості кулькою певного діаметра з відповідним навантаженням на практиці користуються стандартною таблицею, в якій наводяться значення *HB* залежно від діаметра лунки і відношення P/D^2 . При вимірюванні твердості за Брінеллем потрібно виконувати такі умови:

- поверхня зразка має бути пласкою, чистою та гладкою;
- зразок повинен лежати на столику-підставці стійко, щоб під час вимірювання твердості не було його зрушення або прогинання;
- товщина зразка повинна бути не менша десятикратної глибини відбитка (більше 1...2 мм);
- відстань від центру відбитка до краю зразка повинна бути не менша $2,5d$, а між центрами двох сусідніх відбитків – не менша $4d$; для металів з *HB* < 350 відповідно $3d$ і $6d$.

Твердість за методом Роквелла. Визначення твердості за Роквеллом проводиться шляхом вдавлювання в зразок індентора у вигляді алмазного конуса з кутом при вершині 120° або сталеві кульки відповідного діаметра [3]. Навантаження на індентор здійснюється послідовно: спочатку попереднє P_0 , потім P_1 . Сума попереднього і основного навантаження P , яке вибирається залежно від індентора і очікуваної твердості (табл. 7.1, рис. 7.3).

За різницею глибин вдавлювання індентора під дією двох послідовних навантажень P_0 і P_1 роблять висновок про твердість матеріалу. Стрілка індикатору приладу за Роквеллом показує не цю різницю, а величину $(100 - e)$ по чорній шкалі С або А та $(130 - e)$ по червоній шкалі В:

Таблиця 7.1 - Умови вимірювання твердості за Роквеллом

Приблизна твердість за Брінеллем, $кГ/мм^2$	Сфера застосування	Шкала приладу за Роквеллом	Тип індентора	Навантаження P, H	Межі вимірювання твердості за шкалою Роквелла
Більше 700	Надтверді матеріали, цементовані сталі	A чорна	Алмазний конус	600	70...90
230...700	Тверді та термічно оброблені сталі	C чорна	Алмазний конус	1500	20 ...67
60...230	М'які матеріали	B червона	Сталева кулька	1000	25...100

$$b = \frac{h_1 - h_0}{0,002}, \quad (7.4)$$

де h_1 і h_0 – глибини вдавлювання індентора при прикладанні відповідно повного та попереднього навантаження;

0,002 – умовна одиниця твердості (ціна поділки шкали індикатора приладу).

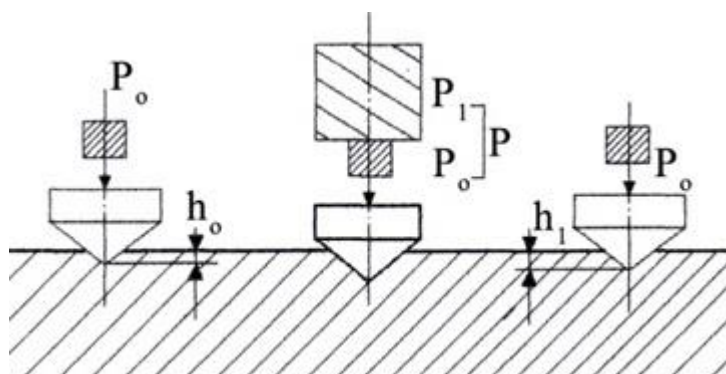


Рисунок 7.3 - Схема вимірювання твердості за Роквеллом

Одиниця твердості за Роквеллом – безрозмірна величина, що відповідає осьовому переміщенню індентора на 0,002 мм. Твердість за Роквеллом позначається так: HRB 30, HRC 60, HRA 80, тобто твердість 30 за шкалою B, 60 – за шкалою C, 80 – за шкалою A. Числа HRA можна перевести на числа HRC = 2HRA – 104.

Визначення твердості за Роквеллом використовується дуже широко, бо цей метод дає змогу вимірювати твердість різних матеріалів – як твердих, так і м'яких. Відбитки від індентора на досліджуваній поверхні дуже малі, тому можна

випробовувати готові деталі без їх псування. Випробування легко досягне, не вимагає ніяких обчислень і займає всього декілька секунд.

Число твердості за Роквеллом читається прямо на відповідній шкалі індикатора і може бути легко переведене в число твердості за Брінеллем за допомогою спеціальних таблиць.

Вимірювання

Поверхні, як випробовуваного зразка, так і опорна, повинні бути паралельні і не мати таких дефектів, як окалина, забоїни, бруд і т.п. Всі дефекти повинні бути видалені дрібнозернистим наждачним кругом або напилком. В процесі обробки поверхня не повинна нагріватися вище 100...150° С, адже це може призвести до зміни її твердості. Величину навантаження і тип індентора (алмазний конус або сталева кулька) вибирають в залежності від твердості випробовуваного матеріалу користуючись табл. 7.2. Вибравши необхідний індентор та навантаження, встановивши їх на твердомір, приступають до проведення випробувань.

Таблиця 7.2 - Підбір навантаження та індентора для випробування

Шкала за Роквеллом	Попереднє навантаження, Н (кгс)	Загальне навантаження, Н (кгс)	Діаметр індентора, мм
R	98,1 (10)	588,4 (60)	12,700±0,010
L	98,1 (10)	588,4 (60)	6,330±0,005
N	98,1 (10)	980,7 (100)	6,350±0,005
E	98,1 (10)	980,7 (100)	3,175±0,005
K	98,1 (10)	1471 (150)	3,175±0,005

Твердість вимірюють за допомогою приладу 2074 ТПР (рис. 7.4), згідно з ГОСТ 23677-79, що забезпечує прикладення навантажень: попереднє = 29,42 Н (3,0 кгс); загальне = 147,1 Н (15 кгс); 294,2 Н (30 кгс); 441,3 Н (45 кгс).

Наконечники згідно ГОСТ 23677-79; ГОСТ 9377-81. Міри твердості зразкові згідно з ГОСТ 9031-75.

Хід виконання роботи

1. Увімкнути прилад у мережу змінного однофазного струму напругою 220 В.

2. Встановити на стіл виріб або зразок, що випробовується. Маховиком 1 підтиснути його до наконечника до тих пір, поки велика стрілка індикатора не стане на нуль чорної шкали, а мала – на чорну риску. У цьому положенні попереднє навантаження прикладене, лампа «попереднього навантаження» горить. Точне встановлення нуля шкали проти кінця великої стрілки проводять обертянням ручки 2.

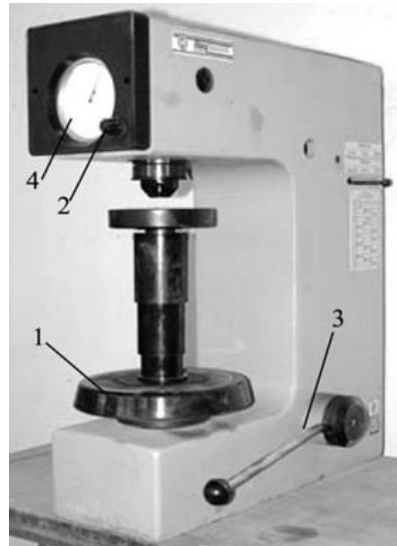


Рисунок 7.4 - Твердомір 2074 ТПР

3 Через 10 с після попереднього навантаження загоряється лампа «прикладення навантаження», в цей момент, повернувши рукоятку 3 вправо і вгору, прикласти основне навантаження.

4 Через 15 с після прикладення основного навантаження загоряється лампа «зняття навантаження»: повернувши рукоятку 3 вниз і вліво, зняти основне навантаження.

5 Через 15 с після зняття основного навантаження загориться лампа «відлік»; зняти покази за червоною шкалою індикатора 4.

Покази знімають в такий спосіб:

- відзначити, скільки разів після застосування основного навантаження велика стрілка проходить через нуль, за червоною шкалою;
- відняти від цього числа кількість проходжень стрілки через нуль за червоною шкалою після зняття основного навантаження.

Якщо різниця дорівнює нулю, то записати покази приладу, додаючи до нього 100, якщо різниця дорівнює 1, то покази записати без змін, якщо різниця дорівнює 2, то записати покази за шкалою з вирахуванням 100.

Значення твердості має бути в діапазоні 50...115 одиниць за Роквеллом. За межами цих значень вимір вважається неточним. Для правильного визначення твердості повторити вимірювання, змінивши індентор або навантаження згідно з табл. 7.1.

Перші покази після зміни індентора до уваги не брати.

При проведенні випробування за методом Роквелла α порядок роботи такий:

- встановити наконечник з кулькою діаметром 12,700 мм і навантаженням 588,4 Н (60) (кгс);
- покласти на стіл приладу плитку з м'якої міді МЗ ГОСТ 859-78 товщиною не менше 6 мм;
- прикласти попереднє навантаження і встановити велику стрілку індикатора на нуль за чорною шкалою;
- прикласти основне навантаження і не знімати його до тих пір, поки стрілка індикатора не зупиниться;
- записати покази, зняти навантаження, знову встановити стрілку на нуль;

Ці операції повторювати до тих пір, поки покази індикатора не будуть залишатися постійними після кожної програми основного навантаження. Записати ці покази індикатора в поділках чорної шкали (d_s).

- покласти на стіл зразок, виконати операції, які описано на початку в п. 1, за винятком того, що після застосування попереднього навантаження стрілку індикатора встановити на нуль на 10 с і відразу прикласти основне навантаження. Протягом 15 с прикладання основного навантаження, в момент загоряння лампи «зняття навантаження» записати глибину вдавнення в поділках чорної шкали індикатора (d_h – глибина вдавнення за 15 с);

Визначити твердість за Роквеллом α по формулі:

$$R_{\alpha} = 150 - (d_h - d_s), \quad (7.8)$$

де R_α – число твердості за Роквеллом α ;

d_h і d_s – значення, записані при роботі в поділках чорної шкали (одиницях твердості).

– для кожного виробу або зразка провести не менше п'яти вимірювань та знайти середнє арифметичне значення;

Перший вимір до уваги не брати.

– відвести виріб або зразок, що випробовувався, від наконечника обертанням маховика проти годинникової стрілки і зняти зі столу.

При тривалій перерві в роботі відімкнути прилад від мережі.

Отримані результати занести до табл. 7.3.

Таблиця 7.3 - Протокол випробувань

№	Зразок	Шкала за Роквеллом	Показання індикатора в розподілах чорної шкали (d_s)	Глибина вдавлення в поділках чорної шкали індикатора (d_h)	Число твердості за Роквеллом (R_α)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Контрольні запитання

1. Що таке твердість?
2. Які методи вимірювання твердості використовуються на практиці, і які властивості матеріалу вони відображають?
3. Які переваги вимірювання твердості в порівнянні з вимірами інших механічних властивостей (наприклад, міцності)?
4. Суть методу вимірювання твердості за Віккерсом? Розрахунок та розмірність одиниць твердості.
5. Суть методу вимірювання твердості за Брінеллем. Коли цей метод не можна використовувати? Розмірність одиниць твердості і переведення одиниць НВ в МПа.

6. Суть методу вимірювання твердості за Роквеллом. Переваги цього методу в порівнянні з методом Брінелля. Яка розмірність одиниць твердості?
7. Навіщо при вимірюванні твердості за методом Роквелла використовують два навантаження: попереднє і основне?
8. Суть методу вимірювання твердості за Віккерсом. Переваги цього методу в порівнянні з іншими методами вимірювання твердості (за Брінеллем і Роквеллом). Розмірність одиниць твердості.
9. У чому полягає складність вимірювання твердості за Віккерсом?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ДОСЛІДЖЕННЯ НА ВТОМУ ЗРАЗКІВ ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ЗГИНУ З КРУЧЕННЯМ

Мета роботи - вивчення методики випробувань на втомлюваність зразків з полімерних композиційних матеріалів циліндричної форми в умовах згину з крученням.

Теоретичні відомості

Руйнування матеріалу при напруженнях, що періодично змінюються, відрізняється від руйнування матеріалу при дії статичних навантажень (навіть пластичні матеріали руйнуються раптово, без помітної пластичної деформації). Руйнування відбувається не тільки при напруженнях, менших за межу міцності, але іноді навіть при напруженнях, менших за межу текучості. Втомний злам характеризується наявністю двох зон: зовнішньої – гладкої притертої, і внутрішньої – крупнозернистої, по якій стався миттєвий злам після ослаблення робочого перерізу втомними тріщинами.

Здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при змінних напруженнях характеризується *межею витривалості*, яка для зразків з даного матеріалу

залежить від виду деформації (розтягування, стиснення, кручення, вигин) і від характеру зміни напружень в часі.

На величину межі витривалості зразка в значній мірі впливають концентрація напружень в місцях різкої зміни перерізів (галтелі, отвори, виточки і т. д.), стан поверхні (висока шорсткість, надрізи, подряпини і т. д.) і діаметр випробовуваних зразків. Випробування на витривалість зазвичай проводять при вигині обертового зразка [3].

Для визначення межі витривалості металу випробовують не менше 10 зразків. На рис. 8.1 дана схема навантаження зразка і епюри згинального моменту для машини МУИ- 6000.

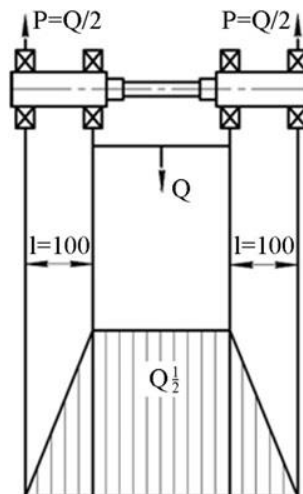


Рисунок 8.1 - Схема навантажень зразка та епюри згинального моменту

Постійне навантаження Q викликає змінні напруження в обертовому зразку. Зміни навантаження в зв'язку з обертанням зразка відбуваються по симетричному циклу, максимальне напруження якого визначають за формулою 8.1.

Навантаження Q знаходять за формулою:

$$Q = 2P = \frac{\sigma_{вих} \pi d^3}{161} \quad (8.1)$$

Напруження $\sigma_{вих}$, при якому випробовують зразки, рекомендується вибирати для першого зразка $0,6 \sigma_p$ (для сталей) та $0,4 \sigma_p$ (для легких сплавів та

полімерів), де σ_p – межа міцності при розтягуванні; для наступних зразків напруження зменшують на 2 або 4 кг/мм² (20 або 40 Н/мм²).

$$\sigma_{\max.p} = \sigma_{\min} = \frac{M_H}{W_X} = \frac{Pl}{\frac{\pi d^3}{32}}, \quad (8.2)$$

де $\sigma_{\max.p}$ – максимальне напруження розтягування;

σ_{\min} – мінімальне напруження стиснення;

M_H – згинальний момент у небезпечному перерізі зразка;

W_X – осьовий момент опору;

P – сили, що діють на зразок;

l – відстань від точки прикладання сили до найближчої опори;

d – діаметр зразка.

Для зруйнованих зразків відзначають число циклів за лічильником обертів.

При зниженні навантаження зразки витримують все більше число циклів. Випробування закінчують, якщо зразок витримує певне число циклів – *базу випробувань*. Сталеві зразки випробовують на базі 10 мільйонів циклів, зразки з легких сплавів на базі 20-50 мільйонів [3].

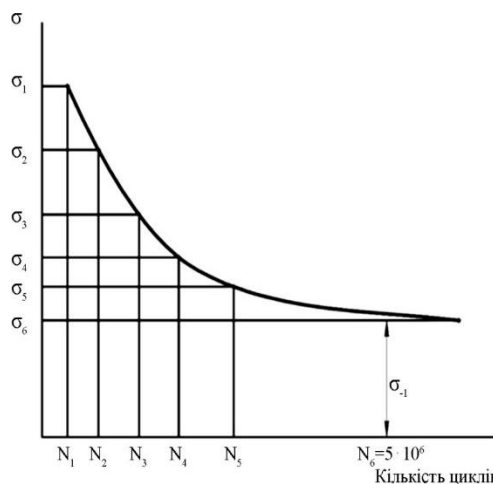


Рисунок 8.2 - Діаграма випробувань на витривалість (крива Велера)

Межа витривалості при симетричному циклі зміни напружень – це найбільше напруження циклу, при якому зразок витримує без руйнування задане число циклів, що береться за базу. Результати випробування зразків наносять на

діаграму в прямокутних координатах, де по осі ординат відкладають напруження, а по осі абсцис – кількість циклів.

На рис. 8.2 подана діаграма (крива Велера), побудована за точками, що відповідають зруйнованим зразкам.

Устаткування та інструмент

Для випробування обертових циліндричних зразків при чистому згині призначена машина МУИ-6000.

Технічні характеристики: навантаження на зразок – 10...100 кг (100...1000 Н); найбільший згинальний момент – 500 кг·см (50 Нм); частота навантаження – 100 Гц; зразки циліндричні з головками діаметром 12, 17 або спеціальні.

Конструкція машини показана на рис. 8.3, всі механізми змонтовані на литій чавунній станині.

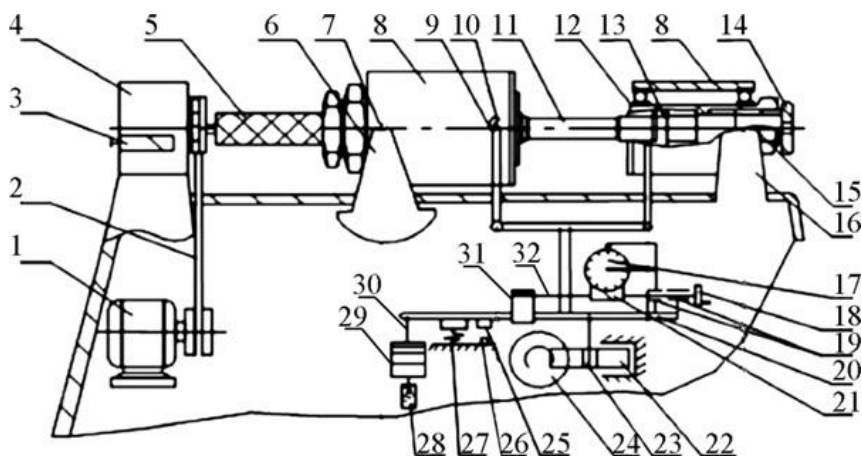


Рисунок 8.3 - Машина МУИ-6000 для випробування на втомлюваність при чистому вигині

Зразок 11 закріплюється в шпindelних бабках 8. На корпусах бабок знаходяться цапфи 10, через які за допомогою сережок 9 передаються сили від механізму навантаження. Ліва бабка спирається на стійки 6 через підшипники 7, права – на стійки 16 через рухомі підшипники 15. В корпусі кожної бабки вміщується шпindel 12, що має всередині конусну цангу 13. У цанзі затискається головка зразка, що випробується.

Затиск цанги проводиться шляхом повороту гайки 14. Обертання лівого шпинделя і, отже, зразка здійснюється електродвигуном 1 через клинопасову передачу 2 і гнучкий валик 5. Число обертів (циклів) фіксується лічильником 3, закріпленим на корпусі черв'ячного редуктора 4 з передавальним відношенням 1:100.

Механізм навантаження, що забезпечує створення необхідного згинального моменту на випробовуваному зразку, складається з вантажного важеля 20, шарнірно пов'язаного з сергами 9, через які передається навантаження на шпиндельні бабки. На важелі 20 закріплені два підшипники ковзання 19, в яких обертається гладкий кінець гвинта 32. При обертанні цього гвинта маховиком 18 вантаж 31 переміщується по важелю 20 і одночасно через черв'ячну пару 21 забезпечується поворот шкали навантажень 17, яка вказує навантаження на серги, створюване тільки рухомим вантажем 31. Це навантаження змінюється в межах 10...20 кг (100...500 Н). Навантаження більше 20 кг (200 Н) можна створити за допомогою змінних вантажів 29 на підвісці.

Навантаження проводиться шляхом обертання маховика 24, який через черв'ячну пару 22 опускає гвинт 23, пов'язаний з вантажним важелем машини. При руйнуванні зразка важіль опускається на амортизатор 27 і одночасно діє упором 25 на мікроперемикач 26. Останній вимикає електродвигун. Заспокоювач 27 поглинає вібрації вантажного важеля при роботі машини.

На рис. 8.4 показані стандартні форма і розміри зразків для випробування на машинах МУИ-6000 за ГОСТ 25.502-79.

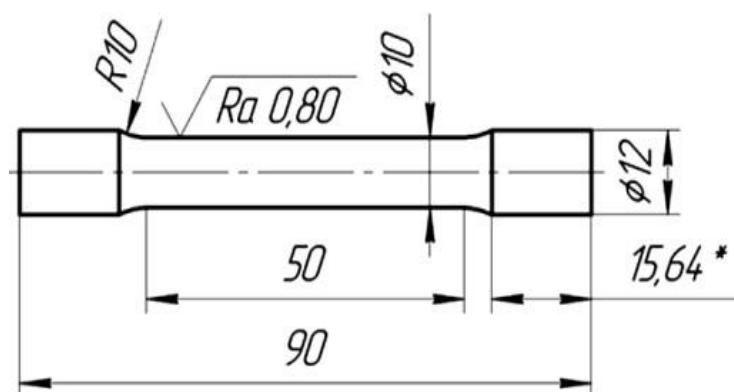


Рисунок 8.4 - Зразок випробування на втомлюваність при чистому згині

Величина межі витривалості матеріалу залежить від розміру зразків (масштабний фактор), чистоти обробки поверхні і концентрації напружень, тому при випробуванні на витривалість до зразків висувають жорсткі вимоги щодо їх форми, розмірів і чистоти обробки поверхні.

Хід виконання роботи

1. Виберіть зразок. Необхідно знати матеріал, з якого виготовлений зразок, межу міцності при розтягуванні та геометрію. Параметри відібраного зразка запишіть для звіту і повторного дослідження в табл. 8.1.
2. Встановіть зразок в МУИ-6000 (зразок не стане, поки підпірка вантажу не буде піднята обертанням штурвала). Візьміть зразок в руки. Вставте спочатку в один кулачок, а потім в другий та затягніть гайки фіксації цангових затискачів.
3. Виберіть необхідне навантаження. При обертанні маховика 18 на шкалі 17 видно, яке навантаження діє на зразок; якщо необхідно більше 20 кг, візьміть додатковий вантаж (на вантажі вибите відповідне маркування) і встановіть його на підвіс 30. Сумарно маса встановленого вантажу не повинна перевищувати 15 кг.
4. Натисніть кнопку “ПУСК”. Двигун почне обертати зразок з частотою 1740 об/хв.
5. Приберіть підпірку вантажу обертанням штурвала підпірки.
6. При досягненні числа N зразок ламається. МУИ-6000 вимикається автоматично.
7. Запишіть в звіт кількість циклів, пройдену зразком до руйнування, масу вантажу при випробуванні і параметри зразка.
8. Половинки зламаного зразка маркуються та відкладаються для подальшого аналізу характеру злому.
9. Дослід повторити 10 разів, відповідно до ГОСТ (викладач може дати іншу кількість досліджень).
10. Запишіть результати випробувань зразка до табл. 8.1 для звіту.

Таблиця 8.1 - Форма запису результатів випробувань

№ зразка	Розміри зразка, мм		Навантаження Q, кг	Час, хв	Кількість циклів $N \cdot 10^6$
	<i>l</i>	<i>d</i>			

Контрольні запитання

1. Яке практичне значення має випробування матеріалу при змінних напруженнях?
2. Вкажіть основні чинники, що впливають на міцність матеріалів при змінних напруженнях.
3. Чи може статися руйнування деталі, якщо вона працює при змінних напруженнях, менших межі текучості?
4. Чи можна за характером зламу зразка встановити, за яких (постійних або змінних) напружень випробовувався зразок?
5. Що називається межею витривалості?
6. Чи впливає на величину межі витривалості діаметр випробовуваного зразка?
7. Як будується діаграма для визначення межі витривалості?
8. Які вимоги висувають до зразків при випробуванні на втомлюваність?
9. Що розуміють під терміном «База випробувань» при випробуванні на втомлюваність?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

ВИВЧЕННЯ БУДОВИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ І ЗАСТОСУВАННЯ В ПРОМИСЛОВІСТІ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ТА ТЕРМОРЕАКТИВНИХ ПЛАСТМАС

Мета роботи – провести порівняльні дослідження структури, фізико-механічних властивостей термопластичних та терморективних пластмас і проаналізувати технології виготовлення з них деталей.

Теоретичні відомості

Пластмаси широко застосовуються в різних галузях техніки (авіації, автомобілебудуванні, суднобудуванні). Практика вітчизняного і закордонного машинобудування показала доцільність використання вказаних матеріалів замість кольорових і чорних металів та сплавів [19].

Основа цих матеріалів – полімери. Поряд із безпосередньо полімерами часто використовують їх композиції з різними інгредієнтами – пластмаси. За складом пластмаси підрозділяють на прості (без наповнювачів) і складні (з наповнювачами). Прості пластмаси складаються тільки із зв'язуючої речовини – одного високомолекулярного з'єднання (полімеру).

Складні пластмаси містять декілька інгредієнтів (ДСТУ EN ISO 8256:2017). Інгредієнти вводять для покращення властивостей або для полегшення переробки пластмас. До основних інгредієнтів відносяться: наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори, антистатика, агенти, що зшивають молекули полімеру в сітку, барвники та речовини, що змащують, прискорюють твердіння, поліпшують антифрикційні або фрикційні властивості. Так, наприклад, стабілізатори підвищують стійкість пластмас до впливу різних факторів (світла, тепла), що сприяють розпаду полімеру. Пластифікатори поліпшують технологічні і експлуатаційні властивості полімерів. Наповнювачі вводять для підвищення міцності, твердості, в'язкості, хімічної стійкості і поліпшення інших властивостей полімерів.

В залежності від наповнювача термореактивні пластмаси підрозділяють на порошкові (прес-порошки), волокнисті і шаруваті.

Як наповнювачі в прес-порошках застосовують органічні (деревне борошно) і мінеральні (мелений кварц, азбест, слюда, графіт) порошки. Порошкові наповнювачі додають пластмасі твердості, водо- стійкості, хімічної стійкості.

Недоліками пластмас з порошковими наповнювачами є невисокі міцність і ударна в'язкість.

До пластмас з волокнистими наповнювачами відносяться волокнити. *Волокнити* це композиція з волокнистого наповнювача у вигляді волокон, просочених зв'язуючою речовиною. У порівнянні з прес-порошками вони мають вищу ударну в'язкість. Волокнити застосовують для виготовлення деталей, що працюють на згинання і скручування (рукоятки, фланці, втулки, шківни, маховики).

Для одержання конструкційних термопластів як зв'язуючу речовину найбільш часто застосовують: полівінілхлорид, полеолефіни, поліаміди, фторопласт, поліуретан. Термопластичні пластмаси у порівнянні з традиційними конструкційними матеріалами мають:

- меншу густину, $(0,9 - 2,2) \times 10^3$, кг/м³
- вищу хімічну стійкість;
- кращі показники фрикційних або антифрикційних властивостей;
- вищу здатність гасити динамічні коливання при знакозмінних навантаженнях.

Разом з цими істотними перевагами термопластичні пластмаси мають недоліки, які стримують їх застосування в промисловості. Так більшість полімерів втрачає конструкційну міцність при нагріванні уже до 100 °С, мають низьку теплопровідність. При експлуатації деталей з термопластичних пластмас внаслідок розігрівання прискорюються процеси старіння, які призводять до зниження їх експлуатаційних характеристик.

Більш детально фізико-хімічні характеристики, переваги та недоліки основних конструкційних термопластів і приклади їх застосування наведено у табл. 9.1.

Значення основних механічних властивостей термопластів наведено у табл. 9.2. З вказаної таблиці можливо побачити, що границя міцності термопластів складає від 10 до 100 МПа, модуль пружності знаходиться в межах $(1,8 - 3,5) \times 10^3$ МПа. Це у 10 - 100 разів нижче, ніж у металів і кераміки. Границя витривалості термопластів становить 0,2 - 0,3 від границі міцності [20].

Під навантаженням термопластичні полімери поведуться як в'язкопружні речовини, а їх деформація є сумою пружної деформації, високоеластичної

деформації і деформації в'язкого плинину. Співвідношення між вказаними складовими частинами деформації непостійні і залежать як від структури, так і від параметрів деформування: швидкості та температури, які визначають стан полімеру. Наприклад, вище температури склування (в склоподібному стані) термопласти при розтягненні, як правило, сильно подовжуються. При розриві їх залишкова деформація складає десятки і навіть сотні відсотків. При нагріванні міцність термопластичних пластмас зменшується, вони стають більш в'язкими і схильними до повзучості. При тривалій дії навантаження міцність пластмас знижується і з'являється залишкова деформація. При збільшенні швидкості деформування підвищується твердість пластмас і зростає їх схильність до крихкого руйнування.

Більш надійними ніж термопласти є термореактивні пластмаси. Термореактивні полімери застосовуються після твердіння, що обумовлене утворенням сітчастої структури з високою щільністю поперечних хімічних міцних зв'язків між макромолекулами. При цьому вони стають твердими, неплавкими і стійкими до старіння.

Перевагою реактопластів порівняно з термопластами є стабільність та мала залежність механічних властивостей від температури, швидкості деформування і тривалості дії навантаження, але при випробуваннях на розтяг зразки термореактивних матеріалів руйнуються без пластичного плинину і утворення шийки.

При нагріванні відбувається зниження міцності і твердості реактопластів, однак у робочому інтервалі температур вони мають кращі механічні властивості, навантажну здатність, ніж термопласти. Важливими перевагами термореактивних пластмас є висока питома міцність (S_v/r), жорсткість (E/r) а також вища, ніж у термопластів, твердість. Допустимі напруження для термореактивних пластмас складають від 15 до 40 МПа, що істотно вище, ніж для термопластів. Однак більшість термореактивних полімерів після твердіння має низьку ударну в'язкість. До найважливіших термореактивних полімерів відносяться фенолформальдегідні, епоксидні, поліефірні і кремнійорганічні речовини.

Відомі фенопласти на основі резольних і новолачних фенолформальдегідних полімерів. Резольні полімери забезпечують більш високу хімічну стійкість і водостійкість, однак, вони гірші новолачних за технологічними властивостями.

Фенопласти зносостійкі, добре чинять опір повзучості при температурах до 200 °С, стійкі в агресивних розчинах, паливі, змащувальних матеріалах і низькокоштовні. З фенопластів виготовляють кнопки, ручки, контейнери, електроарматуру.

Амінопласти близькі за властивостями до фенопластів, але вони більш коштовні і менш технологічні.

Композиції на основі епоксидних смол застосовують у машинобудуванні для виготовлення різного інструментального оснащення, витяжних і формувальних пристосувань, ливарних моделей і іншого оснащення. Епоксидні та поліефірні смоли можуть твердіти при кімнатній температурі з малою усадкою. Основні властивості реактопластів наведено в табл. 9.3.

В азбоволокнитах як наповнювач застосовується азбестове волокно, як зв'язувач використовують, в основному, фенолформальдегідну смолу. Азбоволокнити мають підвищену теплостійкість (понад 200 °С), високі фрикційні властивості, стійкі до дії кислот. Азбоволокнити використовують як матеріал для виготовлення деталей гальмових пристроїв. З матеріалу фаоліна (різновид азбоволокнитів) виготовляють кислототривкі, ванни, труби і інші деталі.

Шаруватими пластмасами називають пластмаси, у яких аркуші наповнювача зв'язані полімером у монолітний матеріал. Листові наповнювачі, покладені шарами, надають пластику анізотропність. Матеріали випускають у вигляді листів, плит, труб [21].

Гетинакс одержують на основі модифікованих фенольних, аніліноформальдегідних, карбамідних смол і різних сортів папера. Гетинакс можна застосовувати при температурі від 120 до 140 °С. Він стійкий до дії хімікатів. Гетинакс застосовується як електроізоляційний матеріал. Його основні фізико-механічні властивості наведено у табл. 9.3.

Текстоліт (зв'язуюча речовина-термореактивні смоли, наповнювач - бавовняні тканини) серед шаруватих пластмас має найбільшу здатність поглинати вібраційні навантаження. Його використовують для різноманітних середньонавантажених деталей, що працюють в умовах тертя (зубчасті колеса, підшипники). Такі передачі працюють безшумно при частоті обертання до 30000 обертів за хвилину. Текстолітові вкладиші підшипників служать у від 10 до 15 разів довше бронзових. Але використовувати текстолітові підшипники можна тільки при температурах не вище 80 – 90 °С. Такі підшипники застосовуються в прокатних станах, відцентрових насосах, турбінах.

Деревошаруваті пластмаси (ДШП) складаються з тонких листів дерев'яного шпону, просочених феноло- або креозольноформальдегідними смолами і спресованими у вигляді листів або плит. ДШП мають високі фізико-механічні властивості, низький коефіцієнт тертя. Їх недоліком є чутливість до вологи. З ДШП виготовляють шківни, втулки, корпуси насосів, підшипники, деталі автомобілів.

Азботекстоліт містить від 38 до 43 % зв'язувача, а інше - азбестова тканина. Азботекстоліт є конструкційним фрикційним матеріалом. Найбільш високу теплостійкість (300 °С) має матеріал на кремнійорганічній зв'язуючій речовині. Фенольні азбопластики мають високі характеристики міцності. З азботекстоліта виготовляють лопатки ротаційних бензонасосів, фрикційні диски, гальмові колодки [19].

Таблиця 9.1 – Фазовий склад переваги, недоліки і призначення конструкційних термопластів

Назва термопласта	Фізико-хімічні характеристики	Основні властивості	Недоліки	Призначення
1	2	3	4	5
Поліетилен високого тиску (ПЕВТ)	$(-CH_2-CH_2-)_n$ Ступень кристалічності 55 – 65 %, густина $(0,913 - 0,929) \times 10^3$ кг/м ³	Нерозчинний у воді, ацетоні, спирті, хімічностійкий, морозостійкий до – 70 °С	Схильний до старіння	Несилкові деталі, деталі хімічної апаратури
Поліетилен низького тиску (ПЕНТ)	$(-CH_2-CH_2-)_n$ Ступень кристалічності 74 – 95 %, густина $(0,949 - 0,953) \times 10^3$ кг/м ³	Має більш високі показники міцності та теплостійкості ніж ПЕВТ		Конструкційні деталі насосів, труби

Поліпропілен	$(-\text{CH}_2-\text{CHCH}_3)_n$ густина (0,90-0,91) $\times 10^3$ кг/м ³	Порівняно з поліетиленом має більш високі показники міцності та теплостійкості (до 150°C). Не розчиняється у воді, у органічних розчинниках, стійкий до дії киплячої води і лугів	Низькі термостійкість, світлостійкість, морозостійкість (до -20 °C)	Конструкційні деталі автомобілів, корпуси насосів, труби
Полістірол	$(-\text{CH}_2-\text{CHC}_6\text{H}_5)_n$ аморфний полімер, густина (1,05-1,08) $\times 10^3$ кг/м ³	Стійкий у лугах і кислотах (в тому числі і плавиковій), із розглянутих полімерів найбільш стійкий до дії іонізуючих випромінювань	Схильний до утворення тріщин, невисокі міцність і теплостійкість	Ручки корпуси, ємності для хімікатів
АБС-пластики	Сополімери полістірола	Відрізняються високою міцністю та світлостабільністю		Деталі автомобілів, човнів, труби
Поліаміди (капрон, нейлон, амід)	До складу макромолекул входять $(-\text{NH}-\text{CO}-)$ $(-\text{CH}_2-)$. Може кристалізуватись, густина (1,13-1,14) $\times 10^3$ кг/м ³	Має низький коефіцієнт тертя ($f < 0,05$), тривалий час може працювати на стирання, удароміцний, здатний поглинати вібрації, стійкий до лугів	Схильний до вогнища, допоглинання і старіння	Шестерні, втулки, підшипники, болти, гайки, шківни
Поліуретан	$(-\text{NH}-\text{COO}-)$, густина $\times 10^3$ кг/м ³	Має високу гнучкість, еластичність, атмосферостійкість, морозостійкість (до -70 °C)	Невисока стійкість до термічної і термоокислювальної деструкції	Волокна, плівки, герметики
Фторопласт-4 (політетрафторетилен)	$(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$ аморфно-полікристалічний полімер, густина (2,0-2,20) $\times 10^3$ кг/м ³	Висока хімічна стійкість в кислотах, лугах, окислювачах, високі антифрикційні властивості	Холодотекучий	Труби, прокладки, мембрани, манжети
Органічне скло (поліметакрилат)	Аморфний полімер, густина (2,10-2,30) $\times 10^3$ кг/м ³	Стійкий до дії кислот, лугів, вуглеводних палив та мастильних матеріалів	Невисока поверхнева твердість	Кришки, резервуари, труби, деталі арматури
Поліхлорвініл (ПВХ)	$(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$ аморфний полімер, густина $1,43 \times 10^3$ кг/м ³	Хімічно стійкий, не підтримує горіння, атмосферостійкий	Низька тривалість міцність, великий коефіцієнт термічного розширення, крихкий при низьких температурах	Труби, теплообмінники, деталі вентиляційних установок
Поліформальдегід	$(-\text{CH}_2-\text{O}-)_n$ Ступінь кристалічності 75 %, густина (1,40-1,42) $\times 10^3$ кг/м ³	Має високу твердість, жорсткість, пружність. Стійкий в мінеральних маслах і бензині		Шестерні, підшипники, клапани, деталі автомобілів

Таблиця 9.2 – Механічні властивості конструкційних термопластів

Термопласт	S_b , МПа	d , %	Ударна в'язкість a_k , кДж/м ² (ГОСТ 4647-80)	t_{max} експлуатації, °С (без навантаження)
Поліетилен (ПЕВТ)	10 - 18	300 - 1000	не зруйнувався	105
Поліетилен (ПЕНТ)	18 - 32	100 - 600	не зруйнувався	120
Поліпропілен	26 - 38	700 - 800	33 - 80	150
Полістірол	40 - 60	3 - 4	10 - 22	90
АБС (Ацетобутиратотирол)	30 - 35	15 - 30	8 - 40	75 - 85
Капрон (поліамід)	75 - 85	50 - 130	8 - 125	80 - 100
Капрон + 30 % волокон	100 - 125	3	12	100 - 130
Фторопласт-4	20 - 40	250 - 500	100	250
Поліметілметакрилат (органічне скло)	63 - 100	2,5 - 20	8 - 18	60
Поліхлорвініл (жорсткий)	50 - 65	20 - 50	70 - 80	65 - 85
Полівінілхлорид (пластифікований)	10 - 40	50 - 350	не зруйнувався	50 - 55

Таблиця 9.3 – Фізико-механічні властивості терморезистивних пластмас

Назва пластмаси	ρ , кг/м ³ ×10 ³	t_{max} експлуатації, °С	Границя міцності, МПа			d , %	Ударна в'язкість, кДж/м ²	E , МПа×10 ³	НВ, МПа
			при розтягненні	при стисканні	при згинанні				
Порошкові	1,4 - 1,5	100 - 110	30	50 - 150	60	0,3 - 0,7	4 - 6	6300 - 8000	300 - 400
Волокнит	1,3 - 1,4	110	30 - 60	80 - 150	50 - 80	1 - 3	9 - 10	8500	250 - 270
Асбоволокнит	1,9 - 2,1	200	-	110	70	4 - 3	20	18000	300
Скловолокнит	1,7 - 1,9	280	80 - 500	130	120 - 250	1 - 3	25 - 150	-	-
Гетинакс	1,3 - 1,4	150	80 - 100	160 - 290	80 - 100	1 - 3	12 - 25	10000	-
Текстоліт	1,4-1,5	125	65-100	120-150	120-160	1-3	30	5000 - 1000	-
Азботекстоліт	1,6-1,7	190	55	-	-	-	20-25	20000	185 - 300
ДПП	1,35 - 1,45	140 - 200	180 - 300	100 - 180	140 - 280	-	80 - 90	18000 - 30000	-

Найбільш продуктивний і прогресивний метод переробки пластмас це лиття під тиском. При виготовленні деталей за цим методом матеріал у вигляді гранул засипається в бункер ливарної машини, звідкіля рівномірно і безперервно захоплюється черв'ячним дозатором-пластифікатором, і просувається в передню зону нагрівального циліндра де розігрівається і пластифікується. Розплавлений матеріал періодично проштовхується через мундштук у порожнину попередньо зімкнутої і притиснутої до мундштука пресформи.

При цьому відбувається заповнення пресформи матеріалом під тиском (впорскування матеріалу). Заповнена пресформа якийсь час витримується під напірним тиском матеріалу. Під час витримки під тиском виріб у формі охолоджується і твердіє. Потім поршень з черв'ячним дозатором-пластифікатором, відводиться в заднє положення і одночасно пресформа розмикається. Виріб штовхачами викидається з порожнини пресформи.

Основні параметри, від яких залежить якість відлитого виробу це температура розплаву, температура пресформи, тиск інжекції і тривалість витримки під тиском [18].

Температура розплаву визначає його в'язкість, щільність і частково структуру. Занадто висока температура може привести до деструкції полімеру. У табл. 9.4 приведені режими лиття термопластів.

Таблиця 9.4 – Режими лиття під тиском деталей із термопластів

Найменування матеріалу	Режим лиття		
	Температура відливки, °С	Тиск впорскування, МПа	Температура пресформи, °С
Полістірол	170 - 250	60 - 100	40 - 60
Поліетилен ВТ	200 - 270	90 - 100	50 - 70
Поліетилен НТ	200 - 270	90 - 100	50 - 70
Поліпропілен	200 - 270	120 - 170	30 - 90
Поліаміди	225 - 270	70 - 170	60 - 120

Для зняття внутрішніх напружень і вирівнювання структури від- литі деталі піддають термообробці за режимами, наведеними у табл. 9.5.

Плівку з полівінілхлориду й листа з ряду термопластів одержують методом екструзії. При цьому в'язкий розплав термопласта подається шнеком у матрицю, де продавлюється через її профільний отвір.

Деталі з фторопласта отримують методом пресування з наступним спіканням.

Найбільш розповсюдженим методом виготовлення деталей з реактопластів є пресування. Процес складається з наступних операцій:

- завантаження прес-композиції у пресформу;
- одержання в'язко-плинного стану композиції;

Таблиця 9.5 – Режими термообробки деталей із термопластів

Найменування матеріалу	Середовище для нагрівання	Температура нагрівання, °С	Тривалість витримки, хвилин	Середовище для охолодження
Поліетилен	Вода	70 - 80	2 хвилини на 1 мм товщини	На повітрі
Поліпропілен	Кремній органічна рідина	130	–	У воді
Полістирол	Вода	70 - 80	4 - 5	На повітрі
Поліаміди	Мінеральне масло	180 - 190	10 - 15 хвилин на 1 мм	В маслі

- надання виробу необхідної форми пресуванням;
- фіксація форми деталі завдяки утворенню зшитої структури матеріалу під дією тиску пресування і температури;
- охолодження виробу.

Для одержання деталей з реактопластів також застосовується лиття під тиском, метод намотування.

У табл. 9.6 наведено режими пресування деталей з конструкційних термореактивних пластмас. З метою доотвердження матеріалу, зняття внутрішніх напружень, а також для підвищення стабільності розмірів і збільшення в'язкості після пресування деталі піддають термообробці за режимами, наведеними у табл. 9.7.

Таблиця 9.6 –Режими пресування реактопластів

Марка реактопласту	Склад реактопласту	Температура пресування, °С	Тиск пресування, МПа
Фенопласт 03-010-02	50% новолачної фенолформальдегідної смоли і 50 % органічного наповнювача	175 - 200	25 - 35
АГ-4С	30 % модифікованої фенолформальдегідної смоли і 70 % скляних волокон	155	30 - 40
ДСВ	40 % модифікованої фенолформальдегідної смоли і 60 % комплексних скляних волокон	140 - 160	20 - 60

Таблиця 9.7 – Режими термообробки деталей з реактопластів

Найменування матеріалу	Температура нагрівання, °С	Витримка на повітрі години
Фенопласт (деталі з характерним розміром до 6 мм)	120 - 130	2
Фенопласт (деталі з характерним розміром більше 6 мм)	140 - 150	4
Склопластик ДСВ-2Р-2М	165 - 175	2
Склопластик АГ-С	165 - 175	2

Устаткування і інструменти

Набір зразків і деталей з конструкційних термопластів і реактопластів, розривна машина, обладнана піччю.

Хід виконання роботи

1. Ознайомлюємося зі зразками термопластів і реактопластів та вивчаємо технологію виготовлення з них деталей.
2. Проводимо випробування зразків на розтягнення при температурах, вказаних в табл. 9.8 – 9.10.
3. Визначаємо характеристики механічних властивостей випробуваних матеріалів. Результати випробувань заносимо у таблиці 9.8 – 9.10.

Таблиця 9.8 – Залежність міцності термопластів від температури

Полімер	Границя міцності σ_B , МПа при температурі °С					
	20	40	80	120	160	200

Таблиця 9.9 – Вплив вмісту кристалічної фази на механічні властивості термопластів при різних температурах

Температура випробування, °С	Тип полімеру	Границя міцності S_b , МПа	Відносне видовження d , %
20			
40			
60			
80			
100			

Таблиця 9.10 – Залежність міцності реактопластів від температури

Реактопласт	Границя міцності S_b , МПа, при температурі, °С					
	20	40	60	80	100	120

Контрольні запитання

1. Які типи зв'язку існують в полімерах?
2. Яким чином ступінь полімеризації впливає на властивості полімерів?
3. Охарактеризуйте будову та властивості сополімерів?
4. Як впливає форма (лінійна, сітчаста) макромолекул полімерів на їх властивості?
5. Які полімери називаються термопластичними (термопластами) і які – термореактивними (реактопластами) і яка різниця в їх будові?
6. За яких умов може утворюватися кристалічна фаза і як її вміст впливає на властивості полімерів?
7. Поясніть сутність процесу рекристалізації в полімерах?
8. В яких фізичних станах може знаходитись термопласт і реактопласт?
9. Пояснити сутність технології орієнтаційного зміцнення пластмас?
10. Яким чином швидкість навантаження впливає на властивості пластмас?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

ВИВЧЕННЯ БУДОВИ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З ПОЛІМЕРНИМИ МАТРИЦЯМИ

Мета роботи – вивчити фізико-механічні властивості композиційних матеріалів з полімерною матрицею і проаналізувати технологію виготовлення з них деталей.

Теоретичні відомості

Сучасні конструкційні матеріали повинні мати високу питому міцність при підвищених і криогенних температурах, динамічних і знакозмінних навантаженнях, в умовах впливу глибокого вакууму, стійкість в агресивних середовищах. Великі потенційні можливості закладені в новому класі конструкційних матеріалів – композиційних матеріалах. Застосування їх у сучасних конструкціях, дозволяє поліпшити ряд технічних характеристик виробів: знизити масу, підвищити корозійну стійкість і надійність, що в багатьох випадках, в свою чергу, дозволяє збільшити ресурс роботи конструкцій.

Композиційні матеріали (КМ) складаються з двох чи більше компонентів (складових), що розрізняються за хімічним складом, структурою і розділених вираженою границею. При цьому КМ мають нові властивості, що відрізняються від властивостей їх складових. До таких матеріалів відносяться полімерні композиційні матеріали, що мають полімерні матриці армовані органічними або неорганічними волокнами. У більшості полімерних КМ роль матриці виконує наповнювач - розподілений армуючий полімер. Волокнистий наповнювач несе основне навантаження в матеріалі. Армування може бути виконано волокнами, джгутами, дротами, тканинами [19].

Властивості КМ, в основному, залежать від фізико-механічних властивостей компонентів і міцності зв'язку між ними. Матриця зв'язує композицію, надає їй форму. Від властивостей матриці залежать такі важливі експлуатаційні характеристики, як робоча температура, опір руйнуванню від

втоми, опір агресивному впливу навколишнього середовища. Головний внесок у зміцнення КМ вносять волокна. Зі збільшенням модуля пружності і тимчасового опору волокон підвищуються відповідні властивості КМ. Властивості КМ залежать також від геометрії, розміру, кількості і характеру розподілу волокон (схеми армування).

Для армування використовують високоміцні і високомодульні вуглецеві, борні, скляні і органічні волокна у вигляді ниток, джгутів, стрічок, тканин.

Композиції з вуглецевими волокнами називають вуглеволокнистами чи вуглепластиками; скляними - скловолокнистами чи склопластиками (з борними - бороволокнистами, органічними - органоволокнистами). Основні фізико-механічні властивості волокон (арматури) наведено в табл. 10.1.

Борні волокна мають високу міцність, твердість, низьку схильність до руйнування при підвищенні температури. При невеликій густині волокна бора мають високу міцність і твердість. Високими питомою міцністю і термічною стабільністю механічних властивостей характеризуються високо-модульні вуглецеві волокна. Їх одержують внаслідок високотемпературної обробки в інертному середовищі із синтетичних органічних волокон.

До позитивних якостей вуглецевих волокон також відносяться висока теплопровідність, корозійна стійкість, стійкість до теплових ударів, невеликий коефіцієнт лінійного розширення.

Скловолокно характеризується поєднанням високої міцності, теплостійкості, низької теплопровідності, високої корозійної стійкості.

Матричними матеріалами служать різні реактопласти, насамперед епоксидні, поліефірні, фенольні смоли.

Термопласти поступаються термореактивним полімерам у твердості, міцності, мають більшу повзучість, але перевагами КМ на їх основі є простота технології отримання виробів, переробки відходів, гарні деформуємість, ударна в'язкість, менше водопоглинання. При створенні теплостійких КМ застосовуються матриці на основі полімерів: полісульфонів, поліфеніленсульфідів, поліацеталей, поліамідів [20].

Розповсюдженими матрицями при створенні КМ є епоксидні смоли. Їх використання забезпечує високий коефіцієнт реалізації міцності волокон. З КМ на основі епоксидних смол, що мають високі показники міцності, виготовляють відповідальні елементи конструкцій для машинобудування.

Для менш відповідальних конструкційних матеріалів для матриці застосовують поліефірні смоли. Хоча склопластики на основі поліефірних смол і поступаються за питомими показниками механічних властивостей матеріалам на основі епоксидних полімерів вони більш доступні і дешеві. Матриці з поліефірмелінатів і поліефіракрилатів застосовуються у виробництві великогабаритних виробів.

Перевагою фенолформальдегідних смол порівняно з епоксидними і поліефірними є підвищена вогнестійкість. Тому склопластики на їх основі використовуються в будівництві, авіації, на транспорті.

Серед КМ із полімерною матрицею найбільше широко застосовуються склопластики (95 % від загального обсягу) у суднобудуванні, авіації, приладобудуванні, транспортному машинобудуванні [21].

Тимчасовий опір склопластиків підвищується приблизно в 3 рази при збільшенні об'ємної частки наповнювача до 80 % і досягає 700 МПа при армуванні безперервними волокнами. Дискретні волокна зміцнюють КМ менш ефективно. Склопластики мають високу холодостійкість і теплостійкість. Їх використовують у діапазоні температур від -70° до 400°C .

Таблиця 10.1 – Фізико-механічні властивості волокон

Назва волокон	$\rho \times 10^{-3}$, кг/м ³	Границя міцності, МПа	Модуль пружності, ГПа	d, %	Температура плавлення, К	Температура експлуатації, К	
						тривалої	короткочасної
Скляні	2,48 - 2,55	1470 - 4900	49 - 123	1,5 - 5,4	978 - 1963	623 - 1073	923 - 1323
Органічні	1,14 - 1,48	490 - 3530	4,5 - 147	2 - 18	673*	443 - 473	1073
Вуглецеві	1,30 - 1,95	392 - 3420	196 - 392	0,5 - 2	3873**	673 - 973	1073 - 1773
Борні	1,20 - 1,30	980 - 1270	245 - 450	3,4 - 5,3	503	423 - 453	973
Стальний дріт	7,85 - 8,10	3420 - 4450	196 - 207	0,3 - 2	1813	723 - 1073	973 - 1573

* – температура розпаду

** – температура сублимації

Крім того, завдяки здатності гасити механічні коливання вони використовуються в умовах дії вібраційних навантажень. Недоліком склопластиків є порівняно низький модуль пружності. Основні характеристики склопластиків і інших КМ наведено в табл. 10.2 і 10.3.

Таблиця 10.2 – Фізико-механічні властивості конструкційних склопластиків

Властивості	Тип матриці			
	поліефірна	епоксидна	фенолформальдегідна	кремнійорганічна
Густина, кг/дм ³	1,65	1,6 - 1,9	1,7	1,7
Границя міцності при розтягненні, МПа	320	450	340	250
Границя міцності при згині, МПа	360	500	250	200
Водопоглинання за 24 години, %	0,2	0,1	0,1	0,5

Таблиця 10.3 – Механічні властивості композитів з полімерною матрицею

Матеріали	$\rho \times 10^{-3}$, кг/м ³	Напруження руйнування, МПа		Модуль пружності при розтягненні, МПа	Модуль зсуву, ГПа	σ при розриві, %	Питома міцність, км	Питома жорсткість, км
		при розтягненні	при зсуві					
Склопластики	1,6 - 2,2	343-1764 117-735	5,88-58,8 58,8-289	12,7-68,6 5,9-56,8	1,19 - 19,6	1,5-2,8 0,5-1,5	15,5 - 110	268 - 4287
Вуглепластики	1,3 - 1,9	784-1666	9,8-44,1 79,4-137,2	117,6 - 196	9,8 - 14,7	0,4-1,0	41,2 - 128	6200 - 15000
Боропластики	1,6 - 1,9	5,82-1372	13,7-24,5 78,4-109,7	176 - 264	9,8 - 12,7	0,3-0,7	30,6 - 85,7	9260 - 16500
Органоластики	1,2 - 1,35	784-1470	10,5-24,5 96,3-170,5	58,8 - 76,4	2,4 - 14,7	2,0-7,0	58 - 122,5	4370 - 6330

Чисельник – вздовж напрямку армування. Знаменник – поперек напрямку армування.

Вуглепластики (карбоволокнити) і органоластики (органоволокнити) поряд з усіма позитивними властивостями склопластиків мають у півтора разу меншу густина, у 3-4 рази вищу твердість і більшу міцність.

Але в зв'язку з більш високою вартістю вони в даний час використовуються в аерокосмічній, оборонній промисловості, в автомобілебудуванні.

Вуглепластики (карбоволокнити) мають малий коефіцієнт тертя і високу зносостійкість. Епоксифенольні карбоволокнити (КМУ-1л, зміцнений вуглецевою

стрічкою і КМУ – 1у, армований джгутом) можуть тривало працювати при температурі до 200 °С.

Карбоволокнити КМУ-3 і КМУ-3л одержують на епоксидноліноформальдегідному сполучному (матриця). Їх можна застосовувати до 100 °С. Карбоволокнити КМУ-2 і КМУ-2л з полімерною матрицею працездатні до 300 °С.

Карбоволокнити відрізняються високим статичним і динамічним опором втомі при нормальній і низькій температурах. Вони мають високу водо- і хімічну стійкість.

З метою зниження їх вартості застосовують часткову заміну вугільних волокон скляними. В цьому випадку матеріал називається карбоскловолокнитом.

Бороволокнити відрізняються високою міцністю при стисканні, зсуві і зрізі, низькою швидкістю повзучості, високими твердістю, модулем пружності і теплопровідністю. При їх армуванні також застосовують часткову заміну борних волокон скляними, а матеріал в цьому випадку називається бороскловолокнитом. Бороволокнити КМБ-1 і КМБ-1к призначені для тривалої роботи при 200 °С; Матеріал КМБ-2к працездатний і при температурах до 300 °С. Такі КМ мають високий опір втомі, стійкі до впливу радіації, води, органічних розчинників і паливно-мастильних матеріалів.

Деталі з бороволокнитів застосовують в авіаційній і космічній техніці для виготовлення панелей, роторів і лопаток компресорів, лопастей гвинтів, трансмісійних валів вертольотів, торсіонів і т.д.).

Органоволокнити мають малу густину, високу питому міцність і твердість, стабільні при дії знакозмінних навантажень і різкій зміні температур [20].

В органоволокнитах значення модуля пружності і температурних коефіцієнтів розширення волокон і матриці близькі. Це обумовлює стабільність їх механічних властивостей при різкому перепаді температур. Для таких КМ характерний високий рівень ударної в'язкості. Більшість органоволокнитів може тривало працювати при 100 – 150 °С, а КМ з поліамідною матрицею і поліоксодізольними волокнами при температурі до 300 °С.

Недоліком цих матеріалів є порівняно низька міцність при стисканні і схильність до повзучості.

Для підвищення міцності і твердості органоволокнитів для їх армування разом із синтетичними волокнами застосовують скляні, вуглецеві або борні волокна.

Органоволокнити застосовують в авіації, автомобілебудуванні. З них виготовляють труби, ємності, покриття.

Для більшості композитів параметри міцності змінюються прямо пропорційно об'ємній частці волокон. Міцність при розтягненні можна визначити за рівнянням:

$$\sigma_p = \sigma_v V_v + \sigma_m (1 - V_v), \quad (10.1)$$

де σ_v – міцність волокон,

V_v – об'ємна частка волокон,

σ_m – напруження в матриці в момент руйнування волокон.

Верхня границя міцності КМ при розтягненні визначається, в основному, максимальною об'ємною часткою волокон. Припустиме об'ємне наповнення як правило не перевищує 65 – 70 %. Оскільки матриця на міцність КМ впливає порівняно мало, міцність приблизно можна визначити за формулою:

$$\sigma_p = \sigma_v V_v \quad (10.2)$$

Дискретні волокна зміцнюють композиційний матеріал у меншій мірі, ніж безперервні. Непаралельність волокон істотно знижує ефективність зміцнення КМ, армованого дискретними волокнами.

У промислових технологіях, як правило, формування композиційного матеріалу і виготовлення з нього деталей поєднані. Технологічний процес складається з наступних основних операцій:

- з'єднання полімерного зв'язуючого з арматурою просоченням розчином чи емульсією волокон (або їх сітки) чи нанесенням шарів порошкоподібного зв'язуючого на кожен шар арматури;
- приготування напівфабрикатів у вигляді пакетів намотуванням, викладенням на оправках або протягуванням, наприклад, при виготовленні профільних виробів;
- формування виробу з застосуванням прямого пресування, вакуум-формування, контактного формування, автоклавного формування.

Устаткування та інструмент

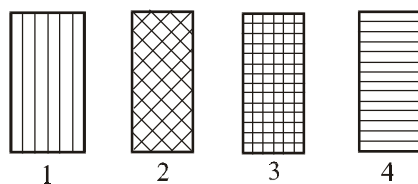
Набір зразків і деталей композиційних матеріалів з неметалевою матрицею, розривна машина, обладнана піччю.

Хід виконання роботи

1. Ознайомлюємося зі зразками композиційних матеріалів з неметалевою матрицею та технологією їх виготовлення.
2. Проводимо випробування зразків волокон, матриць і композиційних матеріалів з неметалевою матрицею на розтягнення при температурах, наведених в табл. 10.4. Результати випробувань занести у вказану таблицю.
3. Проводимо випробування зразків вуглепластиків з різною схемою армування відповідно рис. 10.1 та табл. 10.5. Результати занести в табл. 10.5.

Таблиця 10.4 – Міцність бороволокнитів з епоксидним та поліамідними зв'язуючими при згині в залежності від температури випробувань

Температура випробувань, °С	S _{зг} , МПа, бороволокнита з епоксидним зв'язуючим	S _{зг} , МПа, бороволокнита з поліамідним зв'язуючим
20		
10		
200		
300		



1 – повздовжна; 2 – під кутом 45°; 3 – взаємно перпендикулярна; 4 – поперечна
 Рисунок 10.1 – Схема армування вуглепластиків з епоксидною матрицею ($V_B = 0,63$)

Таблиця 10.5 – Залежність між напруженням та деформацією при розтягненні епоксидних вуглепластиків з різною схемою армування

Схема армування	Напруження S, МПа, при деформації ε, %									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1										
2										
3										
4										

Контрольні запитання

1. Як класифікують КМ з неметалевою матрицею за схемою армування, типом фази і матриці?
2. Навести приклади впливу різних схем армування на властивості КМ?
3. Охарактеризувати структуру і властивості карбоволокнитів, навести приклади доцільності використання цих матеріалів?
4. Описати структуру, властивості та застосування бороволокнитів?
5. В яких умовах проявляються переваги органоволокнитів над іншими КМ з неметалевою матрицею?
6. Яким чином впливає на властивості КМ довжина волокон та міцність їх з'єднання з матрицею?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11 ВИВЧЕННЯ КЛЕЇВ, КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ І ГЕРМЕТИКІВ

Мета роботи – ознайомитися з використанням клейових з'єднань і герметиків у машинобудуванні.

Теоретичні відомості

Клеї це композиції, які застосовуються для з'єднання різних матеріалів за рахунок утворення міцного адгезійного зв'язку між їх поверхнями і клейовим прошарком. До складу клейової композиції входять речовини, що утворюють плівку, розчинник, пластифікатор, отверджувач чи каталізатор, наповнювач і домішки.

Клеї класифікують за видом основи, на якій він готується, наступним чином:

- органічні;
- неорганічні;
- металеві.

Органічні клеї підрозділяють на термопластичні і терморективні. Терморективні смоли дозволяють одержати міцні, теплостійкі плівки, які застосовують для склеювання силових конструкцій з металів і неметалевих матеріалів. Клеї на основі термопластичних смол мають невисоку міцність, особливо при нагріванні, і застосовуються для несилових з'єднань не- металевих матеріалів [20].

Гумові клеї, у яких основою є каучук, відрізняються високою еластичністю і застосовуються для склеювання гуми з гумою або гуми з металами.

Найбільш теплостійкими є неорганічні клеї.

До переваг клейових з'єднань відносяться висока міцність, збільшення межі втоми за рахунок усунення концентраторів напружень, властивих клепаним, болтовим і зварним конструкціям.

Клейові з'єднання мають наступні недоліки: невисока міцність при нерівномірному відриві, необхідність у ряді випадків проведення операції склеювання з підігріванням, схильність до старіння.

Найбільш важливими експлуатаційними характеристиками клеїв є стійкість до старіння, водо- і атмосферостійкість, тривала міцність і довговічність.

У табл. 11.1 наведено характеристики основних видів клеїв.

Таблиця 11.1 – Характеристики основних видів клеїв

Клей	Матеріал, який склеюють	Характеристика з'єднання		
		границя міцності при зсуві, МПа	термостійкість	середовище в якому можна застосовувати з'єднання
Фенолформальдегідний	деревина, пористі матеріали	10-15	7-100	вода, масло, бензин, спирти, ароматичні вуглеводні
Епоксидний	метали, неметалеві матеріали	10-13	60-250	масло, бензин, спирти
Кремнійорганічний	метали, пластмаси, азбоцемент	10-17	350	масло, бензин, вуглеводні
Карбонільний	метали, кераміка, пластмаси	10-15	50-60	палива, масло
Полібензимедазольний	метали, склопластики	15-30	350-540	вода, мінеральне масло, розчини солей

Як високоміцні клеї для металевих конструкцій, які працюють при температурах до 250 °С, використовують клеї на основі епоксидної або фенолформальдегідної смоли. Більш широко застосовують клеї на епоксидній основі, тому що для фенолформальдегідних клеїв характерна недостатня стійкість до термоокислювальної деструкції. Клеї на основі епоксидних олігомерів ЭД-24, Э-49 є стійкими до термоокислювальної деструкції. Їх теплостійкість досягає 200 °С (короткочасна теплостійкість до 315 °С). Наприклад, міцність з'єднань дюралюмінія при використанні клею на основі епоксидного олігомера при 200 °С складає 148 МПа [21].

У табл. 11.2 наведено характеристики міцності клейових з'єднань.

Таблиця 11.2 – Міцність клейових з'єднань при 250 °С

Тип клею	Напруження руйнування при зсуві, МПа
Поліуретановий	56
Епоксиайлоновий	42
Епоксифенольний	21
Епоксиполіамідний	17,5
Поліароматичний	12,6

В авіації і космічній техніці широко використовуються тришарові клеєні сотові конструкції з наповнювачем (панелі фюзеляжу, перегородки та ін.).

Застосування сотових конструкцій забезпечує зниження маси, підвищення витривалості.

При застосуванні клеїв у машинобудуванні металоємність конструкцій знижується від 10 до 25 %. Одним із ефективних шляхів підвищення міцності металевих конструкцій є застосування комбінованих клейовомеханічних з'єднань. Клейовозаклепочні з'єднання мають у 1,5 - 3 рази більш високу міцність і надійність при тривалій експлуатації в порівнянні з клепанними з'єднаннями. Міцність клейозварних з'єднань від 20 до 50 % вище, ніж зварних з'єднань.

Герметики – це пастоподібні або в'язкоплинні маси на основі полімерів і олігомерів, що використовуються для заповнення зазорів в конструкціях. Герметики застосовують для ущільнення і герметизації клепанних, зварних і болтових з'єднань, паливних баків, різних металевих конструкцій, приладів.

В залежності від природи вихідного полімеру розрізняють герметики, які вулканізуються і затвердівають, які невисихають і які висихають. У залежності від призначення герметики класифікують за теплостійкістю (50 – 70 °С, 100 – 150 °С, понад 200 °С), по стійкості до олій і палив.

Основними експлуатаційними характеристиками герметиків є ресурс (період часу, впродовж котрого зберігаються їх властивості), газопроникність, адгезія, міцність на розрив, відносне видовження при розтягненні, щільність.

Найбільш широке поширення одержали герметики на основі полісульфідних каучуків (тіоколів), кремнійорганічних полімерів, фторокаучуків. Застосовуються також герметики на основі бутадієнових, уретанових каучуків, на основі олігомерів епоксидних і фенолоформальдегідних смол. Властивості деяких герметиків наведено в табл. 11.3

Таблиця 11.3 – Властивості вулканізованих герметиків

Властивість	Полісульфідний (тіоколовий)	Кремнійорганічний	Фторкаучуковий
$\gamma \times 10^{-3}$, кг/м ³	1,2 - 1,8	1,02 - 1,8	1,6 - 3,2
S _в , МПа	1,5 - 4,0	1,5 - 4,5	7,0 - 14,0
ε, %	150 - 500	150 - 600	300 - 700
Робоча температура, °С	-60 -150	-70 -300	-30 -250
Робоче середовище	Паливо	Повітря	Хімічно-агресивне

Устаткування та інструмент

Набір зразків із клейовими з'єднаннями; вузли, в яких використані клеї; деталі з ущільненнями з використанням герметиків; розривна машина, обладнана піччю.

Хід виконання роботи

1. Ознайомлюємося з конструкціями, у яких використані клеї і герметики.
2. Проводимо випробування зразків з клейовими з'єднаннями на розрив.
3. Визначаємо характеристики механічних властивостей випробуваних матеріалів. Результати заносимо в табл. 11.4

Таблиця 11.4 – Міцність при відриві клеєних з'єднань, отриманих при використанні клею на епоксидній основі

Матеріали, які склеюють	S _v при температурі °С, МПа	
	20	60

Контрольні запитання

1. Як класифікують клеї?
2. Назвіть склад смоляних, гумових і неорганічних клеїв?
3. Якими характеристиками оцінюють якість клеїв?
4. Назвіть переваги та недоліки клейових з'єднань порівняно з іншими з'єднаннями (заклепочними, болтовими, зварними)?
5. Яке призначення герметиків?
6. Назвіть основні види герметиків, їх склад, властивості та застосування?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи - вивчення структури, властивостей та технології виготовлення інтелектуальних композиційних матеріалів.

Теоретичні відомості

Інтелектуальний матеріал на відміну від функціональних має комплекс функцій, що допомагають йому реагувати на зовнішні умови. Ці матеріали дозволяють контролювати стан деталей, виготовлених із них, і адаптуватись до дії зовнішніх чинників. Структура такого композиту складається з базового матеріалу і введених до нього функціональних сенсорних і виконавчих елементів. Сенсорні елементи забезпечують отримання інформації про стан матеріалу, яка реєструється спеціальною комп'ютерною системою. Виконавчі елементи (які управляють) слугують для керування параметрами самого матеріалу. Такими матеріалами можуть бути п'єзоелектрики, біфункціональні сополімери, провідникові полімери і т. ін., які дозволяють слідкувати і змінювати їх властивості [22].

Для забезпечення живучості силових деталей літаків застосовують стопори для втомних тріщин – конструкційні елементи, призначені для гальмування втомних тріщин за рахунок зниження коефіцієнта інтенсивності напружень у вершині тріщини.

Підвищення надійності деталей може бути досягнуто, якщо як стопор використовувати деталі з матеріалів, які крім забезпечення несівної здатності здійснюють передавання інформації про дефекти, що виникають при експлуатації. Для створення стопора – індикатора проведена модернізація металоорганопластиків шляхом введення до їх складу активних елементів – сенсорів, здатних здійснювати контроль напруженого стану матеріалу. Структурні інформаційні елементи від звичайних датчиків контролю відрізняються тим, що

крім інформаційної функції вони несуть силове навантаження від зовнішніх факторів. Матеріал під дією зовнішніх навантажень, підвищених температур, агресивних середовищ має певний кінцевий ресурс із-за утворення різного роду дефектів мікро – і макроструктури. Своєчасно виявити ці дефекти буває неможливо без проведення спеціальних ремонтних і регламентних робіт. На сьогодні розробляються сенсорні елементи, що є структурними елементами КМ і матеріалів, які працюють сумісно з ними на основі різних фізичних принципів: електричних, оптичних, п'єзоелектричних. Основними критеріями при виборі типу сенсорів для інформкомполімера є їх повна структурна і механічна сумісність з базовим матеріалом, стабільність параметрів в умовах експлуатації виробів (при дії механічних навантажень, вібрації, в умовах підвищеної вологості і температури), підготовленість сучасних технічних засобів для вимірювання і обробки інформації для даного типу сенсорів. Як матеріал для вказаних конструктивних елементів використовують вуглецеві волокна і модифіковані арамідні волокна. Принцип дії їх базується на тензочутливості, тобто здатності сенсора реагувати зміною власного електричного опору на зміну напружено- деформованого стану виробів. Вуглецеві волокна мають власну провідність і не потребують модифікації. Механічні властивості волокон і величини їх тезочутливості при багатократних навантаженнях наведені в табл. 12.1.

Завдяки високим механічним властивостям сенсорів ($\sigma_b \approx 3800$ МПа) не відбувається зниження міцності інформкомполімера при введенні сенсорів в будь-якій об'ємній долі по відношенню до армувальних волокон. Високі технологічні властивості сенсорів на основі арамідних волокон дозволяють вводити їх в текстильні форми армувальних наповнювачів. Стопори, армовані вказаними волокнами, призначені для виконання ремонту і підсилення обшивок фюзеляжу та крила літака при утворенні тріщин. Тонкі сенсори дозволяють забезпечити практично ідеальну структурну і механічну сумісність з основними компонентами базового матеріалу. Стопор виготовляється з металополімерного композита Алора. Цей матеріал має високу стійкість до виникнення і поширення тріщини (швидкість поширення тріщин в металоорганопластиках в 10 – 40 разів нижче, ніж в

алюмінієвих сплавах). При розтягненні металоорганопластиків діапазон контрольованих деформацій сенсорних елементів складає < 4 %. При цьому стопор – індикатор ефективно контролює рівень напружено-деформованого стану (сигнал сенсора змінюється в 2 – 3 рази) [21].

Таблиця 12.1 – Деякі властивості вуглецевих волокон і величини тензочутливості при багатократних навантаженнях зразка – датчика

Властивості	Гранит 40П	ЛЖУ - 35	ЛЖУ-35ВМ
Густина, г/см ³	1,80	1,77	1,81
Площа, см ²	0,1306	0,1045	0,1
Міцність на розтяг, МПа	3200	4200	3170
Модуль пружності Е, ГПа	380	373	405
Питомий електроопір R, Ом/м	30 – 60	70 – 110	65 – 85
Тензочутливість при багатократних навантаженнях розтягненням, K_p	1,0 – 1,2	1,43 – 1,68	1,37 – 1,43
Середнє значення тензочутливості на розтяг, K_p^{cp}	1,1	1,525	1,4
Тензочутливість при багатократних навантаженнях стисненням, K_{cm}	0,95 – 1,2	0,96 – 0,99	1,18 – 1,22
Середнє значення тензочутливості на стиснення, K_{cm}^{cp}	1,05	0,97	1,2

Властивості тензочутливих сенсорів на основі арамідних волокон, які покриті тонким металевим шаром (0,1 – 0,2 мкм), наведено в табл. 8.2.

Таблиця 12.2 – Властивості дослідницьких тензоризисторних сенсорів на основі арамідних волокон

Тип волокон	Електроопір, кОм	Міцність на розтяг, МПа	Відносне видовження, %
Волокно Армос	2,0 – 2,7	3870	3,5
Волокно Армос	1,5 – 2,0	3810	3,5
Волокно Армос	0,4 – 0,9	4090	3,5
Волокно Русар-С	2,0 – 4,2	4010	3,5

Композиційні конструкційні матеріали, що мають керовану анізотропію, можуть використовуватися в конструкціях, де проявляються їх властивості, пристосовуватися до змін у зовнішньому середовищі.

Існують матеріали з регульованою деформацією при зовнішній дії. Матеріал складається із шарів, що чергуються і які мають незбалансовану структуру відносно вибраних осей анізотропії. Анізотропія при зовнішній дії створює відмінний від нуля сумарний момент відносно цих осей, що викликає просторову деформацію матеріалу. В результаті неврівноваженості суми сил та моментів

відносно вибраних осей в матеріалі з'являються дотичні напруження крутіння і в наслідок виникаючого крутного моменту виріб деформується, вигинаючись в потрібній площині. У випадку навантаження матеріалу напруженнями згинання відбувається два вида деформації – згинання і крутіння. Зміна форми виробу і її відновлення проходять без втручання людини в результаті підвищення або зниження напружень, що діють в матеріалі конструкції. В вуглепластиках цей ефект досягається також внаслідок пропускання електричного струму або аеродинамічного нагрівання. Ці явища використовуються при виготовленні крил зворотньої стріловидності літака Су-47 «Беркут» із вуглепластика КМУ-7у (АКМ – 1у). Завдяки спеціальній схемі армування під дією аеродинамічного навантаження відбувається цілеспрямована зміна геометрії конструкції, що сприяє перерозподілу і зниженню діючих навантажень. Адаптація конструкції забезпечує стабільність кутів атаки і, як наслідок, високі аеродинамічні характеристики при польотах з великими кутами атаки і добра маневреність літака.

Контрольні запитання

1. Пояснити різницю між інтелектуальними та функціональними матеріалами?
2. Охарактеризувати структуру інтелектуальних матеріалів?
3. Навести приклади даних матеріалів?
4. У який спосіб зупиняють поширення тріщин у відповідальних деталях?
5. Якими функціями структурні інформаційні елементи відрізняються від звичайних датчиків?
6. На основі яких фізичних принципів працюють сенсорні елементи, що є структурними елементами КМ?
7. Вказати основними критеріями при виборі типу сенсорів для інформкомполита?
8. Пояснити, що таке принцип тензочутливості?
9. Порівняти важливі характеристики вуглецевих і арамідних волокон, що використовуються для армування інтелектуальних матеріалів?

10. Пояснити, що таке композиційні конструкційні матеріали з керованою анізотропією? Навести приклади використання даних матеріалів вказати їх переваги порівняно зі звичайними функціональними композитами.

Література

1. Степанчук А. М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів [текст] навч. посіб./А. М. Степанчук. - Київ: Центр учбової літератури. 2017. - 336 с. ISBN 978-617-673-502-1
2. В.М. Клименко, О.П Шиліна, А.Ю.Осадчук. Технологія конструкційних матеріалів. / Частина перша. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.- 97 с.
3. Конструкційні матеріали і технології : навчальний посібник / К64 Будяк Р. В., Посвятенко Е. К., Швець Л. В., Жученко Г. А. - Вінниця : ФОП Т. П. Барановська, 2020. - 240 с. I8EM 978-617-7233-57-1
4. Композитні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова; за заг. ред. П.П. Савчука. – Луцьк: Видавець: ФОП Теліцин О.В., 2017. – 368 с.
5. Середа Б.П. Нові матеріали в металургії. Навчальний посібник. – Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2009. – 395 с. 3. Степанчук А.М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук: Підручник. – К.: НТУУ „КПІ”, 2006. – 353 с.
6. Степанчук А.М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів: Навчальний посібник/ А.М. Степанчук. – К.: Центр навчальної літератури. - 2017. – 336 с.
7. Буренніков, Ю. А. Нові матеріали та композити : навчальний посібник / Ю.А.Буренніков, І. О. Сивак, С. І. Сухоруков – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 161с.
8. Азаренков М. О. Сучасні конструкційні матеріали – композити : навчально-методичний посібник / М. О. Азаренков, В. Є. Семененко, М. М. Пилипенко. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2004. – 75 с.

9. Рослик І.Г., Ковзик А.М., Внуков О.О. Основи порошкової металургії. Частина 1. Виробництво порошків. Навч. Посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2019. - 50 с.
10. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М.А.Сологуб, І.О.Рожнецький, О.І.Некоз та ін. – К.: Вища школа, 2002. – 374 с.
11. Дурягіна З.А. Сплави з особливими властивостями : навч. посібник / З.А. Дурягіна, О.Я. Лизун, В.Л. Пілюшенко. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2007. – 236 с.
12. Савуляк В.І. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 161 с.
13. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
14. Композитні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова; за заг. ред. П.П. Савчука. – Луцьк: Видавець: ФОП Теліцин О.В., 2017. – 368 с.
15. Бузило В.І. Матеріалознавство: навч. посіб. / В.І. Бузило, В.П. Сердюк, А.В. Яворський, О.А. Гайдай / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 243 с.
16. Кобець А.С., Деркач О.Д., Чигвінцева О.П., Кабат О.С., Рула І.В., Дудін В.Ю., Макаренко Д.О., Бойко Ю.В. Застосування полімерних композитів в АПК. Монографія. - Дніпро: Журфонд, 2022. - 356 с
17. Афтанділянц Є.Г., Зазимко О.В., Лонатько К.Г. М 341 Матеріалознавство: Підручник / Є.Г. Афтанділянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. - Херсон: Олді-плюс, Київ: Видавництво Ліра-К, 2013. - 612 с.
18. Кшнякін В. С. Основи фізичного матеріалознавства: навч. посіб.: у 2 ч. / В. С. Кшнякін, А. С. Опанасюк, К. О. Дядюра. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – Ч. 2. – 291 с.
19. Неметалеві матеріали [Текст]: навч. посібник / І. Г. Черниш, П. І. Лобода, С.

І. Черниш ; "Київський політехнічний ін-т", нац. техн. ун-т України. - К. : Кондор, 2008. – 406 с.

20. Близнюк О. В. Технології одержання виробів із полімерів: лабораторний практикум / О. В. Близнюк, Г. М. Черкашина, В. В. Лебедєв, С. О. Копилов. – Х.: ФОП Панов А.М., 2023. – 258 с.

21. Будник А.Ф., Юскаєв В.Б., Будник О.А. Неметалеві матеріали в сучасному суспільстві: Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 222 с.

22. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої / Боровий М.О., Куницький Ю.А., Каленик О.О., Овсієнко І.В., Цареградська Т.Л. – Київ: «Інтерсервіс», 2015. – 350 с.