

І.П.ЛЕГЕЦЬКА

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ
з дисципліни
«ІННОВАЦІЯ ПОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ»**

Одеса-2026

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

І.П.Легецька

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
«ІННОВАЦІЯ ПОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ»

(для студентів 5 курсу всіх форм навчання спеціальності
G11 “Машинобудування”)

ОДЕСА-2026

Методичні вказівки до проведення лекційних занять з дисципліни «Інновація портового обладнання» розроблені викладачем кафедри «Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового технологічного обладнання» Одеського національного морського університету **Легецькою Іриною Петрівною.**

Методичні вказівки схвалено на засіданні кафедри «Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового технологічного обладнання» протокол №1 від 27.08.2026 р.

Рецензент: доктор техн.наук, професор Конопльов А.В.

ЗМІСТ

Вступ		
Тема 1	Вступ до курсу. Роль новітніх матеріалів у машинобудуванні. Особливості педагогічної діяльності у ЗВО.	
Тема 2	Композитні матеріали: властивості, застосування у вузлах і конструкціях.	
Тема 3	Наноматеріали: перспективи використання у підвищенні міцності та зносостійкості деталей.	
Тема 4	Адитивні технології: принципи роботи 3D-друку, використання у виготовленні складних деталей.	
Тема 5	Сучасні методи обробки матеріалів: лазерна, плазмова, кріогенна обробка.	
Тема 6	Біоматеріали та їхнє застосування у машинобудуванні.	
Тема 7	Металеві сплави з ефектом пам'яті форми.	
Тема 8	Високоміцні сталі та сплави: новітні розробки у металургії.	
Тема 9	Аналіз довговічності та зносостійкості сучасних матеріалів.	
Тема 10	Випробування та сертифікація новітніх матеріалів у машинобудуванні.	
Тема 11	Екологічні аспекти використання новітніх матеріалів.	
Список використаних джерел		

Вступ

Сучасна морська інфраструктура є ключовою ланкою світової логістики, а порти — стратегічними точками економіки будь-якої держави. В умовах глобалізації та стрімкого технологічного розвитку ефективність портового господарства безпосередньо залежить від рівня інноваційного оновлення обладнання, автоматизації процесів і впровадження передових технологій. Саме тому підготовка фахівців, здатних аналізувати, розробляти й впроваджувати інновації в галузі портового обладнання, є пріоритетом сучасної вищої технічної освіти.

Дана методичка містить лекційні матеріали з дисципліни, яка є складовою професійної підготовки магістрантів. Вона покликана надати студентам системні знання щодо принципів функціонування, модернізації, сертифікації, а також екологічних та економічних аспектів використання сучасного обладнання в портах.

Мета курсу

Метою дисципліни є **формування у здобувачів магістерського рівня знань, умінь і навичок, необхідних для аналізу, розробки та впровадження інновацій у сфері портового обладнання, з урахуванням технічних, екологічних, економічних і нормативних вимог.**

Завдання курсу

У процесі вивчення дисципліни студент повинен:

1. **Ознайомитися з основними типами портового обладнання, його функціональними характеристиками та тенденціями розвитку.**
2. **Зрозуміти принципи впровадження інноваційних технологій у проектування, експлуатацію та модернізацію обладнання.**
3. **Навчитися оцінювати техніко-економічну ефективність інноваційних рішень.**
4. **Опрацювати основи сертифікації та стандартизації в галузі портового машинобудування.**
5. **Опанувати методи екологічного аналізу та мінімізації впливу обладнання на довкілля.**
6. **Розвинути практичні навички розробки інноваційних рішень, адаптованих до потреб українських та міжнародних портів.**

Тема 1. Вступ до курсу. Роль новітніх матеріалів у машинобудуванні. Особливості педагогічної діяльності у ЗВО.

Що вивчає курс:

- Сучасні тенденції розвитку портового обладнання.
- Інноваційні рішення у конструкції, матеріалах і функціональності механізмів.
- Актуальні проблеми експлуатації і модернізації портових систем.
- Інтеграція цифрових технологій (Інтернет речей, автоматизація, III).
- Роль сталого розвитку і "зелених" технологій.

Практична значущість:

- Порти є стратегічною інфраструктурою, особливо для України (наприклад, порти Чорного моря).
- Сучасне обладнання зменшує витрати, прискорює обробку вантажів, підвищує безпеку та екологічність.

Основні завдання курсу

- Формування розуміння впровадження інновацій.
- Аналіз новітніх конструкцій і матеріалів.
- Вивчення типів портового обладнання (крани, конвеєри, штабелери тощо).
- Вироблення навичок критичного оцінювання інженерних рішень.

Інновацією називають новостворені або значно вдосконалені продукти, технології, послуги чи управлінські рішення, які не лише розроблені, а й впроваджені в практику та доведені до кінцевого користувача. Їх головною особливістю є здатність приносити позитивні результати в економічній, соціальній, екологічній чи іншій сферах. Близьким за значенням до терміна «інновація» є поняття «нововведення», однак між ними існують певні відмінності, через що їх іноді помилково ототожнюють.

Нововведення (інновація) слід розуміти як результат наукових досліджень або технічних розробок, що мають елементи новизни порівняно з існуючими знаннями. Вони можуть бути представлені у вигляді документів (наприклад, патентів, технічної документації, ноу-хау), або в матеріалізованій формі – як дослідні зразки, моделі чи експериментальні установки.

Важливо підкреслити, що нововведення стає інновацією лише після його впровадження у виробництво чи в побут і початку фактичного використання. До прикладів нововведень можна віднести дослідні зразки нової продукції, які проходять тестування з метою оптимізації характеристик і визначення виробничої доцільності.

З економічної точки зору, інновацію відрізняє здатність виступати як товар – тобто продукт праці, що має споживчу цінність (корисність для споживача) та обмінну вартість (виражену в ціні). Іншими словами, інновація

— це не просто нове технічне рішення, а реалізований продукт або послуга, яка має ринковий потенціал.

Перед появою нововведення зазвичай відбувається етап формування інноваційних ідей. Вони включають узагальнені знання про характеристики майбутньої розробки, формулювання гіпотез, побудову моделей і теорій, а також проведення експериментів і обробку отриманої інформації. Такі ідеї стають основою для створення матеріалізованих результатів – нововведень, які у подальшому можуть перетворитися на інновації.

Роль новітніх матеріалів у машинобудуванні. Матеріали безпосередньо впливають на:

- Міцність і надійність обладнання.
- Витрати на виготовлення і обслуговування.
- Енергоефективність і вагу конструкцій.
- Стійкість до корозії (особливо важливо в морських умовах).

Основні типи новітніх матеріалів:

- **Композити** (склопластик, карбон): легкі, міцні, корозійностійкі.
- **Високоміцні сталі** (наприклад, HARDOX): витримують навантаження і зношування.
- **Сплави алюмінію і титану**: легкі та стійкі до морської корозії.
- **Полімери нового покоління**: використовуються для елементів, що не потребують високої температурної стійкості.
- **Наноматеріали**: на ранній стадії впровадження, проте мають великий потенціал для антикорозійного захисту.

Український контекст:

- Використання українських металургійних продуктів (наприклад, сталей від ММК ім. Ілліча).
- Співпраця з науковими інститутами (Інститут електрозварювання ім. Патона).
- Необхідність адаптації обладнання до воєнних і післявоєнних умов.

Приклади інновацій у портовому обладнанні

Технологія	Переваги	Де застосовується
Крани з композитними стрілами	Менша вага, вища швидкість	Контейнерні термінали
Автономні крани	Економія людського ресурсу	Smart-порти
Антикорозійні покриття на основі наночастинок	Довший термін служби	Морські гідротехнічні споруди
Друк 3D-запчастин з металопорошків	Швидке відновлення обладнання	Ремонтні служби портів

Розвиток портового обладнання неможливий без впровадження інновацій. Новітні матеріали є ключем до створення ефективних, довговічних і екологічно сталих механізмів. Україна має потенціал до інтеграції інновацій через власну науку та виробництво.

Особливості педагогічної діяльності у ЗВО

Науково-дослідницька діяльність передбачає не лише проведення дослідження та отримання певних результатів, а й уміння представити ці результати науковій спільноті. Одним із найбільш поширених способів представлення результатів є наукова доповідь. Наукова доповідь може бути представлена на конференції, семінарі, засіданні наукового гуртка, круглому столі, засіданні кафедри або іншому науковому заході. Основне завдання доповідача — у доступній, логічній та аргументованій формі пояснити:

яку проблему досліджували; чому ця проблема є важливою; якої мети прагнули досягти; які методи використовували; які результати отримали; яке значення мають отримані результати.

Класична структура наукової доповіді може бути представлена так:

актуальність → проблема → мета → завдання → методи → результати → обговорення → висновки → перспективи подальших досліджень. На початку доповіді необхідно зацікавити аудиторію та обґрунтувати актуальність теми. Далі визначається мета дослідження. Мета повинна бути конкретною і відповідати проблемі, яка розглядається. Завдання деталізують мету та показують, які саме питання необхідно було вирішити в процесі дослідження. Наступним елементом є характеристика методів дослідження. Дослідник повинен пояснити, яким способом отримувалися результати. Це може бути аналіз наукової літератури, спостереження, експеримент, опитування, моделювання, розрахунок, порівняння, статистичний аналіз та інші методи. Основна частина доповіді повинна бути присвячена результатам. При цьому важливо не просто перелічити отримані дані, а пояснити їх значення. Наприкінці доповіді формулюються висновки. Хороший висновок повинен відповідати на запитання: Що було встановлено? Що це означає? Де отриманий результат може бути використаний?

Основні принципи презентації результатів наукового дослідження

Під час представлення результатів дослідження необхідно враховувати не лише зміст, а й форму його подання. Навіть якісне дослідження може бути сприйняте недостатньо ефективно, якщо доповідь побудована нелогічно або містить надмірну кількість інформації. Перший принцип — логічність. Кожна наступна частина доповіді повинна бути пов'язана з попередньою. Другий принцип — лаконічність. Доповідач повинен відбирати лише ту інформацію, яка необхідна для розуміння результатів. Третій принцип — достовірність. Усі наведені дані повинні відповідати реальним результатам дослідження. Четвертий принцип — наочність.

Для представлення складної інформації можуть використовуватися: таблиці; графіки; діаграми; схеми; фотографії; моделі; інші ілюстративні матеріали.

Візуальні матеріали повинні доповнювати усну доповідь, а не замінювати її. Не рекомендується розміщувати на слайді великий текст і потім повністю його читати. Слайд повинен допомагати аудиторії зрозуміти основну думку доповідача. Наприклад, якщо дослідження містить значний обсяг статистичних даних, замість великої таблиці доцільно використати графік або діаграму, яка демонструє основну тенденцію. П'ятий принцип — орієнтація на аудиторію. Доповідач повинен враховувати рівень підготовки слухачів. Термінологія та складність пояснення повинні відповідати аудиторії. Також необхідно контролювати час. Якщо на доповідь відведено 10 хвилин, не можна планувати матеріал на 20 хвилин. Тому підготовка наукового виступу передбачає не тільки підготовку змісту, а й планування часу.

Підготовка тез доповіді та наукової статті

Результати наукової роботи можуть бути представлені не тільки усно, а й у письмовій формі. Одним із поширених видів наукової публікації є тези доповіді. Тези — це стислий виклад основних положень дослідження. Вони повинні дати читачеві відповідь на три основні питання: Що досліджувалося? Як досліджувалося? Які результати отримано? Зазвичай тези містять: назву;

відомості про автора; актуальність; мету; основний зміст дослідження; результати; висновки.

Наукова стаття є більш розгорнутим видом представлення результатів дослідження. Структура статті залежить від тематики та вимог конкретного наукового видання. У загальному випадку стаття може містити:

постановку проблеми;
аналіз попередніх досліджень;
мету роботи;
методику;
результати;
обговорення;
висновки;
список використаних джерел.

Перед написанням статті необхідно ознайомитися з вимогами видання. Це можуть бути вимоги до обсягу, структури, оформлення рисунків і таблиць, цитування, списку джерел, анотації та ключових слів. Особливо важливим є дотримання принципів академічної доброчесності. Автор повинен чітко розмежовувати власні результати та результати інших дослідників. Використання чужих ідей, текстів, даних або матеріалів без належного посилання є неприпустимим. Також необхідно уникати фабрикації та фальсифікації результатів.

Наукова публікація повинна бути достовірною, обґрунтованою та відповідати принципам академічної доброчесності.

Наукова дискусія та культура наукового спілкування

Наукова діяльність передбачає не тільки представлення власної позиції, а й участь у дискусії. Після наукової доповіді слухачі можуть поставити запитання або висловити зауваження. Запитання можуть стосуватися:

- методів дослідження;
- достовірності результатів;
- використаних джерел;
- обмежень дослідження;
- практичного значення;
- можливості подальшого розвитку дослідження.

Відповідь на запитання повинна бути короткою, конкретною та аргументованою.

Доцільно використовувати таку послідовність: уважно вислухати запитання → за необхідності уточнити → сформулювати відповідь → навести аргумент → зробити короткий висновок. Необхідно уважно ставитися до критичних запитань. Критика в науковій діяльності не обов'язково означає негативну оцінку дослідження. Навпаки, конструктивна критика дозволяє виявити слабкі сторони роботи та визначити напрями її подальшого вдосконалення. Якщо дослідник не знає відповіді, цілком допустимо сказати, що це питання потребує додаткового вивчення. Не слід давати необґрунтованих відповідей лише для того, щоб продемонструвати впевненість. Важливою складовою наукової дискусії є культура спілкування. Необхідно поважати позицію іншого учасника дискусії, аргументувати власну думку та уникати переходу на особистості.

Особливості педагогічної діяльності викладача

Педагогічна діяльність є важливою складовою професійної діяльності викладача закладу вищої та фахової передвищої освіти. Основне завдання викладача полягає не просто у передачі інформації, а в організації освітнього процесу таким чином, щоб здобувачі досягали визначених результатів навчання. До основних складових педагогічної діяльності можна віднести:

- планування освітнього процесу;
- визначення результатів навчання;
- підготовку навчальних матеріалів;
- вибір методів навчання;
- проведення навчальних занять;
- організацію самостійної роботи;
- оцінювання результатів;
- надання зворотного зв'язку.

Сучасний викладач виконує одночасно декілька ролей. Він є джерелом професійної інформації, організатором навчальної діяльності, консультантом, наставником та модератором навчального процесу. Тому ефективність педагогічної діяльності залежить не тільки від професійних знань викладача, а й від його комунікативних, організаційних та методичних умінь. Особливе значення має здатність пояснювати складний матеріал зрозумілою мовою. Необхідно враховувати різний рівень підготовки здобувачів, підтримувати їхню активність та створювати умови для самостійного мислення.

Організація навчального заняття та сучасні методи навчання

Підготовка навчального заняття повинна починатися з визначення того, чого саме повинен досягти здобувач після завершення заняття. Тобто спочатку визначається результат навчання, а вже потім добираються зміст і методи його досягнення. Наприклад: «Після завершення заняття здобувач уміє пояснити основні принципи досліджуваного явища та застосувати отримані знання для розв'язання практичного завдання». Для досягнення таких результатів можуть використовуватися різні методи: лекція; мінілекція; пояснення; демонстрація; проблемне навчання; дискусія; робота в групах; практичні завдання; аналіз ситуацій; проєктна діяльність; самостійна робота;

використання цифрових освітніх ресурсів. Лекція залишається важливою формою навчання, але сучасна лекція не повинна зводитися лише до монологу викладача. Доцільно ставити запитання, наводити приклади, пропонувати короткі проблемні ситуації та залучати здобувачів до обговорення. Наприклад, викладач може поставити питання: «Як ви вважаєте, чому запропонований підхід може бути ефективнішим за традиційний?» Після цього здобувачі висловлюють свої припущення, а викладач узагальнює відповіді. Такий підхід сприяє розвитку критичного мислення та активності.

Оцінювання результатів навчання та зворотний зв'язок

Оцінювання є невід'ємною частиною освітнього процесу. Його мета полягає не лише у визначенні певної оцінки, а й у встановленні того, наскільки здобувач досяг визначених результатів навчання. Методи оцінювання можуть бути різними:

- усне опитування;
- тестування;
- письмове завдання;
- практичне завдання;
- презентація;
- проєкт;
- виконання лабораторної роботи;
- ситуаційне завдання;
- підсумковий контроль.

Вибір методу залежить від того, що саме потрібно оцінити. Наприклад, якщо потрібно перевірити знання фактів і понять, можна використати тестування. Якщо потрібно перевірити вміння застосовувати знання, доцільніше дати практичне завдання. Якщо оцінюється здатність аналізувати проблему та аргументувати власну позицію, ефективним може бути дискусійне або ситуаційне завдання. Важливим елементом є зворотний зв'язок. Здобувач повинен розуміти не тільки те, яку оцінку він отримав, а й:

що він виконав правильно;
які помилки допустив;
що необхідно покращити;
як це можна зробити.

Таким чином, оцінювання повинно сприяти подальшому навчанню та розвитку здобувача.

Отже, сучасна професійна діяльність у сфері науки та освіти передбачає поєднання дослідницьких, комунікативних і педагогічних компетентностей. Результати наукових досліджень необхідно не лише отримувати, а й уміти правильно представляти. Наукова доповідь повинна мати чітку структуру, бути логічною, аргументованою та зрозумілою для аудиторії. Підготовка тез і наукових статей потребує дотримання вимог відповідного видання та принципів академічної доброчесності. Наукова дискусія вимагає вміння аргументувати власну позицію, відповідати на запитання та конструктивно реагувати на критичні зауваження. Педагогічна діяльність викладача передбачає планування навчального процесу, вибір ефективних методів навчання, організацію взаємодії зі здобувачами та оцінювання результатів навчання. Основним орієнтиром сучасного освітнього процесу є не кількість інформації, яку передав викладач, а результат, якого досяг здобувач освіти.

Тема 2. Композитні матеріали: властивості, застосування у вузлах і конструкціях.

Класифікація армованих КМ

Композиційні матеріали з армувальними компонентами можна класифікувати за кількома основними критеріями: за складом компонентів, типом і орієнтацією армування, технологією виготовлення, а також функціональним призначенням.

Залежно від матеріалу, що виконує роль матриці, виділяють три основні групи композиційних матеріалів:

- **металеві композиційні матеріали (МКМ)** – з металевою основою,
- **полімерні композиційні матеріали (ПКМ)** – на базі полімерної матриці,

- **керамічні композиційні матеріали (ККМ)** – з керамічною матрицею.

У випадку з полімерними КМ їх найменування зазвичай базується на типі армувального волокна. Наприклад:

- **склопластики** – ПКМ зі скляними волокнами,
- **металопластики** – з металевими,
- **органопластики** – з органічними волокнами,
- **боропластики, вуглепластики, азбопластики** – відповідно, з борними, вуглецевими чи азбестовими волокнами.

Щодо металевих і керамічних КМ усталених правил іменування поки що немає. Зазвичай на початку вказують матеріал матриці, а потім армуючий компонент. Наприклад, "мідь-вольфрам" означає мідну матрицю з вольфрамовим армуванням, тоді як " $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ " – це керамічна основа з дротами з молібдену. Проте в літературі можна зустріти і зворотний порядок назв.

Металеві композиції також класифікують залежно від стану вихідного матеріалу матриці: порошкові, литі або листові. Якщо композиційний матеріал створюється шляхом чергування армованих шарів і тонких листів матриці, такі структури іноді називають "сендвічами". Для керамічних КМ найчастіше застосовують порошкоподібну матрицю.

Відповідно до типу армування та його просторової орієнтації композиційні матеріали поділяються на **ізотропні** та **анізотропні**.

- **Ізотропні КМ** мають однакові властивості в усіх напрямках. До них належать, наприклад, дисперсно зміцнені матеріали або ті, що армовані волокнами, розміщеними випадковим чином. Армування може здійснюватися дрібнодисперсними частинками або відрізками волокон, які хаотично розподілені в об'ємі – такі КМ часто називають квазіізотропними, бо на макрорівні вони поведуться як ізотропні, хоч на мікрорівні мають анізотропію.

- **Анізотропні КМ** характеризуються напрямною залежністю властивостей. Це матеріали з чітко орієнтованими армувальними волокнами – односпрямованими, шаруватими або з просторовим армуванням. Така анізотропія є конструкційною, її закладають навмисно для досягнення необхідних характеристик в конкретних умовах експлуатації. Окрім неї, існує також:

- **технологічна анізотропія**, що з'являється внаслідок механічної обробки (наприклад, під час прокатки металу),
- **фізична анізотропія**, яка притаманна кристалам через особливості внутрішньої ґраткової будови.

У технічній практиці найбільш поширеними є анізотропні композиції зі строго визначеною симетрією властивостей. Для аналізу їх механічних характеристик часто використовують спрощене представлення матеріалу як однорідного, ідеалізованого середовища з певною симетрією. Найчастіше такі матеріали моделюють як:

- **ортотропні середовища** – з трьома взаємно перпендикулярними площинами симетрії (наприклад, КМ з поздовжнім і поперечним укладанням волокон рис.1),
- **трансверсально-ізотропні середовища** – з однаковими властивостями в одній площині та відмінними в напрямку, перпендикулярному до неї (рис.2).

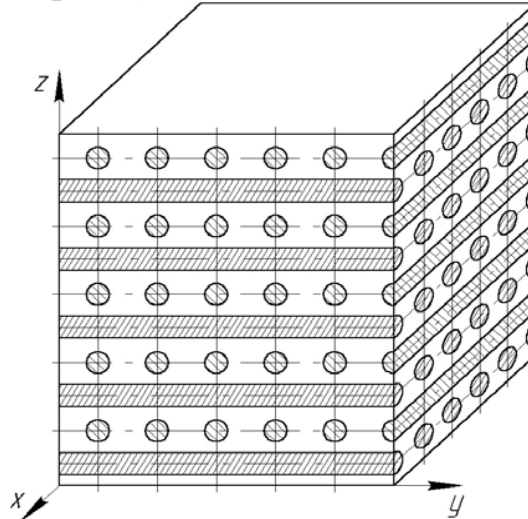


Рис. 1 – Схематичне зображення структури ортотропного КМ з поздовжньо-поперечним укладанням волокон

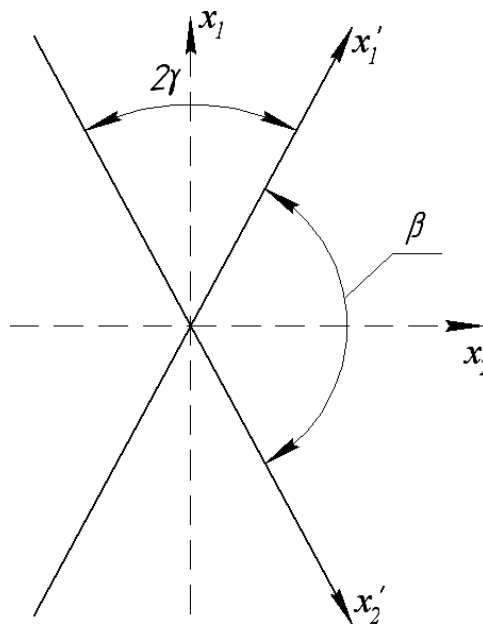


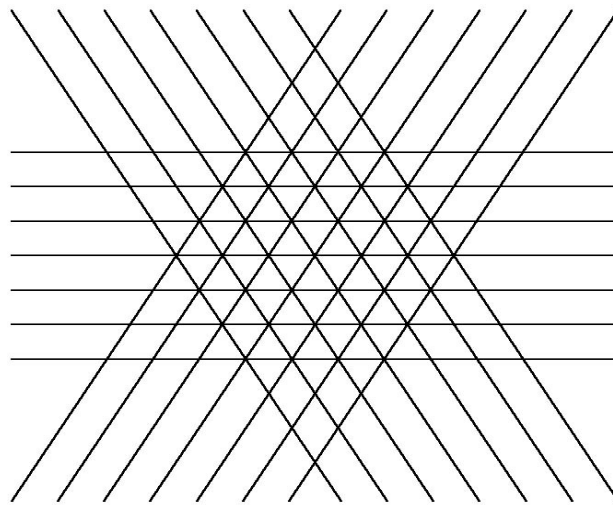
Рис. 2 Напрями осей армування в ортотропних КМ з неортогональним укладанням волокон

У випадку шаруватих композиційних матеріалів, де волокна укладаються в різних напрямках, площинами симетрії виступають: центральна площина самого шару та дві площини, перпендикулярні до неї, які проходять через бісектриси кутів між напрямками армування (кутів 2γ та β).

Відповідно до положень теорії анізотропних матеріалів, було встановлено, що коли волокна в суміжних шарах розміщуються під кутом, що менше 72° , то такий шаруватий матеріал демонструє ізотропну поведінку в площині листа. Якщо композиційний матеріал має площину, в якій властивості однакові в усіх напрямках, та вісь симетрії n -го порядку, перпендикулярну до цієї площини (тобто таку вісь, при обертанні навколо якої на кут $2\pi/n$ об'єкт повертається у початкове положення), його називають трансверсально-ізотропним (або транстропним). До цієї категорії зазвичай відносять і КМ з однонаправленим армуванням. У такому випадку площина ізотропії (наприклад, yz) розташована перпендикулярно до осі укладання волокон (напрямку x).

Однонаправлені композиційні матеріали, в яких волокна орієнтовані в один бік, часто позначаються як матеріали з орієнтацією волокон **1:0** – це співвідношення кількості шарів волокон у поздовжньому та поперечному напрямках. Якщо волокна в шарах розміщуються перпендикулярно одне до одного, матеріал описується як **1:1**, **1:2**, **1:3**, **3:4** тощо. Шаруваті КМ із зірковим укладанням, коли волокна в суміжних шарах утворюють між собою кути по 60° , часто називають матеріалами з орієнтацією **1:1:1**.

Тривимірно армовані композиційні матеріали виготовляються шляхом введення волокон у трьох взаємно перпендикулярних напрямках або за



допомогою спеціальних об'ємних тканин, що забезпечують об'ємне армування матриці.

Рис. 3 Схема орієнтації арматури в шаруватих КМ із зірковим укладанням волокон в суміжних шарах

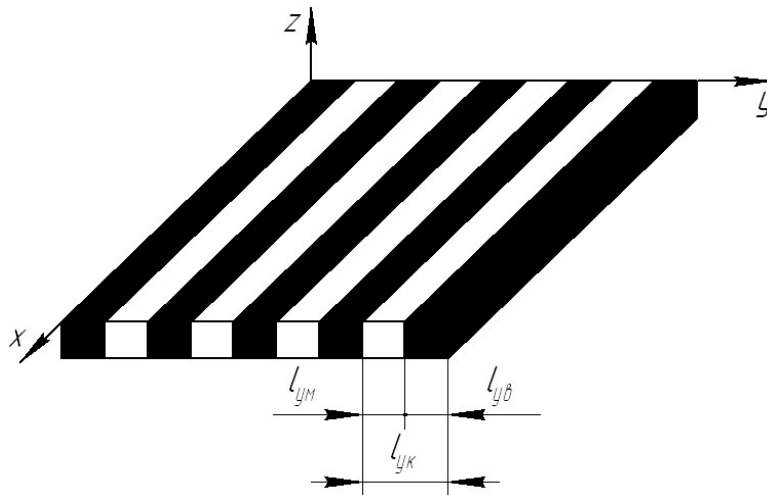


Рис.4 Схематичне зображення структури однонаправленого КМ (чорні області – волокна, білі – матриця)

Класифікація полімерних та металевих композиційних матеріалів за технологічними принципами

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) поділяють за методом виготовлення на три основні групи: **литі**, **пресовані** та **намотувальні**. Композити з хаотично орієнтованим армуванням зазвичай виготовляються методом лиття або пресування, тоді як матеріали з цілеспрямованим армуванням отримують за допомогою намотування або також пресування.

Металеві композиційні матеріали (МКМ), згідно з технологією виробництва, класифікують на **литі** та **деформовані**. Литі МКМ отримують шляхом просочування армувального матеріалу розплавом металу або використовуючи метод керованої кристалізації евтектичних сплавів, де зміцнююча фаза формується безпосередньо в процесі тверднення розплаву (метод *in situ*).

Деформовані композиції створюють за допомогою методів твердофазної обробки, таких як спікання, гаряче пресування, дифузійне зварювання, кування, вибухове формування, а також електролітичне, хімічне, парогазове осадження, плазмове чи газополуменеве напilenня. Більшість із цих методів застосовуються також для виготовлення керамічних композиційних матеріалів (ККМ).

Класифікація КМ за функціональним призначенням

Залежно від сфери застосування, композиційні матеріали можна умовно поділити на:

- **Загальноконструкційні** – для елементів літаків, автомобілів, суден, двигунів, побутових виробів тощо.
- **Жароміцні** – для деталей, що працюють при високих температурах (наприклад, лопатки турбін, камери згоряння).
- **Термостійкі** – використовуються в умовах сильних температурних коливань, наприклад, у теплових каналах МГД-генераторів.

- **Фрикційні та антифрикційні** – застосовуються у вузлах тертя, таких як підшипники ковзання.

- **Ударотривкі** – наприклад, для броньованого захисту техніки.
- **Теплозахисні** – для екранів і покриттів.
- **Матеріали зі спеціальними властивостями** – мають магнітні, електричні, оптичні, ядерні характеристики тощо.

Основні вимоги до волокон та матриці

Вимоги до армувальних волокон

Волокна у формі ниток мають як переваги, так і обмеження. Їх перевагою є висока міцність і можливість орієнтації зміцнення лише в необхідному напрямі. Проте така форма обмежує передачу навантаження тільки вздовж осі волокна, тоді як у поперечному напрямі зміцнення практично відсутнє, а в деяких випадках — може бути навіть ослаблення.

Волокна повинні відповідати таким характеристикам:

- висока температура плавлення;
- низька густина;
- висока міцність у робочому температурному діапазоні;
- технологічність обробки;
- хімічна інертність і слабка розчинність у матриці;
- відсутність фазових перетворень у зоні експлуатації;
- безпечність при використанні.

Зазвичай використовуються три основні типи армувальних волокон:

1. **Ниткоподібні кристали ("вуса")** – перспективний варіант для армування металів, полімерів та кераміки. Вони мають виняткову міцність, жаро- та корозійностійкість, однак викликають складнощі у виробництві.

2. **Металеві дроти** – виготовляються зі сталі, вольфраму, молібдену тощо. Хоч вони і поступаються за властивостями "вусам", їх активно використовують через доступність і дешевизну.

3. **Неорганічні полікристалічні волокна** – хоч і є крихкими, відзначаються легкою вагою, високою хімічною стійкістю та достатньою міцністю (вуглецеві, борні, скляні, кварцові тощо).

Для гнучкості волокон при виготовленні виробів необхідно обчислювати максимально допустимий діаметр згідно з формулою:

$$d_{\max} = 2\sigma_{\epsilon}R / E_{\epsilon}.$$

де:

- σ_{ϵ} – границя міцності волокна,
- R – мінімальний радіус згину,
- E_{ϵ} – модуль пружності волокна.

Вимоги до матриці

Матриця забезпечує цілісність структури, формує деталь та передає навантаження на волокна. Вона також виконує захисну функцію, оберігаючи армувальні елементи від механічних пошкоджень та агресивного середовища.

Для забезпечення міцності під поперечними навантаженнями матриця має мати достатню пластичність. Якщо волокна піддаються навантаженню вздовж осі, то матриця має видовжуватися принаймні так само, як волокна. При поперечному навантаженні вона мусить компенсувати напруження між волокнами.

Зі зростанням об'ємної частки волокон (V_v) зростає ризик утворення тріщин та розшарувань, якщо пластичність матриці недостатня. Для збереження монолітності композиції необхідно, щоб товщина шару матриці між волокнами та їх механічні характеристики відповідали визначеним залежностям. Чим більша деформаційна здатність матриці, тим щільніше можна розташовувати волокна без втрати структурної цілісності.

Тема 3. Наноматеріали: перспективи використання у підвищенні міцності та зносостійкості деталей.

Основи наноматеріалів

Наноматеріали — це матеріали, які мають структурні елементи з розмірами в межах 1–100 нанометрів. Вони включають:

- **наночастинки,**
- **нановолокна,**
- **нанотрубки,**
- **наноармовані покриття,**
- **нанокомпозити.**

У таких матеріалів спостерігається різке зростання поверхневої енергії, що обумовлює унікальні фізико-хімічні та механічні властивості. Це:

- висока твердість і міцність;
- значне підвищення зносостійкості;
- покращена термостабільність;
- зниження коефіцієнта тертя.

Механізми зміцнення за рахунок наноматеріалів

Основні шляхи покращення властивостей:

• **Зернозменшення (ефект Холла–Петча):** менші кристалічні зерна у структурі матеріалу утворюють більше меж зерен, які стримують рух дислокацій.

• **Армування наночастинками:** тверді включення (TiC , Al_2O_3 , нанодіаманти) діють як бар'єри для пластичної деформації.

• **Покриття нанокompозиційного типу:** нанесення наношарів, які забезпечують високу зносостійкість без значного збільшення маси.

• **Вуглецеві нанотрубки (CNT) та графен:** високий модуль пружності (до 1 ТПа) та виняткова міцність при малій густині.

Види наноматеріалів для технічного застосування

Нанокompозити з металевою або полімерною матрицею:

- Наприклад, **алюмінієві композити з TiC або вуглецевими нанотрубками**.

- Покращення: +20–50 % до міцності, значне зниження зношування.

Нанопокриття:

- Застосовують методи **напилення** (плазмове, електрофоретичне, хімічне осадження).

- Наприклад, **Al₂O₃–TiO₂** покриття на сталевих деталях – підвищення зносостійкості до 300 %.

Нанодіаманти:

- Вносяться у мастильні матеріали або матрицю композицій.

- Мають виняткову твердість і забезпечують антикорозійний ефект.

Графенові нанопластили:

- Покращують розсіювання тепла, зміцнюють структуру, знижують тертя.

- Наприклад, **Si₃N₄ + FL-GNP** – зносостійкість зростає в 20 разів.

Практичне застосування в інженерії

У машинобудуванні:

- **Деталі тертя:** підшипники, втулки, шестерні, які піддаються постійному навантаженню й зношуванню.

- **Захисні покриття:** для частин, що працюють у вологому чи абразивному середовищі.

- **Інструментальні матеріали:** свердла, фрези, штампи — покриті TiAlN або AlCrSiN із наноструктурною організацією.

- **Автомобіле- та авіабудування:** алюмінієві сплави, армовані наночастинками – висока питома міцність.

У портовому господарстві:

- **Крани, підйомні механізми, грейфери:** використання зносостійких нанопокриттів значно продовжує термін служби.

- **Вузли кріплення та з'єднання:** нанозміцнення захищає від втомного руйнування.

- **Гідравлічні системи:** використання мастильних нанокompозитів знижує зношення насосів і циліндрів.

Порівняльна таблиця властивостей

Властивість	Звичайна сталь	Сталь з нанопокриттям TiC	Композит з CNT	Al-сплав з нанодіамантами
Твердість, HV	~200	~800	~400	~600
Коефіцієнт тертя	0,7	0,2	0,15	0,1
Знос (мг/км)	Високий	Низький	Дуже низький	Дуже низький

Властивість	Звичайна сталь	Сталь з нанопокриттям TiC	Композит з CNT	Al-сплав з нанодіамантами
Вартість	Низька	Середня	Висока	Висока

Проблеми і обмеження

- Висока вартість виробництва наноматеріалів.
- Складність рівномірного розподілу наночастинок у матриці.
- Недостатнє освоєння технологій у масовому виробництві.
- Екологічна безпека та переробка наночастинок ще не достатньо

вивчена.

Наноматеріали відкривають нові горизонти у зміцненні матеріалів без збільшення маси або втрати пластичності. Вони є особливо перспективними для деталей з високими вимогами до зносостійкості й довговічності. Подальші дослідження мають бути спрямовані на здешевлення виробництва, екологізацію та масштабування технологій.

Тема 4. Адитивні технології: принципи роботи 3D-друку, використання у виготовленні складних деталей.

Історія виникнення та розвитку. Тривимірний друк істотно вирізняється від традиційних методів виготовлення виробів, де деталь формується шляхом обробки заготовки. На відміну від цього, 3D-друк дозволяє створювати об'єкти безпосередньо з цифрової моделі, додаючи матеріал шарами, без потреби у вихідній заготовці. Саме ця характеристика робить адитивне виробництво унікальним порівняно з класичними технологіями.

У традиційних підходах матеріал видаляється для досягнення бажаної форми, що потребує додаткових ресурсів на інструменти, прес-форми та спеціалізоване обладнання. До того ж, такі методи часто мають обмеження щодо складності конструкції, дизайну та потребують дорогого обладнання для обробки й зборки виробу.

Крім того, під час механічної обробки може втрачатися до 90 % початкового матеріалу. Натомість у 3D-друку деталь формується поступово, шар за шаром, що дозволяє майже повністю уникнути відходів. У певному сенсі цей процес нагадує складання конструктора, як-от LEGO. Завдяки цьому технологія забезпечує значну свободу у створенні складних форм без використання дорогого оснащення, що дозволяє зменшити як витрати, так і час на виготовлення продукції.

3D-друк також вирізняється енергоефективністю та мінімальним впливом на довкілля, адже дозволяє використовувати до 90 % матеріалу. Упродовж останніх років ця технологія вийшла за межі промислового прототипування й стала доступною для малого бізнесу й приватних осіб.

Сьогодні ця інновація набирає популярності у всьому світі, демонструючи стрімке зростання кількості користувачів, матеріалів і сфер застосування. Перші технології 3D-друку з'явилися ще в кінці 1980-х років і були відомі під назвою "швидке прототипування" (Rapid Prototyping), адже їх основна мета полягала в оперативному створенні прототипів. Найпершу патентну заявку на цю технологію подав доктор Кодама в Японії у травні 1980 року (рис.5).

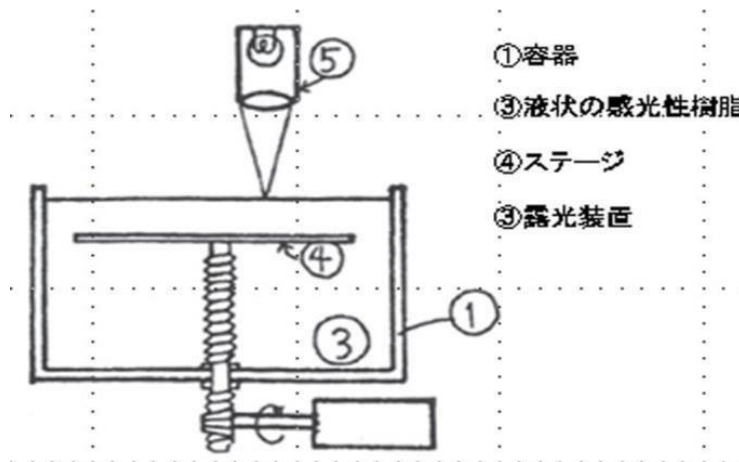


Рис. 5 Ідея тривимірного друку Хидео Кодама, де 1 – корпус, 2 – робоча зона, 4 – стіл для друку, 5 – лазерна установка для спікання матеріалу.

У 1986 році було офіційно зареєстровано перший патент на пристрій для стереолітографії (SLA). Його автором став Чарльз Халл, який розробив цей тип обладнання ще у 1983 році. Згодом він став одним із засновників компанії «3D Systems», яка й сьогодні залишається однією з провідних і найпродуктивніших компаній у галузі 3D-друку.

У 1987 році Карл Декард, дослідник із Техаського університету, подав заявку на патент у США на технологію селективного лазерного спікання (SLS), яка належала до методів швидкого створення прототипів. Патент було затверджено у 1989 році, а згодом технологію ліцензувала компанія DTM Inc, що пізніше увійшла до складу корпорації «3D Systems» (рис.6).



Рис. 6 Апарат SLA-250



Рис. 7 Апарат Formiga P100

У 1989 році Скотт Крамп, один із засновників компанії Stratasys Inc., звернувся з патентною заявкою на технологію під назвою «моделювання шляхом пошарового наплавлення» (FDM). Цей метод ґрунтувався на принципах, подібних до ідеї відкритого проекту RepRap, яка залишається актуальною й нині. У 1992 році компанія Stratasys офіційно отримала патент на цю інноваційну технологію.

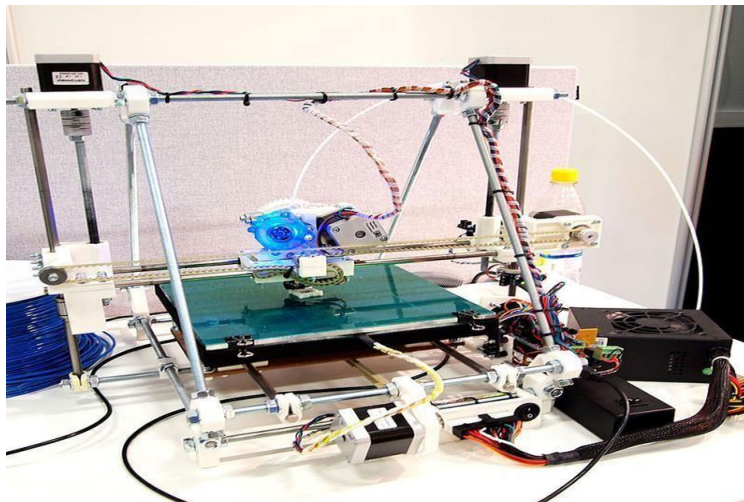


Рис. 8 Принтер типу RepRap заснований на технології FDM

У 2000 році було реалізовано технологію селективного лазерного плавлення (SLM), піонерами якої стали компанії Non Corporation і Sciaky Inc. Вони стали одними з перших, хто почав активно впроваджувати цей метод у виробництво.

Кожен процес 3D-друку починається з цифрової тривимірної моделі, яку створюють за допомогою спеціального програмного забезпечення, зокрема CAD-систем. Після цього модель експортується у формат STL та розбивається на окремі шари за допомогою слайсера — програми, яка готує файл для друку. На основі цих шарів 3D-принтер поступово формує об'єкт відповідно до заданої геометрії.

Сьогодні існує багато різновидів адитивних технологій, кожна з яких використовує різні матеріали та має власний принцип побудови виробу. До поширених матеріалів належать функціональні полімери, метали, кераміка, а також пісок — усі вони широко застосовуються у сфері промислового прототипування. Паралельно ведуться дослідження в галузі біодруку, зокрема друку органічних матеріалів, і навіть продуктів харчування.

Найпопулярнішими матеріалами залишаються ABS (акрилонітрилбутадієнстирол) та PLA (полілактид), однак усе частіше використовуються альтернативи — зокрема нейлон. Крім того, зростає кількість доступних 3D-принтерів початкового рівня, які адаптовані для друку їстівними матеріалами, наприклад, шоколадом або цукром.

Класифікація технологій 3D-друку

За класифікацією міжнародної організації ASTM, що відповідає за розроблення технічних стандартів, адитивні виробничі процеси поділяються на сім основних груп:

1. Технології на основі екструзії

У цьому підході в точку створення об'єкта подається нагрітий пастоподібний матеріал через екструдер. Суміш, зазвичай, складається зі зв'язувального компонента та порошкоподібного металу. Після формування «сирої» моделі її розміщують у термопечі для видалення сполуки та спікання матеріалу, подібно до класичних способів обробки. До цього типу належать такі системи, як MJS (Multiphase Jet Solidification), FDM (Fused Deposition Modeling) та FFF (Fused Filament Fabrication).

2. Розпилення матеріалу

У таких технологіях, зокрема PolyJet, у зону побудови через багатоструменеву головку подається віск або фотополімер. Це дозволяє точно і рівномірно наносити матеріал, формуючи об'єкт шар за шаром. Інша назва цієї технології — Multi Jetting Material.

3. Розпилення сполучного компонента

Цей метод застосовується у струменевих (InkJet) технологіях, де на поверхню наноситься не сам матеріал для моделювання, а спеціальний зв'язуючий агент, який вступає в реакцію з порошковим середовищем. Такий підхід характерний, наприклад, для технології компанії ExOne.

4. З'єднання листових матеріалів

У цій категорії використовуються листові будівельні матеріали — фольга з металу, полімерна плівка чи навіть папір. Один із прикладів — технологія Fabrisonic, яка базується на ультразвуковому зварюванні тонких металевих

пластин. Після з'єднання зайвий матеріал знімається шляхом механічного оброблення, поєднуючи адитивний та субтрактивний підходи.

5. Ванна фотополімеризації

Цей метод використовує рідкі фотополімерні смоли, які тверднуть під впливом світла. Найвідомішими прикладами є SLA (Stereolithography) від компанії 3D Systems та DLP (Digital Light Processing) від EnvisionTEC. В процесі кожен шар застигає під дією джерела світла, формуючи деталь з високою точністю.

6. Плавлення попередньо нанесеного шару

Застосовується у технологіях типу SLS (Selective Laser Sintering), де кожен шар порошку нагрівається за допомогою лазера або спеціальної термоголовки. Одним із прикладів є система SHS від компанії Blueprinter.

7. Локальне плавлення під дією енергії

Матеріал подається разом з енергією безпосередньо в зону створення об'єкта. Процес включає використання лазера або пучка електронів для миттєвого плавлення. Як джерело енергії можуть слугувати концентровані електронні промені (наприклад, Sciaky) або лазерні системи (POM, Optomec). Нерідко така система встановлюється на роботизованому маніпуляторі для підвищення точності.

Основні напрями використання 3D-друку

Архітектура. Тривимірний друк широко застосовується для створення архітектурних макетів будівель, житлових кварталів та інфраструктури — включаючи дороги, дерева, вуличне освітлення. Завдяки використанню гіпсового композиту, собівартість таких моделей залишається невисокою. Доступна палітра з понад 390 тисяч кольорів CMYK дозволяє відтворювати найскладніші дизайнерські рішення. Для таких цілей часто використовуються моделі 3D-принтерів ZPrinter: кольорові — 250, 450, 650, 850; монохромні — 150 та 350.

Будівництво. Науковці з Університету Південної Каліфорнії розробили 3D-принтер, здатний друкувати великі об'єкти. Система працює подібно до будівельного крана: вона пошарово викладає бетон, формуючи будівлі. Один із прототипів дозволяє звести двоповерховий будинок всього за 20 годин. У Європі архітектори експериментують з унікальними формами, такими як стрічка Мебіуса, використовуючи суміші піску та сполучних речовин. У майбутньому можлива поява цілих 3D-друкованих містечок.

Мале серійне виробництво. 3D-друк завойовує нішу у виготовленні обмежених серій товарів. Це можуть бути декоративні об'єкти, фігурки для геймерів, прототипи майбутніх продуктів чи складових деталей. Вони застосовуються як у тестуванні, так і для презентацій. У таких проєктах зазвичай використовуються системи Dimension (Elite, SST 1200ES) та Fortus (400mc, 900mc).

Функціональне тестування. 3D-друк дозволяє швидко виготовити та випробувати механізми чи конструктивні вузли без потреби у традиційному виробництві. Це значно знижує витрати часу та коштів. Серед популярного обладнання — Objet 24/30, Eden (250, 260V, 350, 500V), а також Connex-серії.

Для створення робочих пластикових моделей використовують також Dimension uPrint, Elite, SST 1200ES, Fortus 400mc і 900mc.

Медицина.Цифрові технології дозволяють виготовляти точні анатомічні моделі для підготовки до хірургічних втручань. У галузі протезування та стоматології 3D-друк скорочує терміни виготовлення виробів. Медичні моделі створюються як зі звичайних матеріалів, так і з біосумісних — включаючи живі клітини. Наприклад, було надруковано дзюб для пораненого орла або фрагменти шкіри з клітин пацієнта. Деякі дослідження вже дозволили створити модель функціональної людської нирки. Найбільш поширені принтери — Eden, Fortus, Objet Connex.

Освіта.3D-друк забезпечує учнів візуальними матеріалами — від простих моделей до навчальних макетів. Завдяки безпеці, простоті експлуатації та екологічності сучасні принтери легко інтегруються у навчальні аудиторії від шкіл до університетів. Їх використання сприяє підвищенню якості навчального процесу та практичних навичок.

Модна індустрія.Дизайнери вже почали створювати елементи одягу за допомогою 3D-принтерів. Наприклад, Айріс Ван Херпен представила колекцію «Напруга» на Паризькому тижні моди. Унікальні моделі виготовляються з різних матеріалів, що дає змогу поєднувати гнучкість, міцність і стиль. Поки що такі речі демонструються на подіумах, але масове виробництво — це лише питання часу.

Ювелірна справа.У галузі ювелірного виробництва 3D-друк спрощує створення воскових прототипів, що значно прискорює весь процес виготовлення прикрас. Для цього використовують спеціальні матеріали, подібні до ювелірного воску, а також принтери типу Soldscape T76, Eden (260V, 500V), Objet260 Connex тощо.

Основні технології 3D-друку

Станом на сьогодні зареєстровано понад 100 методів тривимірного друку — як для полімерів, так і металів. Проте більшість із них позиціонуються як окремі, часто з авторськими назвами, що захищають інтелектуальну власність компаній-виробників. Насправді унікальних технологій налічується не більш як 15. Далі розглянемо чотири найпоширеніші, перспективні та доступні методи: **FDM**, **SLA**, **SLM** та **DMLS**.

FDM (Fused Deposition Modeling)

FDM — це технологія моделювання методом пошарового наплавлення, широко поширена у 3D-друці. Вона часто застосовується для виготовлення моделей, макетів або виробів, до яких не висуваються суворі вимоги щодо точності поверхні і геометрії.

Принцип роботи: **терапластичний філамент**, що надходить у вигляді катушки, подається в екструдер, де розплавляється і формується у вигляді шару, повторюючи контури цифрової 3D-моделі. Друк починається з цифрової моделі у форматі STL, яку «нарізають» на шари, визначаючи орієнтацію для друку. Якщо модель має виступи або нависаючі елементи, створюють підтримуючі конструкції, які потім легко видаляються (іноді — за допомогою

матеріалу, що легко розчиняється). Деякі принтери підтримують багатоматеріальний або багатоколірний друк в межах одного процесу.

Екструдер оснащено механізмом подачі нитки, нагрівальним елементом і соплом — через нього екструдується розплавлений філамент. Температура сопла регулюється — приблизний діапазон 150–310 °C — залежно від матеріалу. Верхня частина сопла охолоджується вентилятором, щоб уникнути передчасного плавлення філаменту та засмічення друкуючої головки.

Головка рухається за координатами X, Y і Z, керуючись алгоритмами, подібними до ЧПУ-машин (рис.9). Після завершення кожного шару платформа опускається на висоту шару, і друк продовжується знизу догори. Використовуються поодинокі або сервомотори. Система координат, зазвичай, декартова.

Переваги методу FDM: **низька вартість**, гнучкість у виборі матеріалів (ABS, PLA, полікарбонати, поліаміди, полістрили та ін.), можливість швидкого прототипування та дрібносерійного виробництва. Недолік — менша деталізація та обмеження при нависаючих елементах: потребують підтримок, особливо під великими кутами.

FDM залишається однією з найекономніших технологій 3D-друку, що зробило її популярною в домашніх та навчальних принтерах — для виготовлення прототипів, іграшок, сувенірів або функціональних виробів.

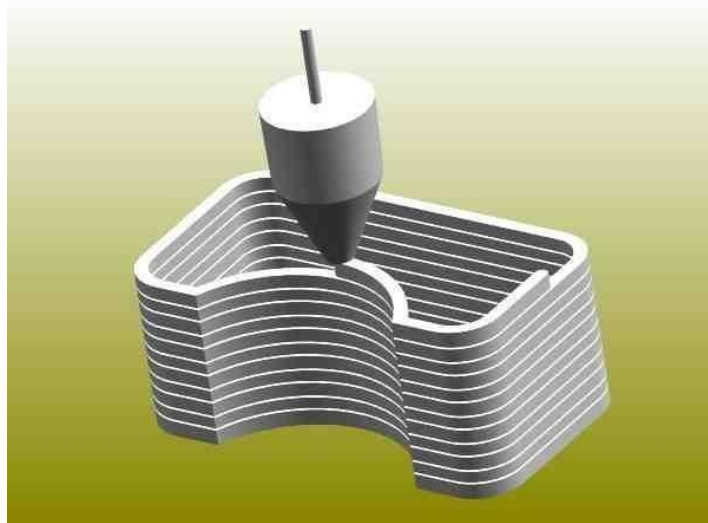


Рис. 9 Схема формування шарів деталі

SLA (Stereolithography)

SLA — це технологія, де об'єкт формується з рідкої фотополімерної смоли, що твердне під дією лазерного випромінювання. Переважно застосовується для виготовлення об'єктів з великою точністю поверхні.

Процес: у ванну з полімером занурюється сітчаста платформа. Товщина кожного шару становить приблизно 0,05–0,15 мм. Лазер сканує область, яка відповідає геометрії моделі, і ініціює полімеризацію. Після кожного шару платформа опускається, а рідина вирівнюється спеціальним інструментом (рис. 10). Після завершення друку модель очищують від залишків смоли, просушують, потім ретельно промивають і остаточно полімеризують у

спеціальній УФ-камері. Як і в інших методах, підтримки часто необхідні для нависаючих конструкцій.

Переваги SLA:

- Висока деталізація та точність;
- Можливість друку великих об'єктів (до $150 \times 75 \times 55$ см, вага до 150 кг);

- Висока механічна міцність і термостійкість (до $\sim 100^\circ\text{C}$);
- Відсутність геометричних обмежень для складних конструкцій;
- Мінімальні відходи та простота подальшої обробки поверхні.

Недоліки:

- Обмежений вибір фотополімерних матеріалів;
- Відсутність можливості кольорового чи багатоматеріального друку;
- Повільний швидкісний вертикальний друк (10–20 мм/годину);
- Великі габарити самих пристроїв;
- Обмежений спектр кольорів (переважно білий, сірий, напівпрозорий).

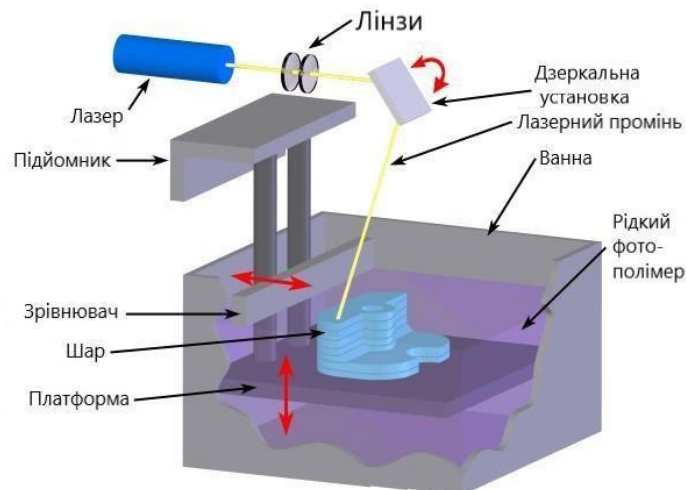


Рис. 10 Схема установки для стереолітографії

SLM (Selective Laser Melting)

Механізм **SLM** нагадує SLA, але замість рідини використовується порошок (частинки діаметром 10–100 мкм). Тонким шаром порошок розстеляють горизонтально, після чого лазер повністю розплавляє задані ділянки шару, напружуючи структуру (рис.11). Відбувається спікання частинок між собою та попереднім шаром. Після кожного шару платформа опускається, щоб викласти новий матеріал. Рекомендовано роботу в азотному середовищі для запобігання окисненню. Необроблений порошок навколо виробу утворює природні підтримки — тобто додаткові штучні конструкції не потрібні. Якість поверхні може бути шорсткою — може вимагатися полірування або випалення. SLM дає змогу працювати з металами, керамікою, склом, воском або їх сумішами. Дозволяє виготовляти безвідходно, після остаточного охолодження порошок можна відновити для нового

використання. Метод SLM підходить для виготовлення деталей із складною геометрією, включно з тонкостінними або внутрішньопористими



структурами. Часто використовується в ортопедії та аерокосмічній промисловості. У тестах NASA елементи для двигунів (наприклад, J-2X, RS-25) з нікелевих сплавів, друківані SLM, показали високу міцність — хоча щільність трохи нижча за відлиті аналоги, відсутність зварювальних швів підвищує довговічність.

Рис. 11 Плавлення лазером порошкоподібного металу

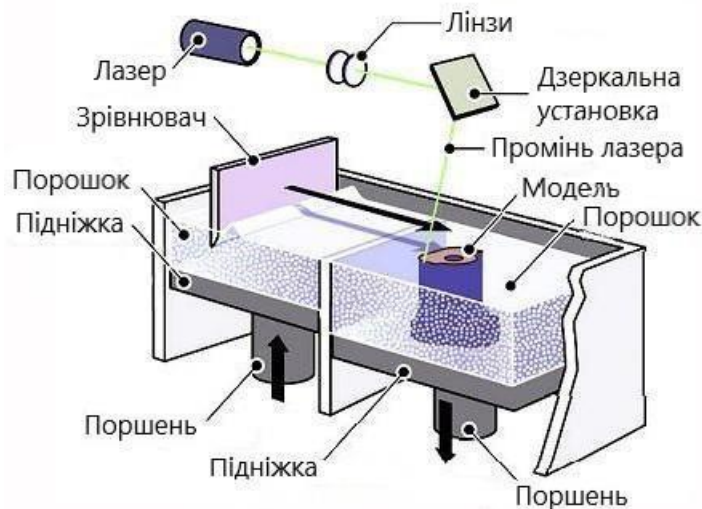


Рис. 12 Схема установки для SLM

DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

DMLS — технологія прямого лазерного спікання металевих деталей, розроблена німецькою компанією EOS. Часто її порівнюють з SLM, але є відмінності у підході.

Процес починається з цифрової STL-моделі, що розбивається на шари. В робочій камері порошок рівномірно розподіляється валиком, після чого лазер спікає його до попереднього шару. Повторюється цикл шар за шаром. Використовуються потужні оптико-волоконні лазери (~200 Вт), деякі системи

мають кілька лазерів для підвищеної продуктивності. Товщина шару — до ~20 мкм, що значно дрібніше, ніж у FDM (~100 мкм).

Підтримки не потрібні; необроблений порошок утворює самонесучі структури — після охолодження його можна зібрати й повторно використати. Це робить метод практично безвідходним, що важливо при роботі з дорогими металами (альпака, золото, платина).

Переваги:

- Висока точність (мінімальна механічна обробка);
- Виготовлення складних форм без додаткових компонентів;
- Економія матеріалу;
- Швидке виготовлення прототипів і невеликих серій із мінімальним часом;
- Зручність в промисловому середовищі (аерокосмічне, стоматологічне, медичне виробництво).

Обмеження: готові деталі можуть не досягати тієї ж міцності, що й литі аналоги через мікроструктуру. Обмеження в розмірі — зазвичай до 250×250×250 мм, хоча існують більші системи при відповідній вартості.

Матеріали для тривимірного друку

Усі сировинні матеріали, які застосовуються в технологіях 3D-друку, умовно поділяють на дві основні групи: полімери та метали. Поділ за конкретними технологіями не завжди є точним, адже один і той самий матеріал може використовуватися в кількох методах адитивного виробництва

Полімерні матеріали

ABS-пластик. Акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS) — один з найбільш затребуваних матеріалів у 3D-друку. Він вирізняється відсутністю токсичних випарів, пружністю та стійкістю до ударів. Температурний режим плавлення — в межах 240–248 °С. Поставляється у вигляді дрібного порошку або філаменту, намотаного на котушку (див. рис. 13). ABS забезпечує довговічність та міцність надрукованих виробів, доступний у великій палітрі кольорів. Проте створення прозорих об'єктів з нього неможливе — такий варіант матеріалу не існує.



Рис. 13 - ABS-пластик для 3D-принтера

Акрил. Матеріал використовується обмежено — переважно для створення прозорих об'єктів. Працювати з ним складніше, ніж з ABS, адже

потрібна вища температура плавлення. Він швидко застигає, що призводить до утворення мікропухирців повітря і можливих оптичних дефектів на поверхні виробу.

Нейлон. Технологія друку нейлоном подібна до роботи з ABS, але вимагає вищих температур — від 310 °C до 325 °C. Матеріал легко поглинає вологу та має тривалу фазу охолодження. Через токсичність компонентів необхідно або використовувати вакуумну систему, або забезпечити ефективне вентилування. Також, через низьке тертя, потрібен спеціальний механізм подачі філаменту з підвищеним зчепленням. Попри ускладнення, нейлон активно використовується в адитивних технологіях, зокрема — у функціональних вузлах з рухомими елементами (див. рис. 14).



Рис. 14 Нейлон для 3D-друку

Полікапролактон. Цей матеріал є біорозкладним поліефіром із низькою температурою плавлення та високою швидкістю затвердіння. Він безпечний для організму людини та сумісний із декількома технологіями, такими як FDM, SLS та ZCorp.

Полікарбонат. Міцний термопластик, який витримує як високі, так і низькі температури, не втрачаючи механічних властивостей. Володіє високою світлонепроникністю. Його застосування переважно пов'язане з FDM-друком. Вирізняється складністю у виробництві, але є безпечним для довкілля.

PLA-пластик. Один з найбільш екологічних матеріалів, вироблений з природної сировини — наприклад, з кукурудзи або цукрових буряків. Моделі з PLA біологічно розкладаються під дією температури та світла. Його недоліки — висока вартість і обмежений термін служби. Візуально філамент PLA майже не відрізняється від ABS.

Поліпропілен. Найлегший з усіх полімерів, що використовуються у 3D-друці. Хоча він поступається поліетилену низького тиску за легкістю плавлення, має кращу зносостійкість. Однак цей матеріал чутливий до кисню і нестійкий до низьких температур (див. рис. 2.7).

Поліфенілсульфон. Цей полімер надійшов до 3D-друку з аерокосмічної галузі. Матеріал вогнетривкий, надзвичайно жорсткий, за зовнішнім виглядом

схожий на скло, але перевершує його за міцністю. Застосовується в технологіях FDM та SLS.

Поліетилен низького тиску. Це найпоширеніший пластик у світі — з нього виготовляють пляшки, пакети, труби тощо. Він є лідером серед матеріалів для 3D-друку завдяки універсальності й сумісності з усіма основними технологіями.

Металеві та металовмісні матеріали

Металеві порошки — це найміцніші матеріали, які застосовуються в 3D-друку. Вироби, виготовлені з їх використанням, часто мають кращі властивості, ніж аналоги, створені традиційними методами.

- **Титан** — біосумісний метал з високою міцністю. Застосовується в медицині, авіаційній промисловості та машинобудуванні.
- **Нержавіюча та інструментальна сталь** — найбільш поширені варіанти для металевого друку. Вони характеризуються високою зносостійкістю, антикорозійністю та механічною міцністю.
- **Алюмінієві сплави** — легкі та електропровідні. Часто використовуються в автомобілебудуванні, аерокосмічній галузі та промисловості.
- **Кобальт-хромові сплави** — корозійностійкі, біосумісні та термостійкі. Застосовуються у стоматології, медицині й у виробках, що працюють при високих температурах.
- **Нікелеві сплави** — відзначаються високою міцністю, можливістю зварювання та витримування температур до 3000 °C. Широко використовуються в енергетиці, авіації, виробництві складних інструментів.

Більшість 3D-принтерів дозволяють використовувати широкий спектр металів. Серед них — мідь, залізо, вольфрам, сплави на основі нікелю або кадмію. Але кожен новий матеріал вимагає індивідуального налаштування обладнання. Через складність процесу це переважно робиться в експериментальному порядку, що обмежує універсальність друкарських установок.

Програмне забезпечення для створення 3D-моделей

Щоб почати 3D-друк, спочатку потрібна цифрова модель об'єкта. Отримати її можна кількома способами:

- Завантажити готову модель з онлайн-бібліотек 3D-файлів;
- Створити модель у 3D-редакторі вручну;
- Відсканувати реальний об'єкт і отримати його цифрову форму.

Найпростіший спосіб — сканування існуючого предмета. Використовують або спеціальні 3D-сканери з рідним ПЗ, або фотограмметричні методи (наприклад, Autodesk 123D Catch), які створюють модель на основі фото. Якщо немає сканера або результати не відповідають заданій точності, найкраще створювати або доопрацьовувати модель у 3D-редакторі. До того ж, навіть після сканування часто потребується редагування

— тому 3D-редактор стає практично незамінним інструментом для створення оригінальних і унікальних виробів.

Найчастіше використовують **CAD-системи** (computer-aided design) — інструменти автоматизованого проектування й моделювання, хоча український термін САПР набагато ширший і включає:

- CAE системи (інженерний аналіз),
- CAM (проектування технологічних процесів),
- PDM (керування даними про продукт),
- SCM (управління постачанням).

Найпоширенішим форматом, який підтримують 3D-принтери, залишається **STL**. Однак не всі STL-файли готові до друку — особливо якщо модель має “дірки” або погано сформовану поверхню. Модель повинна бути **герметичною**, тобто мати монолітну поверхню без пропусків. У Blender-типових редакторах моделюють тільки поверхню, що не завжди підходить новачкам. Тому рекомендуються програми, спеціально орієнтовані на підготовку STL до друку, наприклад Autodesk 123 Design.

Нижче — популярне ПЗ для роботи з тривимірними моделями:

1. **Autodesk 3Ds Max** — потужний інструмент для поверхневого моделювання. Ідеально підходить для дизайнерів, але результат важко застосовувати для адитивного виробництва через фокус на поверхнях.

2. **SolidWorks** — програма для твердотільного моделювання (solid modeling), створює об’ємні моделі з наповненням внутрішнім об’ємом. Підходить для переведення 2D креслень у 3D форму.

3. **Autodesk 123D Design** — безкоштовний інтерфейсний редактор для новачків. Має інтуїтивний інтерфейс, однак обмежену кількість навчальних матеріалів.

4. **Google SketchUp** — проста й безкоштовна CAD-система: власний формат SKP конвертується в STL через плагіни. Універсальна, проста й ефективна.

5. **Materialise Magics** — спеціальний інструмент для обробки STL: виправлення помилок, злиття об’єктів, створення геометричних елементів і виправлення дефектів після експорту.

6. **Tinkercad** — веб-додаток на базі WebGL для створення простих моделей у браузері; безкоштовний для некомерційного використання. Підтримує інтеграцію з i.Materialise, Shapeways, Ponoko, MakerBot.

7. **SolidWorks Standard** — включає параметричне моделювання, бібліотеки компонентів, експрес-аналіз, генерацію креслень, анімації й інші інструменти проектування.

8. **OpenSCAD** — редактор, що працює на основі програмного опису об’єкта. Підтримує конструктивну геометрію (CSG) і екструзію 2D-контурів. Ідеально підходить для деталізованих механічних компонентів з контрольованими параметрами.

9. **T-FLEX CAD 3D** — програма для конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Має інструменти для мас-інерційного

аналізу, реалістичної візуалізації, креслень, фотореалізму, аналізу кривизни, текстур, освітлення.

10. **FreeCAD** — безкоштовний параметричний 3D-редактор із підтримкою генерації моделей і креслень. Підійде новачкам для ознайомлення з геометрією, кінематикою та динамікою.

Додатково дизайнери часто оформлюють моделі онлайн за допомогою таких редакторів:

- **3DTin** — зручний інтерфейс, підтримка кирилиці;
- **123D Design і Thinkercard** — орієнтовані на молодшу аудиторію, з галереями готових об'єктів.

Технології 3D-сканування

3D-сканер — це пристрій, що аналізує форму реального об'єкта й генерує його цифрову копію. Ця модель може далі оброблятися CAD-системами для проектування, аналізу або 3D-друку (рисунки 3.1).

Сканування здійснюється за допомогою різних технологій. Проблеми можуть виникати при роботі з дзеркальними, блискучими або прозорими поверхнями. 3D-дані застосовують у багатьох сферах — від кіноіндустрії до ортопедії, дизайну, реверсного інжинірингу та цифрової документації історичних артефактів.

У процесі сканування створюється хмара точок — кожна точка поєднує просторову координату та, за потреби, кольорову інформацію. Якщо проходять кілька сканувань з різних ракурсів, дані вирівнюються у єдиній системі координат — це називається 3D-конвеєром.

Типи 3D-сканерів

Контактні — досліджують об'єкт через фізичний контакт. Наприклад, координатно-вимірювальна машина (КІМ). Висока точність, але ризик пошкодження або деформації об'єкта. Досить повільні.

Безконтактні, які поділяються на **активні** й **пасивні**:

- **Тріангуляційні (активні)** — сканери випромінюють лазерний промінь і фіксують його відбиття камерою. Відстань визначається шляхом побудови трикутника між лазером, точкою та камерою.

- **Часопролітні** — вимірюють час руху лазерного імпульсу до об'єкта та назад, дозволяючи визначати відстань. Можуть зчитувати до сотні тисяч точок за секунду.

Галузі застосування

3D-сканери знайшли застосування в:

- Промисловому дизайні та швидкому прототипуванні,
- Маркетингу та каталогізації товарів,
- Реалістичних копіях об'єктів у медицині, кіно, fashion-індустрії,
- Археології, де потрібна 3D-документація артефактів,
- Реверсному інжинірингу — коли модель потрібно відновити з фізичного прототипу.

Сьогодні 3D-сканери випускають тисячі компаній — від індустріальних лідерів до новачків. Вони стають все доступнішими, охоплюючи як великі виробництва, так і незалежних інженерів.

Програмне забезпечення керування або G-код

G-код — це спеціалізована мова програмування, яка використовується для керування верстатами з числовим програмним управлінням, зокрема 3D-принтерами. Зазвичай файл із G-кодом має формат TXT, де кожен рядок являє собою окрему інструкцію або кадр. Існує основна структура цієї мови, на базі якої різні виробники обладнання створюють свої версії команд. Наприклад, G-коди, які використовують Ultimaker або RepRap, мають свої особливості та значно простіші порівняно з індустріальними стандартами.

Створення G-коду зазвичай виконується автоматично за допомогою програм-слайсерів після завантаження 3D-моделі. У слайсері задаються основні параметри друку, на основі яких і формується код. Однак у межах нашої магістерської роботи ми здійснили ручове створення G-коду без допомоги сторонніх програм. Отриманий код мав базову структуру, але успішно відпрацьовувався у симуляторі 3D-принтера. Це дозволило самостійно встановлювати параметри, які зазвичай недоступні в слайсерах, зокрема — коригувати подачу філамента («E») та швидкість руху друкуючої головки у вибраних точках.

Структура керуючого файлу умовно поділяється на:

- **а) коментарі**, що містять допоміжну інформацію;
- **б) підготовчі дії** перед початком друку;
- **в) основний етап виготовлення деталі**;
- **г) завершальні інструкції** після друку.

Коментарі в коді вставляються за допомогою символу «;» — вони полегшують розуміння налаштувань друку, таких як тривалість процесу, тип заповнення, діаметр філамента та інші параметри.

Підготовчі дії включають, зокрема, очищення сопла, прокачування пластику, повернення друкуючої головки в нульові координати, опускання платформи, а також інші дії перед стартом друку або після його завершення.

Основна частина складається з команд переміщення головки та подачі матеріалу, а також керування температурою платформи (за потреби).

Завершальні команди — це набір інструкцій, які вимикають основні системи принтера та завершують роботу.

Ключові параметри друку

Слайсер — це програмне забезпечення, яке трансформує 3D-модель у набір інструкцій (G-код), які розуміє 3D-принтер. Процес перетворення називається слайсінгом.

Основні налаштування:

- **Auto-Configure for Material:** встановлює параметри для популярних типів пластику, таких як PLA, ABS, Nylon. Можна додати власні профілі.

- **Auto-Configure for Print Quality:** дозволяє обирати між трьома рівнями якості: Fast (швидкість на шкоду якості), Medium (баланс) та High (якість при низькій швидкості).
- **General Settings:** визначає відсоток заповнення моделі.
- **Extruder:** містить налаштування екструдера, включаючи діаметр сопла (Nozzle Diameter), множник подачі пластику (Extrusion Multiplier) та ширину нитки (Extrusion Width).
- **Retraction:** налаштовує параметри втягування філамента під час холостих переміщень. Визначаються дистанція (Retraction Distance) і швидкість втягування (Retraction Speed).
- **Layer:** включає налаштування висоти шару (Primary Layer Height), кількості верхніх/нижніх шарів (Top/Bottom Solid Layers), кількості периметрів, напряду друку, режиму друку в один шар (Vase mode), параметри першого шару.
- **Additions:** включає спідницю (skirt), яка допомагає розігріти екструдер і покращити адгезію першого шару. Вказуються кількість шарів (Skirt Layers), відстань від моделі (Skirt Offset from part), кількість контурів (Skirt Outlines).
- **Use Raft:** активує створення сітки під моделлю для поліпшення зчеплення з платформою, особливо для проблемних пластиків або моделей із малою площею контакту.
- **Infill:** керує внутрішнім заповненням деталі. Вибирається тип візерунка (лінійний, сітка, зигзаг, трикутник, медові соти) та спосіб заповнення основи/кришки (зовнішнє заповнення).
- **Support:** визначає налаштування підтримки для нависаючих частин: щільність, кількість шарів, ширину тощо.
- **Temperature:** встановлює температурний режим для екструдера та платформи.
- **Cooling:** регулює охолодження моделі. Можна задавати режим охолодження для кожного шару, а також обдув при холостих переміщеннях (Blip fan to full power).
- **Speeds:** задає швидкість друку та переміщень. Важливі параметри: Default Printing Speed, Outline Underspeed (зовнішній контур), Solid Infill Underspeed (суцільне заповнення), Support Structure Underspeed (підтримки), X/Y Axis Movement Speed (холості переміщення).
- **G-Code:** дозволяє змінювати параметри генерації G-коду, включаючи налаштування типу принтера, розміру області друку, інформації про прошивку.

Після налаштування всіх параметрів слайсер створює готовий G-код, який використовується принтером для друку 3D-моделі.

Тема 4. Сучасні методи обробки матеріалів: лазерна, плазмова, ультразвукові.

Ультразвукові методи механічної обробки

Методи ультразвукової обробки ґрунтуються на використанні коливань високої частоти (від 18 до 44 кГц) з інтенсивністю приблизно 10 Вт/см². Джерелами ультразвукових коливань є п'єзоелектричні або магнітострикційні перетворювачі, що працюють від спеціального генератора.

На рисунку 15 зображено кілька видів ультразвукової обробки:

- **а)** обробка за допомогою вільного абразиву для видалення незначних задирок (менше 0,1 мм) або для тонкого шліфування дрібних компонентів (до 10–20 г);
- **б)** точна обробка крихких і твердих матеріалів із використанням абразивної суспензії;
- **в)** очищення робочої поверхні шліфувального круга під час обробки в'язких матеріалів;
- **г)** додавання ультразвукових коливань до інструмента для підвищення ефективності різання матеріалів, які важко піддаються обробці.

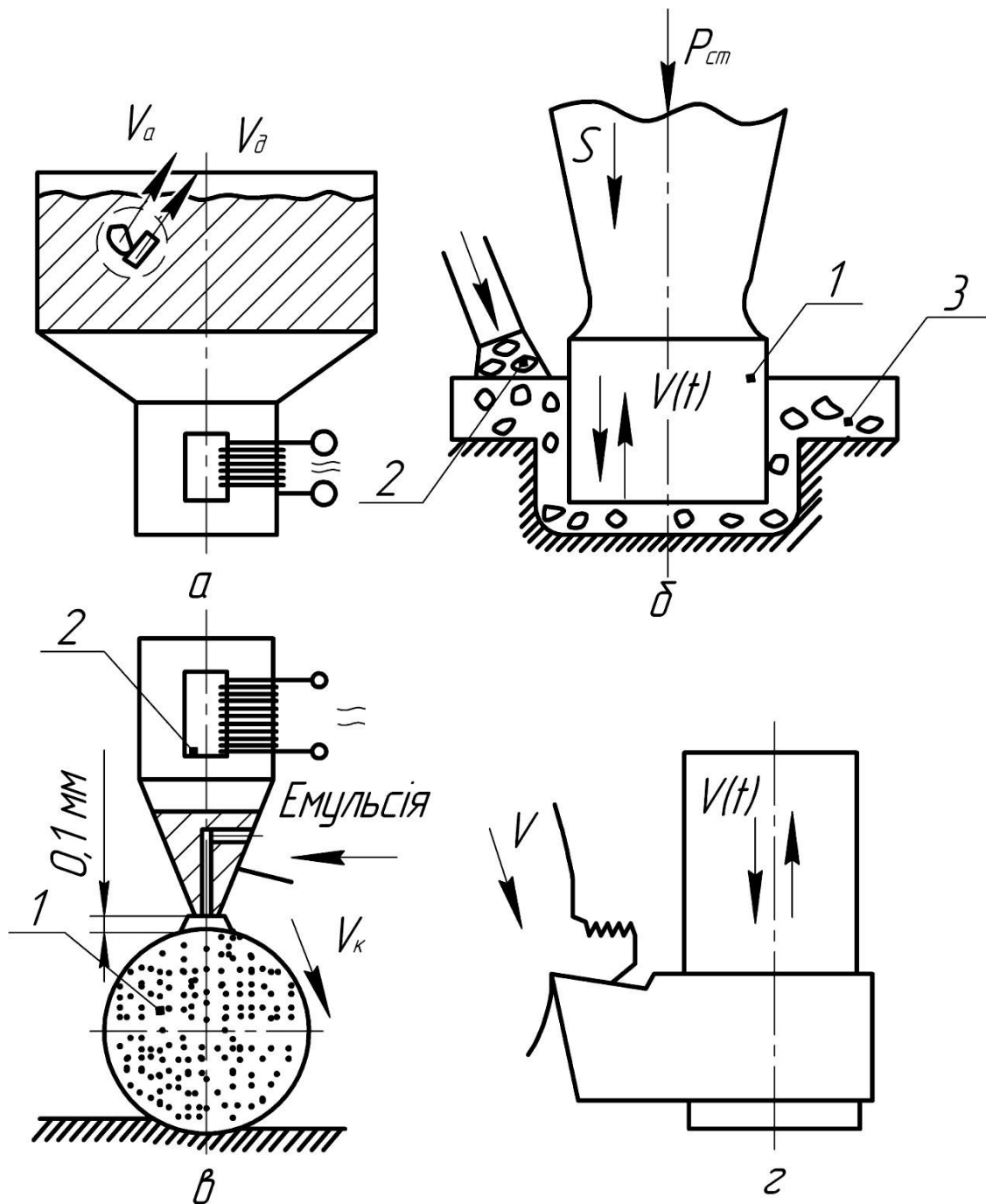


Рис. 15 Різновиди ультразвукової обробки

Ультразвук також активно використовується в чистовій обробці для зміцнення поверхні. За рахунок впливу коливань зменшується опір матеріалу до пластичної деформації, що дає можливість якісно обробляти тонкостінні деталі або вироби з м'якими покриттями навіть при невеликому зусиллі.

Під час обробки в абразивній рідині абразивні частинки та об'єкт взаємодіють під дією ультразвуку, що сприяє точному зняттю матеріалу. Такий принцип реалізований у спеціалізованих установках, які активно використовуються на практиці.

Особливо ефективною є точна абразивна обробка: інструмент передає коливання на деталь, одночасно з подачею абразиву. У процесі утворюються мікроудари, які викликають вилащування частинок матеріалу, а циркуляція абразиву забезпечує їх своєчасне видалення та подачу нових частинок.

Швидкість і якість обробки залежать від типу матеріалу, параметрів коливань, розміру абразивних зерен і сили притискання. Найкраще ця технологія підходить для крихких і твердих матеріалів, таких як кераміка, скло, кварц, германій тощо.

Обробка може здійснюватися різними способами подачі інструмента або заготовки — лінійно, поперечно або обертально, що дозволяє реалізовувати широкий спектр кінематичних схем.

Ультразвукові верстати поділяються на мобільні пристрої для локальних задач і великі стаціонарні установки. Типова конструкція включає генератор коливань, перетворювач, механізми подачі, абразивну систему та пристрої контролю параметрів процесу.

Особливої уваги заслуговує застосування ультразвуку для інтенсифікації традиційних процесів різання. Додавання коливань до інструмента, наприклад при нарізанні різьби, дозволяє значно зменшити зусилля, знизити знос інструменту та підвищити якість обробленої поверхні.

Сучасні технології також передбачають поєднання ультразвуку з іншими методами, такими як електрохімічна обробка. Таке комбінування дозволяє суттєво підвищити продуктивність, знизити витрати енергії й матеріалів, а також покращити якість поверхневого шару. Наприклад, замість дорогих абразивів можна використовувати доступніші — без втрати якості обробки.

Завдяки дії ультразвуку в обробленому шарі утворюються стискальні залишкові напруги, що підвищують зносостійкість і довговічність інструментів і форм. Це особливо важливо при виготовленні штампів, матриць, прес-форм та інших відповідальних деталей.

Променеві методи розмірної обробки

До променевих методів розмірної обробки відносять технології, що передбачають видалення матеріалу шляхом локального нагрівання до температури плавлення або випаровування. Це досягається впливом концентрованих потоків енергії або високоенергетичних струменів з надзвичайно великою питомою потужністю — у межах від мільйона до мільярда ват на квадратний сантиметр. Найпоширенішими серед них є електронно-променева та лазерна обробка. Основна відмінність таких методів від зварювання або паяння полягає у тривалості впливу: при розмірній обробці використовуються короткочасні імпульси, що дозволяють з високою точністю впливати на мікрооб'єми матеріалу.

Під час обробки короткі імпульси діють саме в той момент, коли матеріал плавиться або випаровується, тоді як процес видалення продуктів плавлення відбувається вже після припинення дії променя. Можливість

регулювання пауз між імпульсами дозволяє контролювати не лише ефективність знімання матеріалу, а й якість обробленої поверхні.

Електронно-променева обробка (ЕПО) полягає у використанні спрямованого потоку електронів, що сконцентровано подається на поверхню заготовки. При зіткненні з матеріалом енергія електронів перетворюється на тепло, викликаючи локальне випаровування або сублімацію речовини. Найвища ефективність досягається в умовах глибокого вакууму, що дозволяє електронам розвивати високі швидкості, а також забезпечує точне фокусування променя.

Типова установка для ЕПО (рис.16) включає електронну гармату, вакуумну камеру, систему відкачування повітря, джерела живлення, пристрої для точного позиціонування заготовки, а також систему керування та спостереження за процесом. Технічні параметри, як-от сила струму, напруга прискорення, частота та тривалість імпульсів, а також швидкість переміщення променя, дозволяють варіювати режими обробки під конкретні задачі.

Матеріал може видалятися різними способами — за рахунок теплової дії, утворення мікрокрапель, струменевого випаровування чи навіть вибухоподібного викиду речовини. Найефективнішим є режим, коли нагрів перевищує здатність матеріалу розсіювати тепло, що викликає теплові вибухи та формує направлені хвилі, які сприяють плавленню.

Цей метод однаково ефективний для обробки як провідних, так і діелектричних матеріалів. Але найкращі результати досягаються при роботі з електропровідними заготівками, оскільки це дозволяє відводити надлишковий заряд. В установках типу ЕЛУРО-П обробка виконується багаторазовими імпульсами з високою частотою і щільністю енергії, що дає змогу створювати точні отвори малого діаметра або вузькі канавки.

До переваг ЕПО належать: висока точність і продуктивність, можливість обробки складнодоступних ділянок і мініатюрних елементів, а також відсутність хімічної взаємодії з матеріалом. Водночас недоліками є необхідність створення вакууму, складність обладнання, його вартість та вимоги до безпеки через утворення рентгенівського випромінювання.

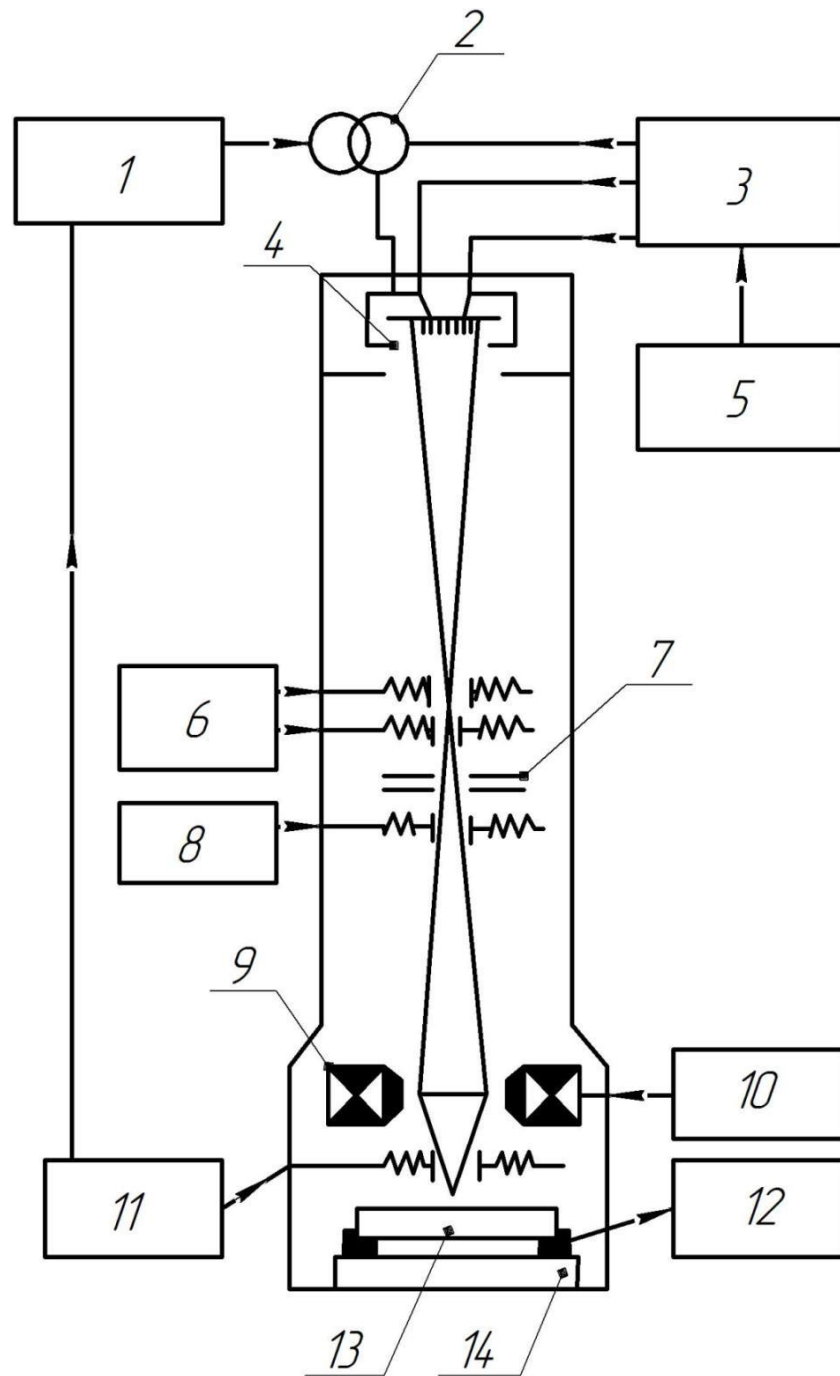


Рис. 16 Схема електронно-променевої обробки:

1 – генератор імпульсів; 2 – імпульсний трансформатор;
 3 – джерело напруги, збудження і накали; 4 – катод; 5 – джерело високої напруги; 6 – електромагнітне юстирування;
 7 – діафрагма; 8 – коректор зображення; 9 – магнітна лінза; 10 – джерело живлення лінзи; 11 – контрольний контур; 12 – катодний осцилоскоп; 13 – оброблювана деталь; 14 – робочий стіл

Лазерна обробка. Лазерні технології стали одним із ключових інструментів сучасної обробної промисловості, символом високого технологічного рівня. Їх поява у другій половині XX століття стала справжнім проривом, адже лазер — це джерело спрямованого когерентного світла з високою інтенсивністю. Його випромінювання має однакову довжину хвилі, напрямок, поляризацію та фазу, що забезпечує максимальну концентрацію енергії в малій площі.

Перші серійні лазери з'явилися вже у 1962 році, після чого було розроблено багато їх різновидів — від надкомпактних до гігантських установок. Наприклад, у США функціонує лазерна установка довжиною понад 130 метрів, здатна генерувати імпульси колосальної потужності.

Основна перевага лазерної обробки — надзвичайно висока енергія в малому об'ємі простору. Вона дозволяє швидко нагрівати та плавити матеріал на мікрорівні, при цьому не впливаючи на решту заготовки. Це забезпечує високу точність і мінімальні деформації. Завдяки цій якості лазер ідеально підходить для інтеграції в автоматизовані виробничі лінії.

Сфера застосування лазерів постійно розширюється. З 1970-х років вони використовуються в металообробці для зварювання, різання, нанесення гравіювання, гартування та наплавлення. Сьогодні в промисловості функціонують десятки тисяч лазерних установок, що є показником широкої адаптації технології. Окрім промисловості, лазерні методи стали основою в телекомунікаціях, медицині, біотехнологіях, оптичній обробці інформації, мікроелектроніці та навіть екологічному моніторингу. Їх застосування сприяє підвищенню точності, зниженню витрат і відкриває нові можливості у сфері мікро- і нанотехнологій.

Причина стрімкого розвитку лазерної техніки полягає в її гнучкості та високій ефективності, які забезпечують впровадження у найсучасніші виробничі процеси. У найближчі роки очікується ще більша популяризація лазерної обробки в машинобудуванні, телекомунікаціях, медицині та науці.



Рис. 17 Зовнішній вид лазерної установки

Твердотільні

лазери

Це прилади, в яких активною середовищем є люмінесцентні тверді матеріали — зазвичай діелектричні кристали або скло, активовані іонами рідкоземельних металів або заліза. Вони працюють за три- чи чотирирівневою схемою збудження і можуть функціонувати в імпульсному, безперервному або квазібезперервному режимі.

Напівпровідникові

лазери

Хоча це також тверді середовища, їх виокремлюють через інший механізм збудження: інжекцію носіїв через р–n або гетеропереходи, електричний розряд у сильному полі або бомбардування електронами. Енергетичні переходи відбуваються між зонами, а не дискретними рівнями. Напівпровідникові лазери — наймасовіші у побуті, активно використовуються в телекомунікаціях, медицині, спектроскопії та як джерела для інших лазерів.

Ключовий елемент будь-якого твердотільного лазера (дискового, світлопровідного, стрижневого) — діодна система збудження, що перетворює електрику в світлову енергію. Використання лазерних діодів напряду для обробки матеріалів здешевлює систему та зменшує її габарити. За останні роки значно покращилися технології виробництва таких діодів — як у структурі, так і в охолодженні, упаковці й оптиці. Сучасні DDL-діоди з потужністю в кіловати стали популярним рішенням для багатьох застосувань.

У простих діодних лазерах випромінювання виходить з дуже малої робочої зони й подається через мікросцену — їх часто використовують у CD/DVD-програвачах або для накачування інших лазерів. У сучасних системах діоди об'єднують у лінійки або матриці для підвищення вихідної потужності. Це дозволяє ефективно фокусувати випромінювання за допомогою традиційної оптики або передавати його через світлопроводи.

Лазери

на

барвниках

У цих лазерах активне середовище — флюоресцентний розчин органічних барвників. Енергетичні переходи здійснюються між підрівнями першого збудженого й основного стану. Працюють як у імпульсному, так і безперервному режимі. Головна перевага — можливість зміни довжини хвилі в широкому діапазоні, що робить їх незамінними у спектроскопії.

Газові

лазери

Закладено на середовищі у формі газової суміші або пари. Вони відрізняються високим рівнем монохроматичності, потужністю та спрямованістю променя, доступні у безперервному й імпульсному режимах. Різновиди: газорозрядні, оптично збуджені, заряджені частинками (зокрема ядерні), газодинамічні та хімічні. За існуючими переходами розрізняють атомні, молекулярні та ексімерні лазери.

- *Газодинамічні* лазери застосовують адіабатичне розширення суміші (наприклад, $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$), що створює інверсію населеності на коливально-обертальних рівнях.

- *Ексимерні* лазери працюють за рахунок димірних молекул, які утворюються під дією електронного збудження й забезпечують високу потужність і вузький спектр хвиль із можливістю тонкого налаштування.

- *Хімічні* лазери отримують енергію з хімічних реакцій газових компонентів, забезпечують широкий спектр випромінювання, особливо в ближньому ІЧ-діапазоні, і здатні працювати як імпульсно, так і безперервно.

Лазери на вільних електронах

Активним середовищем є прискорений до релятивістських швидкостей потік електронів, що рухаються в електромагнітному полі. Частоту випромінювання можна плавно змінювати. До цієї групи належать убітрони, скаттрони, циклотронні резонантори, строфотрони й фліматрони. Такі лазери генерують величезну кількість фотонів — до 10^8 від одного електрона, і їх поведінку описують класичні закони електродинаміки.

Волоконні лазери

Хоча технічно це різновид твердотільних лазерів, багато фахівців вважають їх окремим класом. Основні переваги:

1. Тривалий ресурс роботи — понад 100 000 годин при мінімальних витратах.
2. Простота запуску і налаштування.
3. Універсальність: джерело світла не прив'язане до конкретного виду обробки і легко може бути адаптоване під нові завдання.
4. Можливість поступового нарощування потужності за рахунок додавання блоків збудження.
5. Зручність інтеграції у роботизовані системи через передавання випромінювання через оптичний кабель.
6. Не потребує висококваліфікованих операторів: достатньо базового навчання до тижня.

Незважаючи на вищу вартість порівняно з CO₂-лазерами, волоконні системи вигідні у монтажі та обслуговуванні, а також є оптимальними при обробці складно доступних зон.

Існують також перспективні напрямки розвитку: **рентгенівські** чи **гамма-лазери**, що наразі вивчаються.

Види лазерної обробки

Лазерне різання металів

Цей метод дозволяє точно обробляти металеві листи або деталі зі складною геометрією, які важко обробляти іншими способами. Універсальність вражає: за рівнем потужності, швидкістю підготовки та якістю отриманих країв лазер значно перевершує методи плазмового або гідроабразивного різання.

Системи побудовані за модулем «координатний стіл + лазерна голівка», керовані комп'ютером. Для різних матеріалів підбираються тип джерела випромінювання (CO₂, твердотільні моделі), спосіб подачі технологічного газу та параметри потоку (кисень, інертні гази).

Види лазерного різання:

- **Лазерно-кисневе**, де використовується кисень для реакції окислення і поглиблення різь.

- **Інертне різання**, коли застосовується азот чи інші гази для охолодження і запобігання окисленню.

- **Сублімаційне (випарне) різання** — матеріал випаровується без плавлення.

- **Терморозколювання**, особливо для скла та крихких матеріалів.

Режими: **імпульсний** (наприклад, Al_2O_3 -лазери з Q-режимом або CO_2 -лазери), де кожен імпульс прогріває мінімальну глибину — і **безперервний** CO_2 -режим з газовою подачею, який забезпечує швидке очищення зони різання та високу точність.

Лазерне

зварювання

Приблизно 11 % сучасних твердотільних і CO_2 -лазерів використовується у зварювальних системах. Вони застосовуються від мікрозварювання в медицині до зварювання кузовів автомобілів, садової техніки, холодильного обладнання та меблів.

Маркування

й

гравіювання

Лише цей сегмент приносить майже 15 % доходу ринку лазерів. Це один із найрозвиненіших аспектів: зручність, безпека, гарантійні та сервісні рішення, глибоко розроблене ПЗ.

Мікро-

і

нанообробка

Сфери з масштабом обробки до мікрон і нанометрів. Переважають мікросвердління, створення мікроотворів, каліброваних фільтрів для нанодіапазону, тонкоплівкових резисторів, катетерів тощо. Популярність цієї сфери зростає завдяки розвитку медичної техніки та мікроелектроніки.

Лазерне

устаткування

Сучасні системи включають роботизовані маніпулятори та флекс-оптичні волокна. Залежно від потужності та типу лазера, визначається призначення (метал, сплави тощо). Основні компоненти: джерело лазера з охолодженням, координатний стіл, УП, система газо- та вентиляції.

Когда випромінювання має велику потужність, використовуються системи охолодження на фреоні чи воді, а джерела живлення — трансформатори або імпульсні схеми, залежно від потреб у надійності чи компактності.

Координатні столи переважно побудовані за порталною схемою — стіл або промінь рухається по одній або двох координатах, залежно від типу лазера (наприклад, Nd:YAG). Всі процеси автоматизовані й керуються ПЗ для CAD-файлів, налаштування режимів, під'єднання всіх компонентів та інтеграції в мережу.

Розвиток лазерних технологій

Сучасні лазерні технології перебувають лише на початковому етапі свого розвитку й активно вдосконалюються завдяки появі нових економічних і високопотужних джерел випромінювання, прогресивних волоконно-оптичних систем передачі енергії, удосконалених конструкцій для подачі

променя до об'єкта обробки та інших інновацій. Експерти визначають кілька ключових напрямів у розвитку лазерної обробки:

- розширення спектру матеріалів, придатних до обробки, включаючи спеціальні сплави та неметалеві матеріали, що функціонують в екстремальних умовах, зокрема в агресивних середовищах або під впливом радіації;
- обробка матеріалів із ширшим діапазоном товщини;
- покращення технологічних характеристик якості оброблених поверхонь та виготовлених виробів;
- виведення нових технологічних процесів на рівень серійного індустріального застосування.

Особливо інтенсивно розвиваються такі напрями, як селективне лазерне спікання металевих та керамічних порошків, лазерне формування й згинання пластикових деталей, поєднання лазера з іншими методами (електродуговими, ультразвуковими тощо), а також дистанційне зварювання і різання великогабаритних конструкцій у галузях енергетики, будівництва й суднобудування. Паралельно досліджуються новітні процеси, зокрема лазерна перфорація за допомогою ультракоротких імпульсів тривалістю пікосекунди і фемтосекунди, а також підводне зварювання та різання.

Удосконалення як традиційних, так і новітніх методів супроводжується глибокими дослідженнями фізичних процесів взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом, розробкою нових типів промислових лазерів, інтелектуальних систем керування, засобів діагностики та моніторингу. Це здійснюється не лише у наукових установах, а й безпосередньо на виробництві.

Зокрема, розвиток фізики взаємодії випромінювання високої потужності з матеріалами дозволив освоїти лазерну обробку великої товщини. Удосконалення технологій генерації надкоротких імпульсів призвело до появи процесів надточного свердління та лазерної абляції без термічного впливу — за рахунок прямого розриву молекулярних зв'язків.

Сучасні лазери постійно демонструють покращені характеристики: зростає середня потужність (до 10–100 кВт), підвищується ефективність перетворення енергії (до 20–50 %), покращується якість променя, розширюється спектр довжин хвиль (включно з короткохвильовим УФ-випромінюванням), досягається ультракоротка тривалість імпульсів (до 10^{-13} – 10^{-15} с), а самі джерела стають компактнішими.

Особливого поширення набувають гнучкі оптоволоконні системи доставки випромінювання до робочої зони.

Як і всі високотехнологічні сфери, лазерні технології вимагають значних фінансових вкладень. Світові лідери в галузі інвестують у розвиток лазерної техніки до 8 % свого річного прибутку. При цьому частка державного фінансування в окремих країнах досягає 40 %, зокрема через створення національних і міжнародних центрів лазерних технологій.

Плазмова обробка

Плазмова технологія передбачає використання низькотемпературної плазми, яка створюється за допомогою дугових або високочастотних плазмотронів. Такий тип обробки впливає на форму, розміри, структуру або поверхню об'єкта і охоплює різання, наплавлення, нанесення покриттів, зварювання, а також руйнування твердих матеріалів, наприклад, у гірничій справі.

Особливість методу — це можливість локалізованої дії з високою температурою (до 10 000 K) і значною питомою потужністю. Плазма діє на матеріал як теплово, так і механічно, завдяки руху іонізованих частинок із великою швидкістю.

Розділове різання металів відбувається за допомогою стисненої плазмової дуги, яка утворюється між катодом пальника та оброблюваним анодом (металом). Стабілізація дуги досягається спеціальними соплами й подачею плазмоутворюючих газів — аргону, водню, азоту, аміаку або їх сумішей. Якщо використовується кисень або повітря, він бере участь в окисленні металу, що підвищує енергетичну ефективність різання.

Метод застосовується для обробки матеріалів, які не піддаються кисневому різанню, наприклад нержавіючої сталі, алюмінію, міді тощо. Його ефективність дозволяє використовувати плазмове різання в безперервних поточних виробництвах. Потужність промислових установок може сягати 150 кВт.

Для обробки діелектриків та органічних матеріалів використовується плазмовий струмінь, що формується між електродами всередині пальника. Нанесення покриттів виконується з метою захисту деталей від високих температур, корозії або механічного зношування. Твердий матеріал (порошок або дріт) плавиться в струмені й осідає на поверхні з високою швидкістю.

Плазмові покриття характеризуються низькою теплопровідністю й стійкістю до термічних ударів. Потужність установок для напылення становить 5–30 кВт, а продуктивність — до 10 кг/год. Введення матеріалів у плазмовий струмінь дозволяє отримувати сферичні частинки для порошкової металургії з діаметром від кількох мікрометрів до 1 мм або наночастинки — шляхом випаровування та конденсації.

Плазмова зварка, завдяки високій температурі дуги, дозволяє виконувати з'єднання навіть товстостінних деталей (до 15 мм) без попередньої обробки крайок. Дуга з невеликою потужністю (до 40 А) ефективна для тонколистової зварки у виробництві теплообмінників, мембран, медичних пристроїв із танталу, титану, молібдену, алюмінію.

Плазмотрон — це спеціальний газорозрядний пристрій для генерації плазми з температурою понад 10 000 K. Він складається з електродів, камери й вузла подачі плазмоутворюючого газу. Різновиди плазмотронів включають дугові та високочастотні пристрої, моделі з осьовим, коаксіальним або тороїдальним розташуванням електродів. Вони застосовуються не лише у промисловості, а й у науці та авіаційно-космічних технологіях, зокрема як плазмові двигуни.

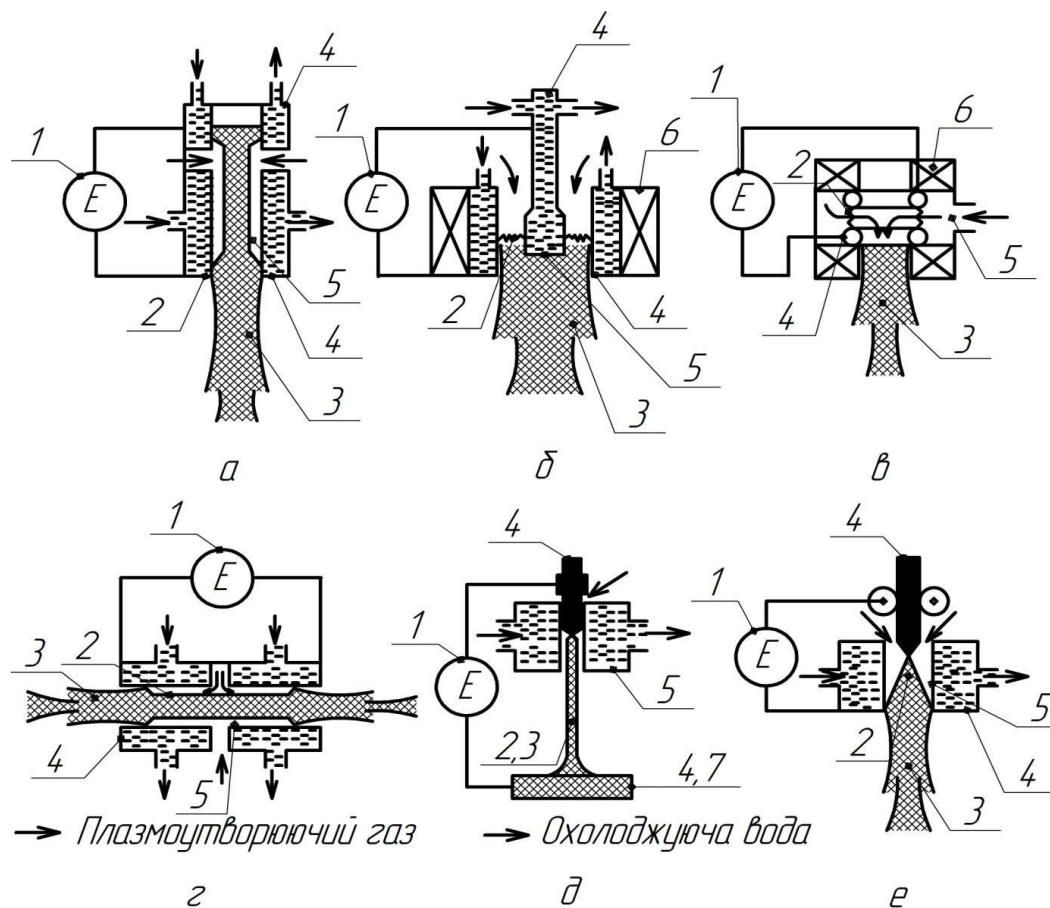


Рис. 18. Схема дугових плазмотронів:

а – осьовий; б – коаксіальний; в – з тороїдальними електродами; г – двостороннього «витікання»; д – із зовнішньою плазмовою дугою; е – з електродами, що витрачаються (ерозійний);

1 – джерело електроживлення; 2 – розряд; 3 – плазмовий струмінь; 4 – електрод; 5 – розрядна камера; 6 – соленоїд; 7 – оброблюване тіло

Отвір у розрядній камері, через який виходить сформована плазма, називається соплом плазмотрона. В окремих варіантах дугових пристроїв його роль може виконувати тороїдальний або кільцевий анод. Загалом дугові плазмотрони поділяють на дві основні категорії: ті, що формують зовнішню плазмову дугу (власне плазмову дугу), та ті, що генерують плазмовий струмінь.

У плазмотронах першого типу дуга горить між катодом пристрою та об'єктом обробки, який виступає анодом. У таких конструкціях можливе використання лише катода або також допоміжного анода — з короткочасним або постійним малопотужним розрядом для запалювання основної дуги. У другому типі плазмотрона дуга формується всередині пристрою між катодом і анодом, а потік плазми виходить назовні у вигляді сфокусованого струменя.

Стабільність дуги у дугових плазмотронах досягається за допомогою зовнішнього магнітного поля, потоків газу та впливу геометрії розрядної камери і сопла. Один з ефективних методів стабілізації — створення сильного перпендикулярного магнітного поля (за допомогою соленоїда), що змушує струм дуги обертатися навколо анода, забезпечуючи рівномірний розподіл анодних і катодних плям. Це знижує температуру електродів і запобігає їхній ерозії або плавленню, навіть при використанні тугоплавких матеріалів.

Серед методів газової стабілізації та охолодження важливе місце займає ефект закручування: газ подається по спіральних каналах, утворюючи вихор, що обтікає плазмову дугу, утворюючи шар холоднішого газу поблизу стінок. Це захищає камеру від перегріву. Якщо необхідність у сильному стисненні відсутня (наприклад, при плавленні металів), газ спрямовується паралельно дуговому стовпу без завихрення. Часто стабілізуючий газ виконує і роль плазмоутворювача. Також можливе використання водяного охолодження — із закручуванням або без нього.

Плазма, яка формується в дугових плазмотронах, завжди містить частки електродного матеріалу, що є наслідком ерозійного зносу. У певних випадках це навіть бажано — тоді використовуються витратні електроди. Якщо ж навпаки, потрібна «чиста» плазма, то електроди виготовляють із тугоплавких металів (наприклад, вольфраму, молібдену) або охолоджують водою для подовження терміну служби. Найменш забруднена плазма генерується височастотними плазмотронами.

Застосування різних типів плазмотронів:

- Плазмотрони з плазмовим струменем — для термічної обробки металів, нанесення покриттів, одержання сферичних порошків, у плазмохімічних процесах;

- Плазмотрони із зовнішньою дугою — для обробки провідних матеріалів;

- Плазмотрони з витратними електродами — у середовищах, агресивних до конструкційних матеріалів, для створення металевої чи вуглецевої плазми (наприклад, у процесі карботермічного відновлення руд).

Типові технічні параметри дугових плазмотронів:

- Потужність: 10^2 – 10^7 Вт;
- Температура струменя на виході із сопла: 3000–25000 К;
- Швидкість плазми: 1 – 10^4 м/с;
- ККД: 50–90 %;
- Тривалість експлуатації (до зносу електродів): кілька сотень годин;
- Плазмоутворювальні середовища: повітря, азот, аргон, водень, аміак, кисень, водяна пара, рідкі та тверді вуглеводні, метали, полімери.

Високочастотні плазмотрони

До складу високочастотного плазмотрона входять індуктор або електроди, які з'єднані з джерелом високочастотної енергії, камера для розряду і вузол подачі плазмоутворювальної речовини. Існують такі типи високочастотних плазмотронів:

- індукційні;
- ємнісні;
- факельні;
- на основі коронного розряду (включаючи високочастотну корону);
- надвисокочастотні (НВЧ).

Найбільше промислове застосування отримали **індукційні високочастотні плазмотрони (рис.19)**, в яких нагрівання газу досягається за рахунок індукованих вихрових струмів. Ці пристрої не мають електродів, тому їх активно використовують для роботи з агресивними середовищами (кисень, хлор, пари фторидів тощо), а також у випадках, коли потрібна максимально чиста плазма.

За допомогою індукційних плазмотронів синтезують високочисті та дисперсні порошкові матеріали (нітриди, бори́ди, карбіди тощо). У деяких випадках зона генерації плазми в таких пристроях суміщається з реакційною зоною, що спрощує реалізацію плазмохімічних процесів.

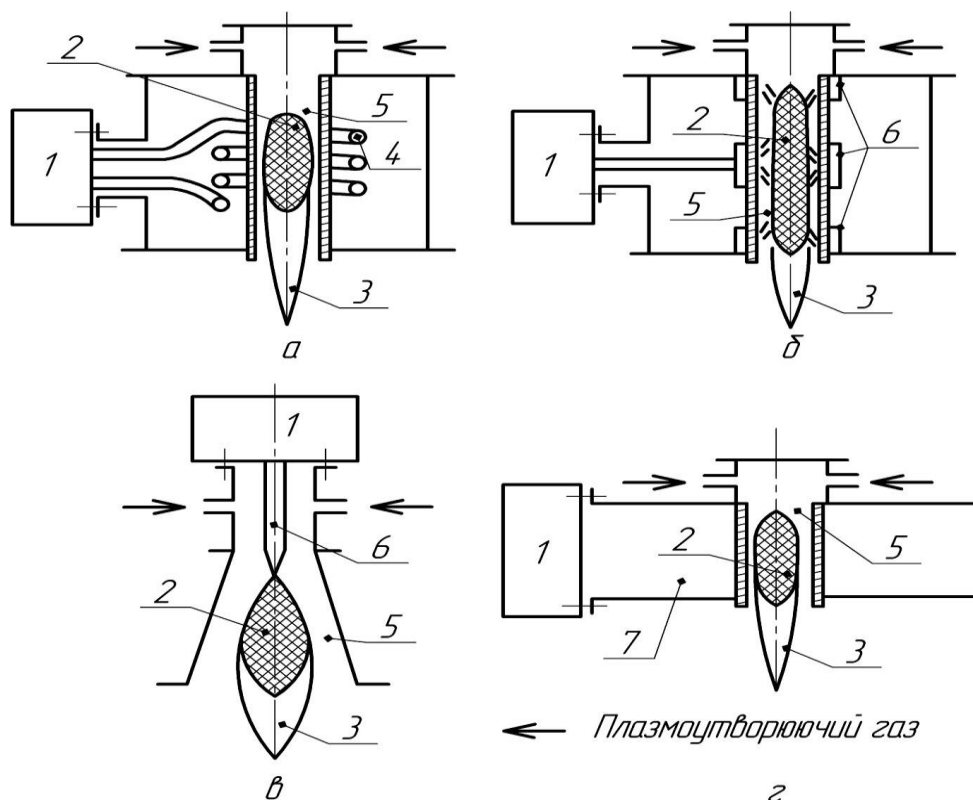


Рис. 19 Схеми високочастотних плазмотронів:
 а – індукційний; б – ємнісний; в – факельний;
 г – надвисокочастотний; 1 – джерело електроживлення;
 2 – розряд; 3 – плазмовий струмінь; 4 – індуктор; 5 – розрядна камера;
 6 – електрод; 7 – хвилевід

Сучасні плазмотрони можуть досягати потужності до 1 мегавата, при цьому температура в центральній зоні розрядної камери, а також на початку плазмового струменя, сягає приблизно 10 000 К. Швидкість виходу плазми змінюється в межах від нуля до 1000 м/с. Робочий діапазон частот — від десятків тисяч герц до кількох десятків мегагерц. Коефіцієнт корисної дії в промислових умовах становить близько 50–80 %, а термін експлуатації — до 3000 годин. У випадку надвисокочастотних плазмотронів (НВЧ) частоти досягають десятків тисяч мегагерц, і в таких установках використовуються спеціальні генератори, наприклад магнетрони.

Більшість типів високочастотних плазмотронів, за винятком індукційних, найчастіше застосовуються у лабораторних дослідженнях. У подібних пристроях

часто реалізується принцип закручування газового потоку, як і в дугових моделях, що дозволяє ізолювати розрядну зону від стінок камери. Завдяки цьому корпус плазмотрона можна виготовляти з термочутливих матеріалів, таких як звичайне чи органічне скло.

Запуск плазмотрона (ініціювання розряду) здійснюється кількома способами: механічним замиканням електродів, запалюванням допоміжної дуги, високовольтним пробоем, інжекцією готової плазми у робочу камеру тощо.

Серед ключових напрямів розвитку плазмових систем — створення спеціалізованих пристроїв і реакторів для потреб металургії та хімічної промисловості, підвищення одиничної потужності плазмотронів до 1–10 МВт, збільшення їхнього ресурсу та надійності.

Плазмові пальники та їх особливості

Плазмовий пальник — це компактний ручний дуговий плазмотрон, призначений для виконання широкого спектру технологічних операцій: нанесення покриттів, різання, зварювання, наплавлення та інших методів термічної обробки. Залежно від принципу дії розрізняють два типи таких пальників: перші працюють на основі плазмової дуги, другі — формують плазмовий струмінь.

У механізованих системах обробки плазмовий пальник встановлюється на спеціалізовані установки. Якщо йдеться про нанесення покриттів або наплавлення, до них додають пристрої подачі матеріалу, який подається у формі дроту або порошку. Такі комплекси називають **плазмовими головками**.

Максимальна потужність плазмового пальника може досягати 100 кВт. Як плазмоутворювальні гази зазвичай використовують аргону, гелію, азоту, аміаку або повітря, іноді в різноманітних комбінаціях.

Розряд у пальнику запускається одним із кількох методів: змиканням електродів (у випадку струменевого розряду — між катодом і анодом, при дуговому — між катодом і поверхнею матеріалу), або іншими способами, що дозволяють створити стабільний електричний розряд у робочому середовищі.

Тема 6. Біоматеріали та їхнє застосування у машинобудуванні.

У традиційному розумінні біоматеріали асоціюються переважно з медициною — імплантатами, протезами, тканинною інженерією. Однак сучасні технології розширили межі використання біоматеріалів і на інші галузі, зокрема **машинобудування**, де вони починають відігравати помітну роль. Це зумовлено потребами в екологічно безпечних, біорозкладних або біосумісних матеріалах, які можуть замінити синтетичні аналоги у виробництві машин, механізмів та упаковки.

Біоматеріали — це матеріали природного або синтетичного походження, які можуть взаємодіяти з біологічними системами. У контексті машинобудування це матеріали, що:

- виготовлені з біологічних ресурсів;
- біосумісні або біорозкладні;
- використовуються для зменшення шкідливого впливу на довкілля.

Класифікація біоматеріалів:

- **Природні полімери:** целюлоза, крохмаль, хітин, лігнін;
- **Біорозкладні синтетичні полімери:** PLA (полілактид), PHA, PBS;
- **Біокераміка:** гідроксіапатит (в машинобудуванні використовується рідко);
- **Біометали та біосплави:** магнієві сплави, титан з біосумісними покриттями;
- **Композити на основі біоматеріалів** (наприклад, з волокнами льону або конопель).

Мотивація використання біоматеріалів у машинобудуванні

Екологічні фактори

- Зменшення залежності від нафтохімії;
- Біорозкладність — менше забруднення навколишнього середовища;
- Зниження викидів CO₂ при виробництві.

Економічні та соціальні фактори

- Використання аграрної сировини як джерела матеріалів;
- Локалізація виробництва;
- Створення нових ринкових ніш.

Технічні причини

- Легка вага біоматеріалів;
- Хороші демпфувальні властивості;
- Можливість виготовлення складних форм методом 3D-друку.

Приклади застосування біоматеріалів у машинобудуванні:

Автомобілебудування

- Використання PLA, PHA для виготовлення елементів салону (ручки, панелі);
- Волокна коноплі/льону в армованих панелях;

- Біо-композити в обшивці дверей, сидінь;
- Біо-змащувальні матеріали на основі рослинних олій.

Виробництво упаковки і контейнерів

- Біорозкладні корпуси для електроніки машин;
- Біообгортки для деталей.

3D-друк деталей з біополімерів

- PLA — один із основних матеріалів для 3D-друку деталей у прототипуванні;
- Біоматеріали з армуванням для легких, але міцних елементів.

Прототипування та моделювання

- Виготовлення тестових моделей або деталей з дешевих біополімерів;
- Швидке виготовлення складних форм без шкідливих відходів.

Властивості біоматеріалів, що важливі для машинобудування

- **Механічна міцність:** деякі біоматеріали ще поступаються металам, але вже активно конкурують із пластиками;
- **Термічна стійкість:** біоматеріали, як правило, мають нижчу температуру плавлення;
- **Стійкість до вологи та УФ-випромінювання:** обмежує сферу застосування без додаткових покриттів;
- **Біосумісність і безпека для здоров'я працівників;**
- **Можливість вторинної переробки.**

Труднощі впровадження біоматеріалів у машинобудування

- **Вища вартість виробництва** біоматеріалів у порівнянні з традиційними;
- **Обмеження по міцності, стійкості до хімії, зносу;**
- **Недостатня стандартизація** і відсутність усталених технологій масового виробництва;
- **Проблеми з утилізацією та вторинною переробкою деяких біоматеріалів.**

Перспективи розвитку

- Розвиток біокомпозитів на основі української агросировини (льон, коноплі);
- Застосування в дронах, легкому транспорті, сільськогосподарській техніці;
- Створення замкнених екосистем машинобудування з повним циклом "виробництво → використання → утилізація";
- Поширення 3D-друку з біоматеріалів;
- Біоадаптивні матеріали — що змінюють властивості залежно від умов середовища.

Біоматеріали поступово входять у машинобудування як відповідь на виклики сталого розвитку, екологічної безпеки та інноваційного виробництва. Хоча існують ще низка технічних і економічних бар'єрів, проте з розвитком

технологій їх застосування буде зростати, особливо в галузях з високими екологічними стандартами.

Тема 7. Металеві сплави з ефектом пам'яті форми.

Протягом останніх десятиліть фізичне матеріалознавство зазнало суттєвих трансформацій, що відобразились у нових підходах до класифікації матеріалів, орієнтованих на функціональність та область застосування. Якщо простежити динаміку розвитку цієї галузі, можна виокремити кілька важливих етапів: від матеріалів, що виконують винятково конструктивні функції, до таких, що здатні реагувати на зовнішні чинники.

Конструкційні матеріали характеризуються насамперед механічною міцністю і здатністю витримувати навантаження, тому широко застосовуються в елементах інженерних конструкцій. Натомість **функціональні матеріали** призначені для розв'язання специфічних інженерних задач завдяки своїм особливим електричним, термічним, оптичним або магнітним властивостям. **Мультифункціональні матеріали** поєднують кілька фізичних або хімічних властивостей, що відкриває можливість їх застосування у складних та адаптивних системах.

Поступово сформувалося нове покоління матеріалів — **розумні (smart) матеріали**, які здатні самостійно змінювати стан або функцію під впливом зовнішнього середовища.

Мартенситні перетворення та ефект пам'яті форми

Одним із прикладів функціональних матеріалів є **сплави з ефектом пам'яті форми (ЕПФ)**, які набули широкого застосування з 1960-х років. Їх унікальні властивості, такі як здатність відновлювати первинну форму після деформації, надпружність і висока здатність до поглинання енергії, засновані на явищі **мартенситного перетворення**.

Фізичну суть цього ефекту відкрили українські вчені — академік Г. В. Курдюмов та професор Л. Г. Хандрос, які описали явище **термопружної рівноваги фаз**. Воно полягає у поступовому рості або зникненні кристалів мартенситу при зміні температури або прикладеного навантаження. Така рівновага виникає за рахунок взаємодії хімічної рушійної сили перетворення та протидіючої пружної енергії.

Матеріали з таким механізмом проявляють низку ефектів:

- **ефект прямої та оберненої пам'яті форми** — здатність відновлювати деформовану форму при нагріванні;
- **надпружність** — велика пружна деформація (до 8–10%) із повним зворотнім відновленням форми;
- **висока демпфуюча здатність** — здатність ефективно гасити механічні коливання.

Такі ефекти виникають у сплавах типу Ni-Ti, Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al та інших.

Світова практика застосування та потенціал в Україні

Металеві сплави з ЕПФ вже давно використовуються у США, Японії, Німеччині та інших країнах — зокрема в авіабудуванні, приладобудуванні, медицині та оборонній техніці. Виробництво таких матеріалів сягає декількох тонн щороку. У той час як в Україні маємо вагому наукову базу (зокрема в Інституті металофізики НАН України), практична реалізація стримується відсутністю промислового виробництва і технологічної інфраструктури.

Приклади потенційного застосування в Україні:

- муфти для авіаційних трубопроводів;
- елементи для запуску ламп;
- сенсори і приводи для побутової техніки;
- протиаварійні пристрої для шахт.

Для впровадження ЕПФ необхідне створення спеціалізованого обладнання — наприклад, індукційних печей з можливістю точної корекції складу сплавів. Важливо пам'ятати, що навіть незначні відхилення у складі сплаву (0,1%) можуть суттєво змінити його властивості, тому потрібен високоточний технологічний контроль.

Сплави з ефектом пам'яті форми володіють унікальними властивостями завдяки зворотним мартенситним перетворенням. Ключовим фактором, що забезпечує прояв ефектів пам'яті форми, надпружності та надпластичності, є наявність термопружної рівноваги між матрицею та мартенситовою фазою (так званий ефект Курдюмова). За наявності такої рівноваги в сплаві формуються самоадаптовані групи мартенситних кристалів із високою рухливістю міжфазних меж.

Іntenсивно накопичуються дані про фазові діаграми багатокомпонентних сплавів (AB, ABC, A₂(BC)), включаючи стабільні та метастабільні фази, що впливають на функціональні властивості матеріалів. Завдяки цьому з'явилася можливість регулювати ключові характеристики:

- литі й мікроструктурні властивості після кристалізації;
- фізико-механічні властивості вихідної фази та її здатність до термомеханічної обробки;
- параметри мартенситних перетворень (температурні пороги, гістерезис) і, відповідно, цільові функціональні властивості.

Наприклад, встановлено, що незначні добавки третього або четвертого елемента впливають на характеристики перетворення майже адитивно, що дає змогу точно налаштувати кінцеві властивості сплаву під специфічні вимоги споживача:

- для досягнення надпластичних властивостей при кімнатній температурі до складу TiNi додають невеликі концентрації Co, щоб розділити пряме та зворотне перетворення ($B2 \leftrightarrow R$ і $R \leftrightarrow B19'$);
- для зрушення температурної межі перетворення ближче до 200 °C потрібно додати понад 10 % Hf, який підвищує початкову температуру мартенситу, хоча це вимагає спеціальної обробки через крихкість сплаву;

- для забезпечення стабільної температури перетворення при варіації складу найбільш доцільними є легування Cu або Si, причому Cu має перевагу через свою пластичність і технологічну надійність.

Інтерметаліди на основі цирконію з ефектом пам'яті форми

Відомо, що інтерметалічні з'єднання типу B2, які утворюються на основі цирконію, демонструють зворотні мартенситні перетворення в широкому температурному діапазоні. Зокрема, високотемпературні фази типу B2 у системах ZrPd та ZrRh виявляють поведінку, схожу на NiTi: при охолодженні в них відбуваються мартенситні перетворення аналогічного типу.

Результати досліджень структурних, механічних і магнітних властивостей сплавів ZrCo, ZrFe, ZrNi, ZrCu, а також твердих розчинів ZrCo(1-x)Ni_x, дозволили встановити температурні межі перетворень та детально охарактеризувати поведінку матеріалів при зміні фазового стану. У сплавах ZrRh і ZrIr було виявлено повне відновлення форми, а кристалічна структура мартенситу ідентифікована як B19'. Подібні результати отримані й для системи ZrCu, де термоцикування і легування значно покращують функціональні характеристики, включаючи зменшення гістерезису та досягнення майже 100% відновлення форми.

Сплави типу Zr₂CuNi і Zr₂CuCo також демонструють високу оберненість ефекту пам'яті форми — зокрема, у Zr₂CuNi ступінь відновлення наближається до 90%. Термостабільність петлі гістерезису підтверджує потенціал цирконієвих інтерметалідів для високотемпературних застосувань.

Розділення матеріалів на конструкційні та функціональні не завжди виправдане, оскільки їх поєднання в композиційних структурах дозволяє отримати матеріали з покращеними або новими властивостями. Така інтеграція може значно розширити функціональність, наприклад, шляхом підвищення міцності або додання активної реакції на зовнішнє середовище.

В одному з досліджень створено композиційний матеріал типу «сендвіч» зі сплаву Ti50Pd25Ni24W1, де між двома шарами титану розміщувалась пластина зі сплаву з ЕПФ. Після прокатки та вакуумного запаювання отримали матеріал із високою міжшаровою адгезією, який при температурних випробуваннях демонстрував підсилення механічних характеристик у зоні мартенситного перетворення.

У ІМФ НАН України було розроблено інший варіант композиту: мідна матриця з розташованим усередині попередньо деформованим стрижнем із мідного сплаву з ЕПФ. Такий матеріал поєднує низький коефіцієнт теплового розширення ($\sim 1 \times 10^{-6}$ см/°C) з досить високою електропровідністю ($\sim 4,1 - 4,9 \times 10^{-6}$ Ом·см), що лише втричі гірше за чисту мідь.

Нові можливості в розробці ЕПФ-матеріалів

Потенціал для вдосконалення та розробки високотемпературних сплавів із ефектом пам'яті форми (ВТЕПФ) залишається значним. Наприклад:

- Сплави на основі кобальту, які зазнають $\gamma \rightarrow \epsilon$ перетворення, мають високий потенціал для досягнення кращих механічних властивостей.

- Системи Zr-Cu-Me (де Me – Co, Fe, Ni) підходять для випадків, де механічна міцність менш критична.
- Легування традиційних NiTi або CuAl сплавів елементами типу Nb, Zr, Hf дозволяє зсунути температурні межі мартенситного перетворення у бажаний інтервал (напр., $A_c \approx 200\text{--}250\text{ }^\circ\text{C}$).

Функціональні матеріали з мартенситними перетвореннями — зокрема сплави з ефектом пам'яті форми — вже знайшли безліч застосувань у медицині, аерокосмічній техніці, електроніці, сенсоріці. Проте значний науково-технічний потенціал залишається нереалізованим, особливо у сегменті високотемпературних матеріалів. Подальший розвиток цієї галузі можливий через створення композитів, легування новими елементами та контроль температурних режимів перетворення, що забезпечить адаптацію таких матеріалів до широкого спектра інженерних задач.

Сплави з ефектом пам'яті форми становлять окремий клас функціональних матеріалів, що відкривають нові можливості у створенні інтелектуальних систем. Україна має потужну наукову школу у сфері вивчення ЕПФ, однак для їхнього широкого застосування потрібне державне та промислове зацікавлення, інвестиції у виробництво, а також тісна співпраця науки та бізнесу.

Тема 8. Високоміцні сталі та сплави: новітні розробки у металургії.

Маркування сталей та основи легування

Ключові терміни та поняття. Класифікація легуючих елементів. Основи систематизації легованих і спеціальних сталей та сплавів.

Леговані сталі становлять приблизно чверть усієї продукції металургійної промисловості. Вони є основним матеріалом для виготовлення відповідальних елементів машин і конструкцій у багатьох галузях промисловості, зокрема машинобудуванні та будівництві.

Розуміння базових принципів розробки окремих груп сталей і оптимальних режимів їхньої обробки дозволяє створювати економічно доцільні леговані сталі з підвищеними експлуатаційними характеристиками та забезпечувати необхідну надійність і тривалість служби готових виробів. Наразі в машинобудуванні застосовується понад 2000 різних марок сталей і сплавів.

Визначення та класифікація сталей і легуючих елементів

Спеціальні сталі — це залізовмісні сплави, які мають специфічні властивості завдяки особливостям хімічного складу, способу виготовлення або технології обробки (за визначенням Е. Гудремона). У більшості випадків вони є легованими.

Легуючі елементи — це хімічні речовини, що спеціально додаються до сталей з метою формування необхідних структурних та експлуатаційних характеристик. Основні з них: Mn, Cr, Si, Ni, Mo, W, V, Ti, Co, Al, Cu, Nb, Zr. У ряді випадків як легуючі компоненти виступають H, S, N, Se, Te, Pb, La тощо.

Частина цих елементів, разом із Н, О, Sn, Sb, As, Bi, може бути присутня у сталі також у вигляді домішок.

Домішки — це елементи, що потрапляють до сталі як супутні або залишкові компоненти сировини чи технологічних добавок. Зазвичай їхній вміст обмежений, наприклад: $Mn < 0,8 \%$, $Si < 0,4 \%$, $Cr < 0,3 \%$, $Cu < 0,3 \%$, $Mo \leq 0,10 \%$, $W \leq 0,2 \%$, $P \leq 0,025 \dots 0,040 \%$, $S \leq 0,015 \dots 0,050 \%$.

Цікаво, що один і той самий елемент може бути як легуючим, так і домішкою — залежно від його концентрації та впливу на властивості сталі.

Леговані сталі — це залізовмісні сплави, у які навмисно додають легуючі компоненти, щоб сформувати бажану мікроструктуру й відповідні властивості. Деякі елементи (наприклад, V, Nb, Ti, Zr, B) впливають навіть у мізерних концентраціях — від сотих до тисячних часток відсотка.

Поняття "спеціальні сталі" ширше за "леговані сталі", оскільки охоплює і певні вуглецеві сталі з особливими властивостями (наприклад, інструментальні сталі).

Групування металів за властивостями

- **Чорні метали** — залізо та його сплави.
- **Кольорові метали** — решта металів і їхні сплави.
- **Залізна група** — Co, Ni, Mn.
- **Тугоплавкі метали** — W, Mo, Nb, V, Cr.
- **Легкі метали** — Ti, Al.
- **Рідкоземельні метали (РЗМ)** — La, Ce, Nd, Y, Sc.

Карбідоутворювальні та некарбідоутворювальні елементи

У сплавах залізо–вуглець легуючі елементи класифікують за здатністю утворювати карбіди.

- **Карбідоутворювальні:** Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe.
- **Некарбідоутворювальні:** Cu, Ni, Co, Si, Al.

Класифікація сталей

Єдиного підходу до класифікації легованих і спеціальних сталей не існує, але загальноприйнятими є такі критерії:

1. **За хімічним складом:**
 - Вуглецеві (нелеговані),
 - Низьколеговані ($\leq 2,5\%$ легуючих елементів),
 - Леговані (2,5–10%),
 - Високолеговані ($>10\%$, з вмістом $Fe \geq 45\%$),
 - Сплави на основі Fe ($Fe < 45\%$, але більше за інші елементи).
2. **За призначенням:**
 - Конструкційні,
 - Інструментальні,
 - Сталі зі специфічними фізичними властивостями (наприклад, жаростійкі, корозійностійкі).
3. **За структурним станом:**
 - У рівноважному стані: доевтектоїдні, евтектоїдні, заевтектоїдні;

- Після охолодження: перлітні, бейнітні, мартенситні, аустенітні, феритні тощо.

4. За якістю:

- Звичайні,
- Якісні,
- Високоякісні,
- Особливо високоякісні (з обмеженим вмістом шкідливих домішок, як-от S і P).

Системи маркування сталей

У країнах пострадянського простору (зокрема в Україні та Росії) використовують **літерно-цифрову систему** позначення марок сталі. У маркуванні вказуються основні легуючі елементи й характеристики механічної міцності.

За європейськими стандартами (наприклад, Євронорми), маркування базується на гарантованих властивостях, як-от межа плинності або тимчасовий опір розриву. У Німеччині діють стандарти **DIN**, у США — **ASTM**, у Японії — **JIS**.

У Великій Британії та Японії для корозійностійких сталей застосовують систему маркування, аналогічну американській, з тризначними кодами й додатковими символами для вказівки на національний стандарт.

Вплив вуглецю, сталих домішок та легуючих елементів на характеристики сталей

Вуглець є одним із головних елементів, що формує властивості конструкційних сталей, його вміст у них може сягати до 0,8%. Ступінь впливу вуглецю визначається як структурою сталі, так і параметрами термічної обробки. Серед сталих домішок у сталях зазвичай присутні марганець (Mn), кремній (Si), сірка (S), фосфор (P) і газоподібні компоненти — кисень (O₂), азот (N₂), водень (H₂). Марганець і кремній мають позитивний вплив, у той час як сірка, фосфор і згадані гази класифікуються як шкідливі домішки. Вплив легуючих елементів на експлуатаційні характеристики сталі значною мірою залежить від структурного стану матеріалу, що, своєю чергою, обумовлюється режимами термічної обробки.

Розуміння ролі вуглецю у формуванні властивостей сталі є критичним для оцінювання експлуатаційної надійності металевих конструкцій. Зі збільшенням вмісту цього елемента зростає міцність і твердість матеріалу, але одночасно знижується його пластичність і в'язкість. Вуглець підвищує межу холодноламкості, розширюючи діапазон температур, у якому сталь може втратити в'язкість.

Вуглецевий вміст також негативно впливає на технологічність: зменшується здатність до пластичної деформації, ускладнюється процес зварювання.

Особливу увагу слід звернути на роль постійних домішок у формуванні властивостей легованих і спеціальних сталей. Наприклад, марганець не тільки зменшує негативний вплив кисню та сірки, а й бере участь у процесі

розкислення сталі. Його вміст зазвичай становить 0,3–0,8%. Натомість сірка провокує **червоноламкість** — крихке руйнування під час гарячої обробки, а фосфор викликає **холодноламкість**, тобто втрата в'язкості за низьких температур.

Газові домішки — кисень, азот і водень — негативно впливають на пластичні властивості сталі та сприяють її крихкому руйнуванню. Кисень утворює неметалеві включення, що є осередками розриву. Надлишок азоту спричиняє **деформаційне старіння**, що веде до втрати пластичності. Водень особливо небезпечний для високоміцних сталей із мартенситною структурою: він викликає **водневу крихкість**, що може призвести до утворення **флокенів** — внутрішніх тріщин у металі.

Вплив легуючих елементів на загартовану сталь

Після загартування із наступним низьким відпуском властивості сталі значною мірою залежать від концентрації вуглецю в мартенситній фазі. Високий вміст вуглецю підвищує міцність і твердість, але зменшує ударну в'язкість та збільшує ризик крихкого руйнування.

Карбідоутворюючі елементи — хром (Cr), молібден (Mo), вольфрам (W), ванадій (V) — сприяють накопиченню вуглецю у мартенситі, що додатково змінює структуру. **Некарбідоутворюючі елементи** — нікель (Ni), кремній (Si), мідь (Cu), кобальт (Co) — навпаки, знижують вміст вуглецю у мартенситі. Особливо ефективно діє нікель, зменшуючи ризик надмірної крихкості.

Механічні властивості після поліпшення (високого відпуску)

У результаті високотемпературного відпуску структура сталі перетворюється на **сорбіт** — суміш фериту та карбідів із зернистою морфологією. Висока міцність сорбіту зумовлена:

- впливом легуючих елементів на твердість фериту;
- дисперсністю та обсягом карбідної фази.

Чим більша концентрація легуючого елемента, що розчиняється у фериті, та чим більша різниця між його атомним радіусом і радіусом атома заліза, тим більше посилюється матриця.

Більшість легуючих компонентів також сприяють **диспергуванню зерна**, що підвищує енерговитратність розвитку тріщин і знижує межу переходу в крихкий стан при низьких температурах.

Вплив легуючих елементів на поліморфні перетворення в залізі

Види легуючих елементів і вплив на γ -область
Легуючі елементи поділяються на дві групи:

- **Розширюють γ -область** (підвищують A_4 та знижують A_3) — наприклад, Ni, Mn, Co утворюють необмежені тверді розчини, тоді як C, N, Cu, Zn обмежують γ -область гетерогенними фазами.
- **Звужують γ -область** (нижчий A_4 і вищий A_3) — сюди входять елементи, що формують подвійні системи із закритою γ -областю: Cr, Al, Si, V, Ti, W тощо; а також такі як Re, що утворюють гетерогенні зони.

Карбідоутворюючі проти некарбідоутворюючих елементів
Карбідоутворювачі (Ti, Mo, W) значно підвищують A_1 та орієнтують температуру дисоціації карбідів. Некарбідоутворювачі (Ni, Mn) трохи підвищують дисоціацію, але знижують A_1 . Хром має складну дію — при вмісті до ~12–13 % A_1 змінюється мало, вище ~14 % росте суттєво.

Стійкість переохолодженого аустеніту
Леговані сталі мають вищу стійкість переохолодженого аустеніту й краще прогартовуються (наприклад, сталь 45 має критичний діаметр ~20 мм, а 40ХНМА — ~120 мм).
У **перлітній області**, практично всі легуючі елементи (окрім Co), особливо Mo і Mn, уповільнюють початок перлітного перетворення.
У **бейнітній області** найефективніше стабілізують аустеніт C і N; Mn, Cr, Mo, W теж його відстрочують, але меншою мірою.
Елементи, що знижують температуру початку мартенситного перетворення (C, Mn, Cr, Ni, Mo тощо), збільшують залишковий аустеніт. Їхня дія не сумується — ефект від поєднання може бути непередбачуваним.

Вплив легуючих елементів на структуру і властивості при відпуску **Розпад мартенситу**

До ~200 °C легування майже не змінює кінетику розпаду мартенситу. Вище (250–500 °C) карбідоутворювачі зміщують процес у бік вищих температур; Si сильно уповільнює розпад, на відміну від слабких некарбідоутворювачів (Ni, Mn).

Карбіди і їх коагуляція
Тільки Cr карбіди можуть утворюватися як у цементиті, так і безпосередньо з α -фази. При 450–600 °C коагуляція у легованих сплавах починається раніше, ніж у звичайних сталях.
Залишковий аустеніт може перетворитися на бейніт або мартенсит, особливо в високолегованих сталях, і впливає на в'язкість і сталість властивостей.

Дисперсійне зміцнення
При відпуску одночасно відбуваються: зниження міцності через розпад мартенситу і зміцнення — через виділення дисперсних специфічних карбідів. Відношення цих процесів залежить від типу і концентрації легуючого елементу та вмісту C.

Відпускна крихкість

- **I роду (необоротна):** близько 300 °C, на неї майже не впливають легуючі елементи (окрім Si).
- **II роду (оборотна):** вище 500 °C у легованих сталях. Si зсуває інтервал крихкості вгору. Для запобігання використовують Mo (0,2–0,4 %) або W (0,6–1,2 %) і швидке охолодження після відпуску.

Поліпшувані конструкційні сталі

Сорбітна структура
Після загартування й високого відпуску утворюється сорбіт — чацій зернин ферит + карбіди. Зміцнення фериту посилюється легуючими елементами з

великим атомним радіусом (Si, Mn, Ni) або за рахунок карбідної фази (Cr, V, Ti, Mo, W).

Прогартовуваність

і

холодноламкість

Всі легуючі елементи (крім Co) підвищують прогартовуваність. Залишковий аустеніт (3–15 %) може або покращити в'язкість (стабільний), або знизити (якщо розпадається на ферит+карбід). Для запобігання бейнітному ефекту структура з мартенситом підсилюється дрібнозернистою зернистістю.

Приклади марок сталей

— 40 X, 40 ХГТР, 30 ХН3А, 40 ХН2МА тощо з оптимальним вмістом елементів: Cr (~2 %), Ni (1...5 %), Mn (до 1,5 %), Si (до 2 %), Mo (0,2...0,4 %), W (0,8...1,2 %), V (до 0,3 %), Ti (до 0,1 %), B у мікродозах (0,002...0,005 %).

Високоміцні та поверхнево-хіміко-термічні сталі

- **Високоміцні сталі:** $\sigma_v > 1600$ МПа; включають низьковідпущені і дисперсійно-твердіючі сталі.

- **Дисперсійне зміцнення:** Cr, Mo, V додають до Cr ≈ 5 %, Mo 1–2 %, V $\approx 0,5$ %; максимальне зміцнення при 500–600 °С.

- **Мартенситно-старіючі (МСС) сталі:** містять Ni (8...20 %) + Ti, Mo, Al, V; процес: загартування (820...940 °С) → старіння (480...520 °С протягом 2–3 год).

- **Сталі для цементації і азотування:**

- Цементация: низьковуглецеві сталі ($C \approx 0,08$ –0,25 %), часто легуються Cr, Mo, B, Ti, V, Ni. Глибина шару $\sim 0,3$ –2,5 мм.

- Азотування: проводиться після загартування/високого відпуску при ~ 500 –600 °С; Cr, Mo, Al забезпечують твердість до 1200 НV. Нітроцементация – поєднання азотування і цементації при 850–870 °С.

Будівельні сталі

Загальні поняття

Будівельні сталі використовуються у металоконструкціях (мости, каркаси, резервуари) та арматурі залізобетону. Вони повинні поєднувати високу міцність із пластичністю, хорошою ударною в'язкістю, корозійною стійкістю та технологічністю (зварюваність, гнучкість тощо). Міцність оцінюється класами:

- **S380/230** — нормальні сталі,
- **S460/330, S520/400** — підвищеної міцності,
- **S600/450, S700/600, S850/750** — високоміцні.

Арматурні сталі

Класи А-I до А-VII характеризуються границею текучості (наприклад, A600 = 600 МПа). Гарячекатані арматурні сталі (А-I...А-V) незначно леговані, більш високоміцні класи (А-VI) — у термомеханічно чи термічно зміцненому стані. Зі зростанням міцності збільшується ступінь легування.

Зварюваність

Ключова вимога: **вуглецевий еквівалент (Ceq)** не має перевищувати $\approx 0,45$ –0,48%. Тому вміст С у низьколегованих сталях зазвичай $\leq 0,18$ %.

Термозміцнення (термотвердження)

Після гарячої прокатки сталь із аустеніту охолоджують швидко, утворюючи тонкодисперсні структури. Можливе додаткове зміцнення під час деформації. Такий метод – суттєво підвищує механічні властивості (до 1.3–1.5 разів), знижує температуру хладноломкості та дає економію металу до 60 %. Наприклад, марки ВСтТсп, ВСтТпс, ВСтТкп містять 0,10–0,21% С і 0,4–0,65% Мп, забезпечуючи $\sigma_v \geq 430$ МПа, $\sigma_{0.2} \geq 295$ МПа, $\delta \geq 16\%$, КСУ $\geq 0,3$ МДж/м².

Сталі підвищеної міцності

Гарячекатані з ферито-перлітною структурою, інколи нормалізовані або загартовані з високим відпуском, отримують дрібнозернистий сорбіт. Основні легуючі елементи: Мп, Si, а додаткові: Cr (0,5–0,9 %), V (0,05–0,12 %), Nb (0,02–0,05 %), Ni (0,3–0,6 %), Cu (0,15–0,4 %). Мідь покращує стійкість до атмосферної корозії. Приклади: 09Г2С, 09Г2СД, 15ГФ тощо. Порівняно з ВСт3сп, такі сталі легші на 15–30 % і мають гарантію ударної в'язкості до –40 або –70 °С.

Високоміцні та холодостійкі сталі

Легують V (0,05–0,12 %) + N (0,015–0,03 %), іноді Al (до 0,1 %), для формування карбонітридів V(C,N), Nb(C,N), збільшення міцності та морозостійкості.

Приклад: 16Г2АФ нормалізована до дрібного зерна № 9–11, $\sigma_{0.2} \leq 400$ МПа, КСУ @ –70 °С $\approx 0,3$ МДж/м². Для високої $\sigma_{0.2} \leq 600$ МПа застосовуються марки 12Г2СМФ/12ГН2МФАЮ.

Малоперлітні і бейнітні сталі (09Г2ФБ, 08Г2МФБ) формуються за допомогою контрольованої прокатки (термомеханічної обробки).

Жароміцні сталі

Жароміцність — здатність сталей витримувати механічне навантаження при високих температурах протягом часу. До ~600 °С цей термін часто називають **теплотривкість**. Важливо враховувати робочу температуру, тривалість експлуатації й характер навантаження — саме вони визначають прояв повзучості та релаксації напруг.

Показники жароміцності: **границя повзучості** та **границя тривалої міцності**, встановлювані стандартами (наприклад, ГОСТи).

Закон формування структури

Сталеву жароміцність забезпечують легуванням і термообробкою для формування **однорідної матриці**, укріпленої дрібними карбідами, боридами, нітридними частками. Чим менша рухливість вакансій у твердому розчині — тим вища жароміцність. Аустенітні структури (ГЦК) загалом міцніші у жарочутливих умовах, ніж феритні (ОЦК). Дрібнодисперсні частинки ЧФ також запобігають зрізуванню по границях зерен.

Дрібні домішки типу свинцю, кадмію та сурми знижують жароміцність, бо сприяють міжкристалітному руйнуванню. Натомість легування малими дозами РЗМ, цирконію або бору формує тугоплавкі з'єднання на границях зерен, знижуючи повзучість.

Групи жароміцних сталей

1. **Низьколеговані перлітні/бейнітні** (наприклад, 12ХМ, 12Х1МФ) — до 450–600 °С.

2. **Мартенситні хромисті** (5–13 % Cr, карбідів металів) — для роботи при 550–650 °С (машинобудівельні деталі турбін, насадки).

3. **Аустенітні хромонікелеві/хромомарганцеві** (12Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М) — витримують до 600–850 °С завдяки сильній тепловій стабільності.

Категорії

- **Теплотривкі сталі:** вуглецеві, перлітні та мартенситні сплави, що застосовуються при високому тиску й температурі — котли, турбіни. Термічна обробка — зазвичай нормалізація та високий відпуск. Ресурс роботи у межах $10^5 \dots 2 \cdot 10^5$ годин.

- **Мартенситні сталі** (~5...13 % Cr, 0,08–0,22 % C + W, Mo, Nb, V) — проходять нормалізацію (~1000–1100 °С) і відпуск (530–580 °С або вище). Придатні для тривалої роботи до ~650 °С.

- **Аустенітні сталі** поділяються на:

- **Гомогенні** (без зміцнення) — стабільні при тривалій експлуатації до 700 °С. Зазвичай термообробка: загартування ~1050–1200 °С + стабілізаційний відпуск (700–750 °С).

- **Карбідно-укріплені** — HRC високий, карбіди збільшують міцність, але знижують пластичність. Застосовуються при 650–700 °С (двоступенева старіння).

- **Інтерметалідно-укріплені** — найстабільніші при 700–850 °С. Легуються Ni, Mo, Cr, W, Al. Структура відома застарюванням при 750 °С.

Тема 9. Аналіз довговічності та зносостійкості сучасних матеріалів.

Довговічність — здатність матеріалу/виробу зберігати функціональність протягом визначеного терміну при впливі експлуатаційних чинників. Вона визначається **опором втомі, зносу, корозії, повзучості, ерозії, старінню структури**.

Поділяється на:

- **Номінальну довговічність** — за технічними характеристиками;
- **Фактичну** — у реальних умовах експлуатації.

Втомне руйнування

- Розвивається під дією **циклічних навантажень**.
- Характеризується **S-N кривими** (Wöhler-діаграми).
- Важливо: наявність **концентраторів напружень**, мікро- та макротріщин.

Класифікація зносу

Типи зношування

1. Механічне:

- **Абразивне** (вплив твердих часток або шорсткостей);
- **Адгезійне** (місцеве зварювання й розрив контакту);
- **Фретинг-знос** (мікроколивання з тертям);

- **Поверхнева втома** (циклічні контактні напруги, пітінг).
- 2. **Корозійне:**
 - Хімічне середовище + механічне тертя.
- 3. **Кавітаційне, ерозійне** — в рідинах або газах з турбулентними потоками.

Механізми руйнування матеріалів

- **Дислокаційний механізм** — переміщення дефектів у кристалічній решітці.
- **Крихке руйнування** — без помітної пластичної деформації.
- **Міжзернове руйнування** — по границях зерен (особливо в корозійному середовищі).
- **Механохімічне зношування** — з комбінованим впливом механіки та хімії.

Критерії та методи оцінки зносостійкості

Основні параметри

- **Інтенсивність зносу:**

$$I = \frac{\Delta m}{F \cdot L} \text{ або}$$

ΔV — втрата об'єму,

L — довжина контакту,

F — сила навантаження.

- **Коефіцієнт тертя**
- **Температурна стійкість до зношування**
- **Мікротвердість поверхневого шару**

Методи дослідження зносостійкості

Оцінка зносостійкості матеріалів потребує застосування сучасних експериментальних методів, які дозволяють відтворити реальні умови експлуатації та проаналізувати механізми зношування. Найпоширенішими є стендові випробування, зокрема за схемами «диск-палець» та «кільце-блок». Вони імітують ковзання або кочення контактних поверхонь, дозволяючи визначити інтенсивність зносу, коефіцієнт тертя, температуру контакту тощо.

Фрактографічний аналіз є ефективним методом вивчення поверхні зруйнованих або зношених зразків, зокрема за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM). Це дозволяє встановити домінуючі механізми руйнування — втома, крихке чи в'язке руйнування, міжзернове порушення.

Метод акустичної емісії застосовується для реєстрації сигналів, які виникають під час зародження й поширення тріщин, особливо у процесі втомного зношування. Це один з найбільш чутливих і неінвазивних способів діагностики.

Кристалографічні методи, зокрема рентгенівська дифракція (XRD) і SEM, широко використовуються для аналізу фазового складу, мікроструктури та змін у поверхневому шарі після зношування або термічної обробки.

Сучасні зносостійкі матеріали

Матеріали, що використовуються в машинобудуванні, повинні не лише мати високу міцність, а й бути стійкими до різних видів зносу. Серед металів і сплавів найбільш поширеними є конструкційні сталі, як-от 40Х та 30ХГСА, які поєднують хороші механічні властивості з відносною зносостійкістю. Інструментальні сталі (Р6М5, Х12Ф1) відзначаються високою твердістю та використовуються для виготовлення ріжучого інструменту. До жароміцних сталей, що зберігають властивості при підвищених температурах, належать 15Х11МФ та 12Х18Н10Т. Для підшипників кочення широко застосовують високовуглецеву хромисту сталь ШХ15. Тверді сплави на основі карбідів (ВК8, Т5К10) використовуються в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Серед неметалічних матеріалів особливої уваги заслуговують оксидні кераміки, такі як Al_2O_3 та ZrO_2 , які мають надзвичайну твердість і термостійкість. Металокерамічні та графітні композити поєднують переваги обох класів матеріалів. У прецизійній техніці часто застосовують полімери та армовані пластики з високими показниками зносостійкості та низьким коефіцієнтом тертя.

Методи підвищення довговічності

Підвищення довговічності матеріалів досягається завдяки кільком напрямкам інженерного впливу. Один із них — об'ємне легування, яке включає введення елементів, що зміцнюють матрицю (Cr, Ni, Mo, V, Co). Термічна обробка (гартування, нормалізація, відпуск) дозволяє досягти оптимального співвідношення між твердістю, міцністю та пластичністю.

У сфері поверхневої інженерії активно застосовуються методи хіміко-термічної обробки: цементація, азотування, борування, які формують зміцнені шари товщиною до кількох сотень мікрон. Плазмові покриття, зокрема TiN, CrN, DLC, створюють на поверхні високоміцні плівки з мінімальним тертям. Додатково застосовуються іонна імплантація та лазерне легування для локального зміцнення поверхонь.

З технологічної точки зору доцільно вдосконалювати умови мащення (системи змащування, вибір мастильних матеріалів), правильно підбирати пари тертя, а також використовувати втулки, демпфери та інші вставні елементи для зменшення зносу основних вузлів.

Інноваційні рішення в забезпеченні довговічності

Новітні матеріали, такі як наноструктуровані сплави та самозмащувальні композити, дозволяють істотно зменшити втрати на тертя та збільшити ресурс елементів. Матеріали з адаптивними властивостями (так звані shape-memory alloys) відкривають нові можливості для самовідновлення структури після деформацій.

В умовах цифрової трансформації активно впроваджуються методи прогнозування зносу за допомогою цифрових двійників (digital twins), які моделюють поведінку вузлів у реальному часі. Системи штучного інтелекту (AI/ML) аналізують дані від датчиків та прогнозують залишковий ресурс деталей. Технологія 3D-друку зі зносостійких металопорошкових сплавів дозволяє швидко відновлювати або виготовляти деталі з точними параметрами зносостійкості.

Проблема довговічності та зносостійкості є ключовою в сучасному машинобудуванні. Вона потребує комплексного підходу: від вибору матеріалу й режимів обробки до моделювання та прогнозування зносу. Застосування новітніх матеріалів, поверхневих технологій та цифрових систем діагностики дозволяє подовжити ресурс машин і механізмів у 2–5 разів. У найближчому майбутньому основним напрямом розвитку стане широке впровадження адаптивних матеріалів і сенсорних систем моніторингу технічного стану.

Тема 10. Випробування та сертифікація новітніх матеріалів у машинобудуванні.

Сучасне машинобудування стрімко розвивається, і його ефективність значною мірою залежить від застосування новітніх матеріалів. Це можуть бути композити, сплави з пам'яттю форми, наноматеріали, кераміка високої міцності та інші інноваційні рішення. Проте впровадження таких матеріалів вимагає ретельного випробування та офіційного підтвердження їх якості – сертифікації. Саме ці процедури забезпечують безпечність, довговічність і ефективність експлуатації деталей та конструкцій у техніці.

Види випробувань матеріалів

1 Механічні випробування

Механічні випробування включають перевірку на:

- розтягування;
- стискання;
- твердість;
- ударну в'язкість;
- втомне навантаження.

Уявімо собі сталевий зразок, який вперше піддається навантаженню. Він ще не знає, чи витримає тиск, чи зламається. Його затискають у випробувальну машину, і та починає натискати з силою. Це як випробування долі – або виживеш і станеш частиною турбіни літака, або тріснеш і залишишся лише у звіті як статистика. Так і матеріали проходять "життєвий відбір", щоб довести свою гідність служити в машинобудуванні.

2 Фізико-хімічні випробування

Ці випробування аналізують:

- корозійну стійкість;
- термічну стабільність;
- стійкість до окислення та зношування.

Методи контролю якості новітніх матеріалів

- Неруйнівний контроль (ультразвуковий, рентгенівський, магнітний, візуальний);
- Металографічний аналіз;
- Електронна мікроскопія для наноматеріалів;
- Спектроскопічні методи.

Сертифікація матеріалів

Сертифікація – це офіційне підтвердження відповідності матеріалу встановленим стандартам і нормативам. У машинобудуванні це особливо важливо, бо йдеться не просто про якість, а про безпеку людей і техніки.

Можна порівняти сертифікацію з обіцянкою: якщо матеріал обіцяє витримати навантаження в 10 тонн, то він має це підтвердити документально. Ніби спортсмен перед Олімпіадою – кожен проходить тест, тренування і відбір. Без цього – жодних шансів потрапити в головну команду. Так і новітній композит не отримає місце в авіаційному крилі, якщо не доведе свою силу в лабораторії.

Вимоги до сертифікації в Україні

В Україні сертифікацію здійснюють відповідно до:

- ДСТУ (Державні стандарти України);
- Європейських норм (EN);
- Міжнародних стандартів (ISO, ASTM тощо).

Сертифікація також враховує вимоги галузевих стандартів (наприклад, для авіації, автомобілебудування, енергетики).

Особливості сертифікації новітніх матеріалів

Новітні матеріали мають унікальні властивості, які не завжди охоплені наявними стандартами. Тому:

- Потрібно створювати нові методики випробувань;
- Часто залучаються міжнародні випробувальні лабораторії;
- Сертифікація може займати більше часу;
- Необхідна міждисциплінарна експертиза (матеріалознавці, інженери, технологи).

Приклади з практики

- Композити для авіації проходять до 20 видів випробувань, перш ніж отримають сертифікат EASA (Європейського агентства з авіаційної безпеки).

- Титанові сплави для медичних імплантатів повинні мати біосумісність, перевірену за стандартами ISO 10993.

- Укрзалізниця тестує нові матеріали для коліс і рельсів на циклічну втомленість і стійкість до зношування в умовах українського клімату.

Випробування та сертифікація – це не просто формальність. Це складна і відповідальна частина процесу впровадження нових матеріалів у машинобудуванні. Саме від неї залежить, чи стане інновація справжнім проривом, чи залишиться лише перспективною ідеєю на папері.

Тема 11. Екологічні аспекти використання новітніх матеріалів.

Розвиток технологій несе з собою не лише інновації, а й відповідальність. Новітні матеріали — такі як наноструктури, біополімери, графен, метаматеріали — відкривають нові горизонти для машинобудування, енергетики, транспорту. Але водночас постає питання: **який екологічний слід вони залишають після себе?** Чи безпечно впроваджувати нові матеріали, не розуміючи повністю їхнього впливу на довкілля, здоров'я людини, біосистеми?

Екологічні загрози, пов'язані з новітніми матеріалами

- **Наноматеріали:** Потрапляючи у воду чи ґрунт, наночастинки можуть змінювати поведінку мікроорганізмів, накопичуватися в харчових ланцюгах.
- **Композиційні матеріали:** Труднощі в утилізації через складну багатошарову структуру.
- **Полімери з добавками:** Можуть виділяти шкідливі леткі сполуки при нагріванні або горінні.
- **Рідкоземельні метали:** Деякі нові сплави містять токсичні або важкодоступні елементи, видобуток яких шкодить екосистемам.

Уявіть собі блискучу панель з вуглецевого волокна, вмонтовану в кузов електромобіля. Вона легка, міцна, сучасна. Але коли авто списують, панель стає відходом, який не розкладається століттями. Вона мовчки лежить на звалищі, і природа — безмовний свідок прогресу — платить за технічну досконалість непомітним, але глибоким раком в екологічному тілі.

Життєвий цикл матеріалу та принцип "з колиски до могили" (LCA)

Життєвий цикл новітнього матеріалу включає:

1. Видобуток сировини;
2. Виробництво;
3. Використання;
4. Утилізацію або переробку.

Метод LCA (Life Cycle Assessment) дозволяє оцінити **загальний екологічний вплив** на кожному з цих етапів.

Стратегії мінімізації екологічного впливу

- Заміна токсичних компонентів на біосумісні.
- Розробка матеріалів, придатних до багаторазової переробки.
- Використання вторинної сировини.
- Впровадження принципів «зеленої хімії» у виробництві.
- Дослідження поведінки матеріалів у природних середовищах.

Прозаїчний фрагмент:

Найбільше майбутнє мають ті матеріали, які живуть у гармонії з природою. Ніби дерево, яке росте, дарує кисень, а потім, упавши, розкладається і стає частиною нового життя. Так само мають поводитись і

матеріали ХХІ століття: служити, а потім — не шкодити, зникати без сліду, передаючи естафету новому циклу життя.

Приклади екологічно відповідального використання матеріалів

- Біорозкладні полімери у пакуванні та автодеталях.
- Легка вторинна алюмінієва тара, яку можна перероблювати нескінченно.
- Текстиль з грибного міцелію — майбутнє екологічних оздоблень у салонах авто.
- Використання графену для очищення води — подвійна користь: інновація + екологія.

Екологічне регулювання в Україні та світі

- В Україні діють закони «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про відходи», а також ДСТУ ISO 14001.
- У світі — європейські REACH, екологічні сертифікати (Ecolabel, Cradle to Cradle).
- Компанії зобов'язані проводити екологічну оцінку нових матеріалів до їхнього впровадження.

Виклики та майбутні тенденції

- Необхідність створення міжнародних баз даних з екологічною поведінкою нових матеріалів.
- Розвиток **еко-дизайну** — матеріали проектуються з думкою про їхній кінець життєвого циклу.
- Акцент на **цифровий паспорт матеріалу** — кожен матеріал матиме супровідну документацію з екологічними характеристиками.

Екологічна відповідальність — це не лише мода, а новий стандарт технічного мислення. Новітні матеріали — це ключ до майбутнього, але він має відкривати двері не лише до інновацій, а й до чистого довкілля. Розробка, використання та утилізація матеріалів мають відбуватись з урахуванням балансу між технічним прогресом і турботою про планету.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І. Матеріалознавство : підручник для студентів вищих навчальних закладів напрямів «Машинобудування», «Інженерне матеріалознавство» / за ред. С. С. Дяченко. Харків : ХНАДУ, 2007. 439 с.
2. Сушко О. В., Посвятенко Е. К., Лодяков С. І. Прикладне матеріалознавство : підручник. Мелітополь : ТОВ «Forward press», 2019. 352 с.
3. Дубовий О. М., Казимиренко Ю. О., Лебедєва Н. Ю. та ін. Інженерне матеріалознавство : підручник. Миколаїв : НУК, 2009. 444 с.
4. Ashby M. F. Materials Selection in Mechanical Design. 5th ed. Amsterdam : Elsevier, 2017. 646 p.
5. Callister W. D., Rethwisch D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th ed. Hoboken : Wiley, 2018. 992 p.
6. Clyne T. W., Hull D. An Introduction to Composite Materials. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2019.
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. 3rd ed. Cham : Springer, 2021. 675 p.