

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра „Матеріали і технології виготовлення виробів транспортного призначення”**

**В.М. Остапчук, Л.А. Тимофєєва, Е.С. Геворкян**

**НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛИ ТА ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО  
КОНТРОЛЮ**

***КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ***

**Харків – 2008**

Остапчук В.М., Тимофеева Л.А., Геворкян Е.С. Нові технології, матеріали та засоби неруйнівного контролю: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – 73 с.

Розглядаються питання сучасних технологій матеріалів і методів неруйнівного контролю. Описуються використані в теперішній час технології і способи отримання нових матеріалів і покриттів.

Конспект лекцій призначений для самостійного вивчення дисципліни „Нові технології, матеріали та засоби неруйнівного контролю” студентами 2 курсу механічного факультету денної форми навчання спеціальності Л, В, ТЕ, БКМ.

Іл. 18, табл. 2, бібліогр.: 6 назв.

Конспект лекцій розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри МТВ 26 лютого 2007 року, протокол № 8.

Рецензент:

доц. Н.М. Можарова

# ЛЕКЦІЯ 1

## ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ

### 1.1 Становлення поняття технології

Ще на початку XVIII століття слово «технологія» було відсутнє. І не тільки в нашій країні, але й у країнах, що стояли на порозі індустріального розвитку. Наприклад, у Франції, що була в той час флагманом науки, де формувалася наукова термінологія, існувало слово «мистецтво» – мистецтво землеробства, мистецтво механіки і т.д.

Тільки із середини XVIII століття в енциклопедії розділяються поняття «мистецтво» і «техніка». Під технікою розуміється техніка не тільки як матеріальні галузі, але і як способи, прийоми виробництва. При цьому відмінність техніки виробництва якогось об'єкта від мистецтва виготовлення полягала в тому, що техніка являє собою відомі, вивчені процеси. Якщо використати сучасні поняття, то це процеси, що становлять методи обробки, промислову технологію або промисловий досвід. А слову «технологія» тривалий час надавався зміст вивчення промислових методів, тобто науковий аспект. Але в сучасному світі таке поняття технології є застарілим, адже як тоді трактувати термін «висока технологія»? Процес поділу понять техніки, методів виготовлення й технології не завершений. Тому деякі автори припускають, що зміст слова «технологія» може в остаточному підсумку трансформуватися й використовуватиметься тільки стосовно галузей, що перебувають на вістрі нової промислової революції, а саме: електроніка, космос, біотехнологія.

В Англії, родоначальниці промислової революції, перше згадування про технологію було в Logical Encyclopedia в 1670 р., де вона визначається як «наукові знання про обмін і вміння».

Таким чином, у XVIII столітті технологія розвивається як наукова дисципліна, створена в певній мірі на протигагу академічній науці, оскільки в той час практики не довіряли вченим. Так, у Західній Європі розвиток техніки з XVII до XVIII століття відбувався двома різними шляхами.

Практики безупинно вдосконалюють свої машини, винаходять нові, будують споруди й мости, млини й військові машини. Теоретики працюють над створенням теоретичної механіки. При цьому між ними існувала взаємна недовіра, а згода була відсутня: кожний працює сам по собі й рідко зважає на досвід або знання інших. Різні спроби вчених застосувати свої знання на практиці, у виробництві звичайно закінчувалися невдачею. Технологія ж ішла як би слідом за практикою, узагальнюючи й накопичуючи досвід, що дозволяло поліпшувати виробництво. Тобто із самого початку вона була прикладною наукою. Технологія звичайно розвивалася в клубах інженерів і інвесторів. Принаймні так було в Англії.

Таким чином, спочатку технологія розглядалася як знання, як наука, причому наука прикладна. І тільки пізніше слово «технологія» стало позначати й виробничі процеси. При цьому у Франції до цієї пори не відбулося повного об'єднання під одним поняттям «технологія» технології як науки й технології як набору виробничих методів і прийомів. В інших країнах, як ми вже бачили вище, під технологією часто розуміють способи й прийоми, а про науку як таку не згадують.

У нашій країні наукова сторона поняття технології завжди присутня, хоча акцент на ній робиться різний. В енциклопедії технологія визначається як наука або сукупність відомостей про різні фізичні, хімічні й інші способи переробки сировини, напівфабрикатів, виробів, а також самі процеси такої обробки – технологічні процеси, при яких відбувається якісна зміна оброблюваного об'єкта. Тут наука виведена на перше місце. В іншому словнику науці приділяється описова роль: «Сукупність виробничих процесів у певній галузі виробництва, а також науковий опис способів виробництва». У роботі технологія представляється як сукупність прийомів і способів переробки різних середовищ, а також відзначається, що таку ж назву має й дисципліна, що вивчає ці явища і являє собою сукупність прийомів одержання знань про процеси переробки різних середовищ. Тобто тут мова йде про технології не як про науку, а як про прийоми добування знань про процеси, що цікавлять, а це можна зробити як шляхом наукових досліджень, так і шляхом різних запозичень. У той же час у «Сучасному економічному

словнику» про наукову сторону поняття «технологія» не згадується: «Технологія – спосіб перетворення речовини, енергії, інформації в процесі виготовлення продукції, обробки й переробки матеріалів, збирання готових виробів, контролю якості, керування. Технологія втілює в собі методи, прийоми, режим роботи, послідовність операцій і процедур, вона тісно пов'язана із застосовуваними засобами, устаткуванням, інструментами, використовуваними матеріалами».

Наведені тут визначення так чи інакше відбивають виробничу технологію. До останнього часу слово «технологія» асоціювалося саме з виробництвом.

Якщо обмежуватися сферою виробничої технології, то можна дати таке її визначення: це сукупність найтіснішим чином взаємопов'язаних наукових знань, виробничого досвіду й послідовності операцій, забезпечених потрібними ресурсами, яка створює матеріальні або нематеріальні об'єкти із заданими характеристиками шляхом різних запозичень.

## **1.2 Технологічні перегони й розвиток технологічної системи**

Технології, що існують у суспільстві в певний момент, тісно взаємопов'язані, впливають одна на одну й утворюють технологічну систему. При цьому криза технологічної системи викликає й глибокі перетворення у суспільстві. Але, на відміну від політичних змін, про технологічні зміни суспільство у своїй переважній більшості довідується тільки за ознаками, що відбивають вже наслідки їхнього впливу на економіку й політику. Глобальні зміни світової технологічної системи називають **промисловими революціями.**

Перша технологічна система, що охоплює період від економічної системи кочівників до передіндустріальної системи, еволюціонувала повільно й пройшла у своєму розвитку кілька стадій. Кочівники займалися збиранням, полюванням, рибним ловом. Їхнє існування залежало від удачі, від сезонних змін погоди й завжди було під загрозою.

Землеробська система більш стійка, тому що зростає продуктивність землі, утворюються запаси продуктів харчування, що компенсує нерівномірність їхніх сезонних надходжень. При цьому якщо розглядати продукти харчування як акумульовану енергію сонця, то можна зробити висновок, що енергооснащеність людини трохи зросла.

Але енергооснащеність різко зросла з початком використання тяглової худоби. Продуктивність праці дозволила утримувати ту частину суспільства, що не займалася сільським господарством, а взяла на себе виготовлення одягу й начиння – ремісників.

На останній стадії розвитку цієї системи почали досить широко використовуватися машини – водяні й вітряні млини, при цьому не тільки для млива зерна, але й для обробки металу. А наприкінці з'явилися машини, що замінюють на деяких операціях руку людини, прядильні машини. Це було мануфактурне виробництво, що призвело до поділу праці й підготувало перехід до машинного виробництва.

Важливим досягненням цієї системи було утворення ринку.

**Перша промислова революція (1780-1810 рр.)** відбулася з винаходом парової машини. Парова машина стала рушієм як знарядь виробництва, так і транспортних засобів – паровоза, пароплава. Місце здійснення революції – Англія. Як енергоносієм стало виступати вугілля. Був зроблений перехід до другої технологічної системи. Енергооснащеність людини різко зросла.

Друга технологічна система характеризується інтенсивним розвитком металургії й текстильної промисловості.

Основні матеріали: чавун, дерево, натуральні волокна, камінь.

У промисловості переважають видобувні галузі (рисунок 1.1,а). Але розвиваються також і обробні галузі. Наприклад, виникло й почало розвиватися машинобудування. Можна сказати, що перша промислова **революція була також і тріумфом машинобудування.**

У цей період з'являються інвестиції. Починається деяке зближення науки з виробництвом, виділяються кошти на дослідження.

**Друга промислова революція (1880 - 1900 рр.)** або (1870 - 1914 рр.) відбувалася переважно в США. Її досягнення були оцінені набагато пізніше.

З'явився новий енергоносіє – нафта, що призвело до винаходу двигуна внутрішнього згорання. З'явилася електрика й електричні мотори.

Третя технологічна система характеризується розвитком тих галузей, які пов'язані з новим енергоносієм – нафтою й електрикою. Енергооснащеність людини знову зростає.

Нафта й вугілля служать сировиною органічної хімії.

З'являються нові матеріали – сплави металів, штучне волокно, целулоїд, бакеліт, цемент. Починається масове виробництво сталі. Можна сказати, що друга промислова революція була й перемогою такого конструкційного матеріалу, як сталь.

Поява двигунів внутрішнього згорання, розвиток на їхній основі транспортних засобів, значне поширення електромоторів викликає бурхливий розвиток машинобудування, що стає домінуючою галуззю.

Структура промисловості змінюється на користь обробних галузей і сфери послуг (рисунок 1.1,б).

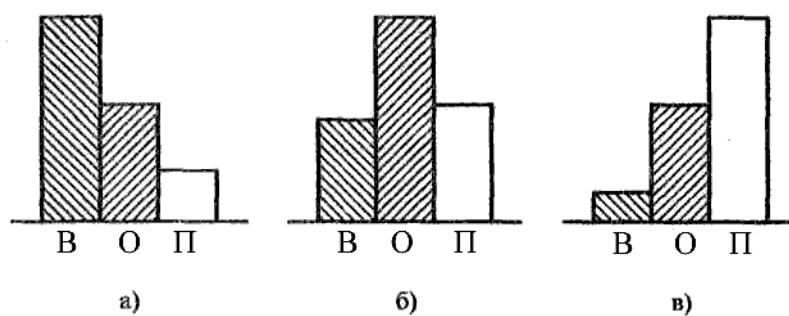


Рисунок 1.1 - Зміна структури промисловості в результаті науково-технічних революцій

Промисловість зазнає все більшої потреби в наукових дослідженнях і виділяє на них усе більші суми.

У період 1945-1970 рр. на перший план виходять реклама й маркетинг, і головними діючими особами стають не технократи, а фахівці ринкових відносин – менеджери. Сформувалися національні й регіональні ринки.

Третя промислова революція або науково-технічна революція, за оцінками одних фахівців, відбулася в 1950-1980 рр., а, на думку інших, вона почалася в 1975 р. і триває дотепер. Ця революція розгорнулася головним чином у США і Японії.

Бурхливий розвиток отримують інформатика, обчислювальна техніка, телекомунікації, аудіовізуальна техніка.

З'явився новий вид енергії – ядерна, котра перетворюється на електричну. Розробляється велика кількість нових матеріалів – композитів. У машинобудуванні об'єднання механіки й електроніки перетворює виробництво – з'являються програмувальні верстати й роботи, гнучкі автоматизовані виробництва.

Усе більше заявляють про себе біотехнології. Швидкими темпами розвивається сфера послуг, і вона займає домінуюче положення (рисунок 1.1,в).

Величезні кошти виділяються на наукові дослідження. Підвищується роль менеджерів. Формується світовий ринок.

### **1.3 Розвиток технологічних систем. Цикл життя технології**

Як усе в цьому світі, технологія має свій цикл життя – вона народжується, розвивається й умирає. Графічно вона зображена S-подібною кривою в координатах: характеристики технології / сумарні кошти, інвестовані в її розвиток із часом, або ж просто час (рисунок 1.2). Цикл життя умовно поділяється на 4 фази.



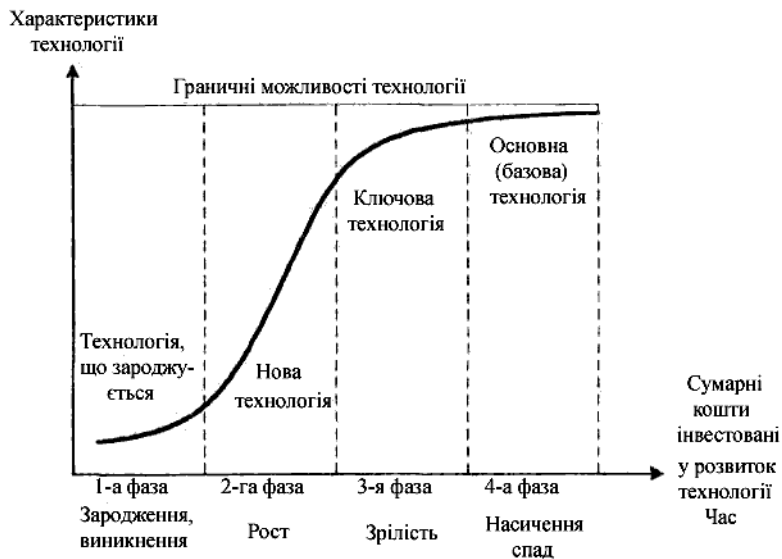


Рисунок 1.2 - Схема розвитку (цикл життя) технології

Фаза виникнення – це період перших кроків технології й включення її в економічне життя після недавнього виходу з винаходу або періоду науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДДКР).

У цей період досягнення нової техніки менш значні, ніж у конкуруючої старої технології. Але є схильність до зростання її характеристик у наступній фазі. Це найважливіший період у житті технології, коли вона, будучи ще зовсім слабкою, повинна довести свою життєздатність і перспективність. Саме на цій стадії життєвого циклу 90-95% нових розробок гинуть, так і не доживши до наступних фаз розвитку. Це так звана «дитяча смертність» технологій.

Фаза росту – це фаза інтенсивного поліпшення нової технології й устаткування. Технологія стала досить надійною, знайшла собі ряд значущих застосувань. У цей період у технологію вносяться серйозні зміни, покликані усунути її слабкі сторони, що виявилися в процесі експлуатації, при цьому розвиток технології часто супроводжується мініатюризацією об'єктів виробництва, як це відбувається в електроніці, або підвищенням питомих характеристик, як це буває в машинобудуванні.

У цей період відбувається зростання не тільки технічних характеристик технології, але й техніко-економічних – технологія знайшла свою нішу застосування й розвивається там швидкими темпами на шкоду старим технологіям. При цьому часто відкриваються нові, додаткові функції, які не виконувалися старими технологіями, тобто зони дії нової й старої технологій не повністю збігаються.

Фаза зрілості – це фаза, коли технологія стабілізується і її процеси відпрацьовані, а зростання показників хоча й зберігається, але явно сповільнюється. Набутий досвід дозволяє за допомогою цієї технології вирішувати принципові питання у сферах, де вона впроваджена й розвинена.

На цій стадії розвитку технологія дуже поширена. З одного боку, технічного, це пояснюється тим, що характеристики технології добре відомі, а отже, можна уявити всі її можливі застосування, а з іншого, техніко-економічного боку, уже важко очікувати вигоди від поліпшення її показників, і всі зусилля спрямовуються на екстенсивний шлях розвитку, на заміщення старої технології, на пошук нових ринків збуту технології й товарів, зроблених з її застосуванням. У зв'язку з масовим поширенням нової технології й техніки, за допомогою якої реалізується ця технологія, вони є новими для широкої публіки, і їх часто кваліфікують як «нову техніку й технологію», хоча вони такими вже не є.

Фаза насичення – це фаза, коли технологія досягає своїх меж. У першу чергу це досягнення меж підвищення технологічних характеристик. Наприклад, подальше зростання потужності можливе тільки за рахунок пропорційного зростання розмірів і маси. Знайти нові застосування технології вже неможливо. У техніко-економічному плані ситуація проявляється в підвищенні собівартості й зниженні продуктивності. Це фаза зменшення рентабельності. Технологія стала «старою».

Іноді пропонують ніби перевернену криву життєвого циклу технології (рисунок 1.3), де більш наочно представляється вичерпання внутрішніх ресурсів розвитку технології.

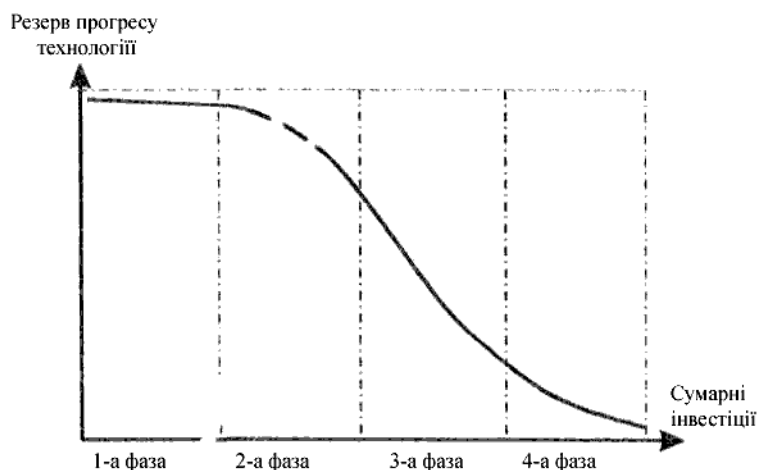


Рисунок 1.3 - Цикл життя технології як оцінка резервів розвитку, що залишилися

Виникає питання – чому технологія має межу свого розвитку?

З одного боку, це результат існування фізичної межі. Цілком очевидно, що як би не вдосконалювалися залізниці і як би не підвищувалася швидкість поїздів, але на поїзді ми ніколи не зможемо проїхати, скажімо, на Місяць. Інерційність електронної лампи обмежує швидкодію обчислювальної техніки, й тому неможливо створити сучасний комп'ютер на її основі. Парова машина, незважаючи на такі конструкторські хитрування, як, наприклад, створення компаунд-машини, вичерпала свої можливості, і спроби прямування за безупинно зростаючими вимогами збільшення потужності приводили до перетворення її в монстра зі зниженням питомих характеристик. Таким чином, оскільки всяка техніка й технологія базуються на фізичному принципі, що має в даних специфічних умовах абсолютну межу, то й вони мають межу свого розвитку.

Але досить часто до суто фізичного обмеження додаються обмеження й іншого роду – економічні, соціальні, екологічні й т.д. Тоді говорять про самонасичення технології. Прикладом такого самонасичення може служити технологія визначення оптимальних обрисів літака, які б дозволяли йому використати в польоті мінімальний опір повітря при заданій швидкості польоту.

В основі цієї технології лежить продувка моделі літака, а краще – натурального зразка в аеродинамічній трубі.

Для оптимізації форми перших літаків досить було декількох десятків хвилин або декількох годин сумарної продувки (рисунок 1.4). У тридцятих роках, наприклад, для літака ДС3 було потрібно біля ста годин продувки, що коштувало близько 100 тис. франків, у сорокових роках для літака В29 продувка тривала близько тисячі годин і витрати склали близько 1 млн франків. Для літаків, що випускали в 60-70-х рр., таких як В52, ДС8, В747, випробування тривали по 10000 год, що становить приблизно один рік безперервної роботи аеродинамічної труби й коштує приблизно 10 млн франків, а для «Шатла», що розроблявся в 70-ті рр., треба було близько 100000 год сумарної продувки, що дорівнює приблизно 10 рокам і коштує до 100 млн франків.

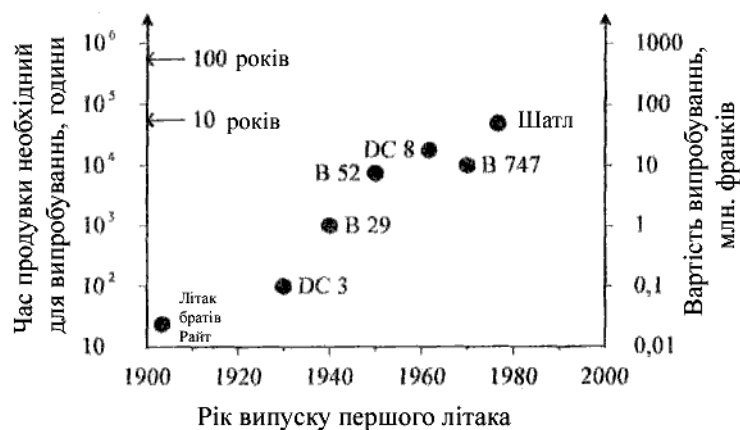


Рисунок 1.4 - Вичерпання можливостей технології продувки в аеродинамічній трубі

Наведені цифри показують, що незважаючи на те, що з фізичної точки зору технологія продувки в аеродинамічній трубі не вичерпала себе, але з урахуванням всіх інших факторів, особливо часових і економічних, ясно видна її криза. Відбулося самонасичення технології.

Таким чином, ми з'ясували основні принципи існування граничних можливостей технологій.

У той же час схема розвитку технології, наведена на рисунку 1.2, не викликає відчуття, що це повний цикл життя технології. Дійсно, крива обривається як би на зльоті, коли характеристики технології хоч і повільно, але ростуть або принаймні залишаються незмінними й найвищими, ніж коли-небудь, колись. Де ж тут спад? Дійсно, дана технологія має в 4-й фазі свого розвитку найвищі характеристики за час свого існування. Але прогрес технологічної системи в цілому вимагає ще більш високих характеристик (рисунок 1.3), які дана технологія, у силу вичерпання свого потенціалу, задовольнити не може, що викликає розрив між вимогами до технології і її можливостями. Тобто дана технологія у своєму розвитку вже не встигає стежити за технологічним оточенням. Якби ця технологія існувала ізольовано, то вона могла б використовуватися як завгодно довго. Але в житті так не буває. В решті-решт виникає криза технології.

Криза привертає до себе підвищену увагу фахівців, які починають інтенсивний пошук шляхів виходу з неї. У результаті з'являється нова технологія (рисунок 1.5,а), яка здатна ліквідувати технологічний розрив, що утворився. При цьому характеристики старої технології не погіршуються, але нова технологія має кращі характеристики. Поява транзисторів не знизила характеристики електронної лампи, але їхні власні характеристики значно вищі.

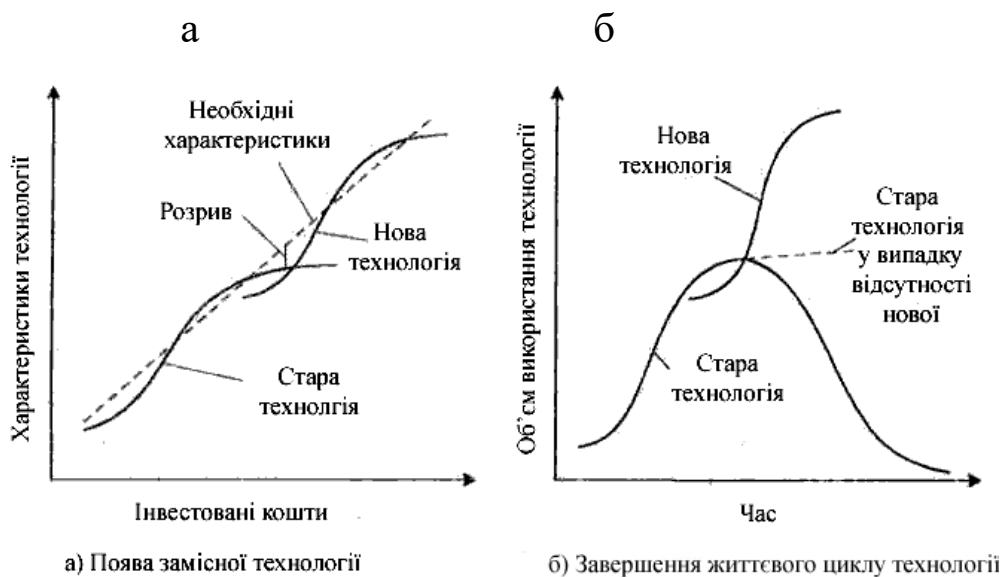


Рисунок 1.5 - Зміна технологій

У результаті появи нової, більш досконалої технології, що теж розвивається не ізольовано, відбувається перерозподіл ролей. Нова технологія відбирає в старій одну галузь використання за іншою, у результаті чого галузь застосування старої технології неухильно скорочується й занепадає (рисунок 1.5,б). Так, на кривій життєвого циклу, побудованій в координатах (обсяг застосування технології/час), з'являється спадна область, що свідчить про завершення життєвого циклу.

Прикладом завершеного життєвого циклу технології може служити історія клепки. У ХІХ і на початку ХХ ст. це був основний технологічний процес утворення нерознімних з'єднань у металевих конструкціях. За допомогою клепки споруджувалися залізничні мости й вокзали, будувалися морські кораблі, вироблялися знаряддя праці й домашнє начиння. За допомогою клепки можна було одержати й герметичні шви при з'єднанні листового металу, що дозволяло виготовляти котли для парових машин, цистерни й т.д. Але для цього клепальник повинен був знати секрети процесу клепки й мати відмінне здоров'я, тому що робота була для нього досить шкідливою, від постійного гуркоту втрачався слух. Для підвищення продуктивності праці й полегшення роботи клепальників процес клепки піддавався вдосконалюванню, головним чином за рахунок його механізації. Спочатку з'явилася машинна клепка, що дозволило значною мірою механізувати даний процес у заводських умовах, а потім і пневматичний молоток, що, будучи ручним інструментом, дозволяв вести монтаж конструкцій у будь-яких умовах.

На рисунку 1.6 наведена схема еволюції технології клепки. Наприкінці ХVІІІ ст. і до середини ХІХ ст. розвивається ручна клепка, за допомогою якої одержують все більшу довжину швів у з'єднаннях листового металу, що відображається на схемі звичайною S-подібною кривою. Але із середини ХІХ ст. спостерігається спад в обсягах виробництва за цією технологією. Це викликано появою й розвитком машинної клепки, яка, так і не досягши обсягів робіт, що виконувалися раніше ручною клепкою, через піввіку змушена була пережити кризу й почати поступатися місцем процесу клепки за допомогою пневматичного молотка, що домінував на початку ХХ ст.

Але, незважаючи на прогрес технології клепок, з початку ХХ ст. загальна довжина клепаних з'єднань, отриманих всіма видами клепок, неухильно знижується, і дана технологія занепадає. Це відбулося через бурхливий розвиток процесу зварювання. Таким чином, ми маємо приклад повного життєвого циклу технології. До шістдесятих років ХХ ст. технологія клепок була повністю замінена процесом зварювання й залишилася тільки в авіаційній промисловості для кріплення обшивки літаків. У цій вузькій ніші вона виявилася конкурентоспроможною .

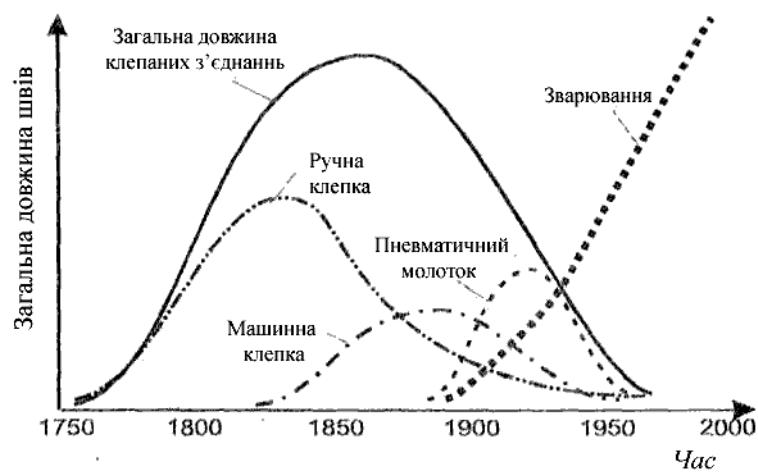


Рисунок 1.6 - Еволюція технології клепок

## ЛЕКЦІЯ 2 ІНТЕГРАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА

### 2.1 Комп'ютерне інтегроване виробництво

Ще декілька років тому дотримувалися тієї думки, що конкурентоспроможність виробництва у вирішальній мірі може бути поліпшена шляхом застосування нових технологій, використання потенціалу електроніки. Орієнтування на нові технології й швидкий прогрес виробничої техніки призвели до виникнення прогресивної й гнучкої концентрації виробництва, що знайшла своє відбиття в концепції комп'ютеризованого інтегрованого виробництва (СІМ). Скорочення тривалості виробничого циклу, зменшення фондів, запасів у поєднанні з виготовленням продукції за принципом «точно вчасно» дало виробництву певні резерви. Одночасно виробничі процеси й верстати стали поєднуватися в складні високопродуктивні системи, в яких технологічні й організаційні ланцюжки усе більше залежать один від одного.

Електроніка дозволила здійснити гнучку автоматизацію шляхом застосування СНС-техніки, гнучких систем виготовлення й збирання. Одночасно із гнучкою автоматизацією на провідних підприємствах знаходять все більше застосування системи обробки інформації. Системи автоматизованого проектування, автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва з повною інтеграцією матеріальних, виробничих і людських ресурсів є стандартом для багатьох підприємств. Інше виробництво, без цих допоміжних систем, було б сьогодні взагалі важко уявити. Лише в неосновних галузях виробництва робочі місця, які не вдалося включити в централізовані системи планування й керування, потрапляють у поле дії персональних комп'ютерів. Найбільшого прогресу в освоєнні СІМ досягли великі підприємства авіа- та автомобілебудування, електронної індустрії. Останнім часом стали процвітати численні приватні підприємства, які дуже далеко просунулися в реалізації СІМ.



У той же час частка інвестицій у комп'ютеризовані системи виробництва досить висока й постійно збільшується. Із усіх технічних інвестицій перевага надається комп'ютеризованим системам виробництва. Виробники верстатів і систем можуть успішно пропонувати на ринку свою продукцію, якщо вона відповідає стандартам автоматизованого робочого місця. Підприємства активно освоюють стратегію комп'ютеризованого виробництва, структура якого безупинно вдосконалюється. Перехід від традиційного виробництва до автоматизованого відбувається нестримно та із всезростаючою швидкістю.

Успіхи були тим значніші, чим наполегливіше запроваджувалися передові організаторські й технічні концепції. У тому випадку, коли успіхи неможливо було визначити в економічних масштабах одного підприємства, було загально визнано, що тільки СІМ може активізувати великі потенціали раціоналізації у всіх сферах виробництва. Висока вартість робочої сили й нетривалий робочий день, а також постійний контроль виконання виробничих завдань прискорюють процес застосування автоматизованого виробництва. Однак повна автоматизація й комп'ютеризація виробництва є ще тільки теорією.

Незважаючи на величезні досягнення у сфері створення СІМ, не всі проблеми виявилися вирішеними. Багато хто очікував значного прибутку від впровадження СІМ, однак реальні витрати стирали грані одержуваного ефекту. Фактичні витрати й тривалість реалізації виявлялися на практиці зовсім не такими, як передбачалося. Тільки дуже невелику кількість проектів удалося реалізувати в намічені терміни і при запланованих обсягах витрат. Процес впровадження такого виробництва іде не настільки успішно, щоб сьогодні говорити про нього як про всеохоплюючу реалізацію концепції. Висока надійність сприяє значному підвищенню продуктивності. «Lean Production» дозволяє робити поліпшення процесу виробництва у вигляді безперервного монотонного або прискореного (стрибкоподібного) зниження витрат шляхом скорочення непродуктивних витрат. Прискорений процес звільняє короткострокові резерви раціоналізації виробництва. За допомогою цих процесів систематично вивчається структура статей «чистої собівартості». Усе, що

безпосередньо не сприяє виготовленню продукції, вважається марними (непродуктивними) витратами й усувається, за винятком найбільш необхідної діяльності непрямих співробітників. У цих процесах безпосередньо відбиваються й реалізуються результати зусиль всієї команди. Як критерії оцінки використовуються: тривалість продуктивного циклу, терміни й витрати на виготовлення, обсяг фондів і якість продукції.

Безперервне вдосконалювання процесу виробництва як основної стратегії поліпшення ефективності виконання замовлень багато підприємств роблять ступінчасто. Вони починають із сегментування (поділу) фірми на самостійні ринково орієнтовані системи збуту й виготовлення. Наступним кроком є оптимізація окремих виробничих процесів. При цьому повинні використовуватися методи й технології майбутньої концепції виробництва. Підвищення оперативної ефективності виробництва за допомогою заходів, реалізованих у короткі терміни, в окремих проектах є третім кроком.

«Lean Production» – японська концепція автоматизованого комп'ютеризованого виробництва. Девізом нової концепції є «Lean Production», або в перекладі «худе виробництво». Це поняття уведене американськими авторами дослідження, які виявили відставання європейської індустрії не внаслідок високої вартості робочої сили, нетривалого робочого часу й інших визначальних умов, а через істотне відставання в технологічному часі виготовлення, якості виготовлення й збирання. Відставання є щодо тривалості часу, витрат на розробку нової продукції. У випадку «Lean Production» необхідна тільки половина часу й витрат для створення нової продукції та потрібна тільки половина людських і матеріальних ресурсів для того, щоб її виготовити. При цьому використовується половина арсеналу засобів виробництва й наполовину знижується кількість дефектів. Ці показники були визначені при порівнянні підприємств традиційного масового виробництва й «Lean Production».

У середньому на японських підприємствах виготовляють легкові автомобілі за половину часу, при цьому допускається істотно менше браку, ніж на підприємствах США і Європи.

Відмітною ознакою «Lean Production» є те, що в основі високої продуктивності лежить погодженість і інтеграція елементів, що беруть участь у процесі виробництва. Оптимізується хід процесу розроблення, виготовлення й зв'язку з постачальниками. Короткий час розроблення досягається завдяки сильному керівництву проектом і погодженими колективними діями виконавців.

«Одночасне проектування» дозволяє зробити паралельними процеси розроблення. До розроблення залучаються постачальники й замовники. Відкриті й швидкодіючі інформаційні комунікації є основним робочим принципом. Необхідно усвідомити, що при цьому відбувається відмова від принципів розподілу праці.

Ступінь автоматизації при виготовленні продукції в «Lean Production» також досить високий, однак автоматизують насамперед процеси. Внаслідок спрощення автоматизація стає безпечною й надійною.

Всі виробничі процеси у своїй основі нестабільні, тому збої у виробництві неминучі. В «Lean Production» швидка й безпосередня реакція на порушення виробничого процесу є одним із принципів виробництва. Завдяки тому, що будь-який співробітник при порушенні технології має право навіть зупинити конвеєр, всі порушення, що гальмують виробництво, виявляються вже на стадії освоєння серійного виробництва. На порушення також негайно реагують системи автоматичного регулювання. Тоді як у виробництві, заснованому на розподілі праці, компетентні фахівці повинні спочатку обговорити проблему, «Lean Production» демонструє безпосередню реакцію на помилки шляхом їхнього систематичного усунення. Безпека й надійність прогресу є вищою метою «Lean Production», і для досягнення цього йдуть навіть на зниження продуктивності. Загальна організація й технологія цього виробництва стає конфліктною й надзвичайно чутливою до будь-яких порушень. Оскільки одночасно з цим процеси переналагодження по можливості скорочуються, автоматизуються або, щонайменше, виконуються паралельно, підприємство, що працює за концепцією «Lean Production», набуває високої гнучкості.

Викладені принципи й реакція виробництва на відхилення від норм припускають децентралізацію відповідальності, погоджені колективні дії та персональну мотивацію. Саме в цьому вирішальна відмінність від традиційної структури виробництва. «Lean Production» більше орієнтовано на працівника, ніж традиційне виробництво, де головне завдання – одержання максимальної продуктивності. «Lean Production» із самого початку залучає постачальників до відпрацьовування всього виробничого процесу. Японські підприємства мають у середньому невелику кількість постачальників. Постачальники також залучаються до відповідальності за витрати. Численні, заздалегідь обговорені, умови поставки та тісний зв'язок з постачальниками надійно оберігають служби постачання основного підприємства від будь-яких несподіванок.

Для «Lean Production» можна сформулювати ряд основних принципів:

- на кожного співробітника покладена максимальна кількість завдань і відповідальність за їхнє виконання;
- недоліки й проблеми у виробництві усуваються негайно;
- велика інформаційна система, якою може скористатися кожний співробітник, забезпечує високу гнучкість і швидку реакцію на порушення або зміни виробничого процесу;
- робочі групи мають високий рівень незалежності;
- виробничий клімат підпорядкований єдиній стратегії підприємства й визначає взаємну відповідальність за якість роботи.

Аналіз цих принципів показує, що інтеграція виробництва й усунення непродуктивних витрат стоять на першому місці. Тут системна технологія вже змістила класичний поділ праці. Для того, щоб мати конкурентоспроможне виробництво, треба навчитися забезпечувати роботу складних комп'ютеризованих виробництв із максимальною продуктивністю і якістю.

Основними компонентами СІМ є:

- гнучкі системи виготовлення й збирання, керовані ЕОМ.
- високоефективні робочі процеси.
- поставка виробів строго за графіком (Just in Time).
- системи постачання й забезпечення продуктивних процесів.
- комп'ютеризовані автоматизовані системи:  
CAD-проекування; CAP-планування; САМ-виробництва;  
CAQ-забезпечення якості; САА-збирання.

## 2.2 Високі технології і їхні робочі процеси

Всі існуючі цільові робочі процеси технології машинобудівного виробництва можна розділити на вісім видів:

- розподіл–дозування матеріалу;
- з'єднання;
- формоутворення;
- зміна механо-фізико-хімічних властивостей матеріалу виробів;
- розмірна обробка;
- збирання;
- контроль, діагностика, випробування.

Кожний виріб машинобудування, що постачається на внутрішній і особливо на зовнішній ринок, в умовах жорсткої конкуренції повинен мати новий рівень властивостей і відповідати всезростаючим вимогам потенційних споживачів до функціональних, екологічних і естетичних властивостей.

Ці тенденції підвищення вимог споживачів до якості виробів знайшли своє відбиття в міжнародних стандартах серії ISO-9000. Одержання такого рівня виробів усе більше пов'язують із нетрадиційними конструкторськими й технологічними рішеннями, реалізація яких не завжди можлива на основі використання технології, устаткування, обладнання загального призначення й т.д., тобто на основі всього того, що становить суть традиційних технологій. У зв'язку із цим все більшу увагу фахівців привертають нетрадиційні технології, створенню яких

передусь нагромадження численних даних фундаментальних і прикладних наук. На відміну від традиційних, частіше аналогових, такі технології називають «наукоємними», «прецизійними», «ультрапрецизійними», «нанотехнологіями» та ін. Назви нових технологій пов'язані з тією або іншою ознакою технологічного процесу або властивостями виробу, що прийнятий авторами як визначальний, при цьому до уваги найчастіше береться гранична точність, забезпечувана даним робочим процесом.

Термін «нанотехнологія» використовується для визначення систем устаткування й технологій інтегрованого виробництва, які забезпечують обробку з точністю близько 1 нм. У більш широкому плані «нанотехнологія» займається системами, нові функції й властивості яких залежать тільки від наноефектів їхніх компонентів, так звучить академічне визначення поняття, яке дає союз німецьких інженерів. Відомо, наприклад, що до світу мікровиробів можуть вести два шляхи: можна з масивної заготовки, наприклад із кремнію, шліфуванням одержати необхідний точний мініатюрний виріб. За цим принципом функціонує системна техніка, що в основному займається структурами з розміром від міліметрів до мікрометрів. Інший можливий шлях: беруться окремі атоми й молекули або часточки з них, а потім як із цеглинок створюються бажані структури. Терміни, що застосовуються до нових технологій, не відбивають усього спектра й нового рівня функціональних та інших властивостей макро- і мікровиробів.

Саме новий рівень функціональних, естетичних і екологічних властивостей виробів при дотриманні економічної доцільності цікавить споживача. Саме цим гарантується конкурентоспроможність нової продукції. Досягненню такого рівня властивостей підкорені всі структурні складові високих технологій.

Найбільш загальною і всіма сприйманою ознакою високих технологій є наукоємність, яка відбиває ту обставину, що високі технології базуються на новітніх результатах фундаментальних і спеціальних прикладних досліджень.

Системність особливо важлива як вимога прецизійності й відповідності вимогам всіх структурних елементів технологічної

системи оброблення й збирання (устаткування, інструмент, оброблюваний матеріал, оснащення, виміри, діагностика, робота виконавчих органів).

Найважливішою ознакою ВТ, безумовно, є робочий процес. Він домінує у всій технологічній системі й повинен відповідати найрізноманітнішим вимогам, але, головне, бути потенційно здатним забезпечити досягнення нового рівня функціональних властивостей виробу. Тут багато можливостей мають ті стійкі й надійні робочі процеси, у яких ефективно використовуються фізичні, хімічні, електрохімічні явища в поєднанні зі спеціальними властивостями інструмента, логічного середовища, наприклад, кріогенне різання, дифузійне формоутворення виробів з алмазів і т.п.

Суттєвою ознакою ВТ є автоматизація, що базується на комп'ютерному керуванні всіма процесами проектування, виготовлення й збирання, на фізичному, геометричному й математичному моделюванні, всебічному аналізі моделей процесу або його складових.

Наявність розглянутої ознаки вимагає системного підходу до її комп'ютерно-інтелектуального середовища, тобто переходу до систем CAD/CAM System. Таким шляхом забезпечується поєднання гнучкості й автоматизації, прецизійності й продуктивності. Очевидно, специфіка високих технологій вимагає спеціалізації таких систем на вузькій групі виробів або ознак.

Системний підхід припускає використання не окремих математичних моделей, а системи взаємопов'язаних моделей з неодмінною параметричною й структурною оптимізацією.

Наприклад, параметрична оптимізація має на меті мінімізацію ряду характеристик процесу розмірної обробки, насамперед енергетичних витрат, мінімізацію товщини зрізів, сили різання й рівня температури, інтенсивності окисних і дифузійних процесів і т.д.

Для високої технології потрібний високий ступінь («глибина») оптимальності для порівняно вузького конкретного діапазону умов і вимог. Базою такої оптимальності можуть бути тільки глибокі спеціальні дослідження в цій сфері, розробка автоматизованих систем наукового забезпечення, яка включає використання світового досвіду, спеціальних методів оптимізації,

методів досягнення прецизійності, технологічного забезпечення функціональних властивостей і ін.

Важливе значення має технічне забезпечення високих технологій, у рамках якого як основні умови реалізації виступають устаткування, інструмент, оснащення, системи діагностики й контролю.

Все це відбувається в рамках основних напрямків розвитку, наприклад, технології розмірної обробки, насамперед створення нових робочих процесів, прецизійного устаткування й засобів технологічного забезпечення нових форм побудови технологічних процесів. Результати розвитку кожного із цих напрямків у поєднанні з новітніми досягненнями науки й суміжних областей техніки є природними джерелами високих технологій.

При цьому прогрес у створенні робочих процесів ВТ, як і традиційних технологій, є визначальним і характеризується найбільш високими темпами:

$$\frac{dPP}{di} \quad \frac{dY}{dx} \quad \frac{dCTЗ}{dt} \quad \frac{dFO}{dt}$$

де кожне відношення становить швидкість розробки відповідно РП – робочих процесів, Y – устаткування, СТЗ – систем технологічного забезпечення, ФО – форм організації технологічного процесу, t – часу.

Якщо потенційні можливості робочого процесу прийняти за його рівень  $U_{рп}$ , то вплив організаційного технічного рівня виробничої системи  $W_{оту}$  на ступінь використання цього потенціалу можна оцінити інтегрованим показником  $n$

$$W_{оту} = n U_{рп}$$

Особливе місце займає спеціально підготовлений персонал. У взаємопов'язаній системі людина – техніка – організація людський фактор висувається на чільну роль насамперед у плані професійної підготовки, комунікабельності, сприйнятливості до нового, здатності переучуватися.



Викладене уявлення про високі технології дозволяє виділити як самостійний розділ технології машинобудування (високі технології в цьому плані безумовно мають свою специфіку, й багато загальних принципів технології машинобудування стають у край недостатніми, а тому їх важко використовувати). Наприклад, принциповою відмінністю високих технологій від аналогових технологій є їх орієнтація на об'єкт індивідуалізація, цільовий характер, більш жорсткий зв'язок з вимогами, що впливають із заданих функціональних, естетичних і екологічних властивостей виробів (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Принципова схема високих технологій

## **ЛЕКЦІЯ 3**

### **СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ**

#### **3.1 Інтегрований робочий процес прискореного формування виробу або його прототипу – Rapid Prototyping**

В останнє десятиліття гнучке ринково орієнтоване виробництво характеризується різноманіттям виготовлення виробів, при скороченні серійності їхнього випуску. У ряді галузей промисловості до 80% деталей виготовляється серіями не більше 50 штук у кожній. Швидку зміну виробів, які поставляються на ринок, що істотно перевершують за функціональними, естетичними, екологічними властивостями попередні, не можна забезпечити тільки за рахунок продуктивності й конкурентоспроможності, але й за рахунок вартості, як це було в 70-ті рр. Сьогодні на передній план виходить застосування новітніх технологій, які можуть істотно скоротити час розробки, освоєння та виготовлення готового виробу. Час розглядається як стратегічна зброя в конкурентній боротьбі, як еквівалент фінансів, якості, продуктивності. Стратегія успіху переміщується від вартості, заснованої на часі, до стратегії, заснованої на нових технологіях, тому що саме нові технології, неробочі процеси, насамперед інтегровані, дозволяють не жертвувати ні вартістю, ні якістю при завоюванні ринку й швидкому реагуванні на його нові вимоги.

Традиційна аналогова технологія не в змозі так реагувати на вимоги ринку. Робочі процеси виготовлення за аналоговими технологіями споконвіку базуються на пошаровому видаленні матеріалу заготівки для одержання деталі заданих розмірів, якості. Створення прототипів виробів, їхніх моделей також вимагає часу.

Час створення продукту (ЧСП) – проміжок часу між виникненням ідеї та впровадженням продукту на ринок – істотно впливає на конкурентоспроможність підприємства. Аналізи вказують, що більш ніж 25 % ЧСП припадає на частку виготовлення прототипів зразків, виготовлення 60 % прототипів і прототипів штампів знову ж становить кілька місяців, тобто

швидке виготовлення прототипів має великий потенціал скорочення ЧСП.

Аналіз циклу створення продукту (ЦСП) показує, що у всіх фазах – від виникнення ідеї продукту аж до його впровадження на ринок – необхідний прототип. Для промислових товарів широкого вжитку ЦСП може бути розділений на 6 фаз. Прототипи, використані в окремих фазах створення, мають різні ознаки щодо кількості екземплярів, властивостей використовуваного матеріалу, а також геометричних, естетичних і функціональних вимог.

У фазі попереднього розвитку багаторазово проробляються насамперед дизайн моделей і геометричних прототипів, які в загальному випадку виробляються в одному екземплярі. Дизайн моделей повинен бути точний тільки за розмірами, а задоволення інших властивостей другорядне. Оскільки функціональні вимоги в цій фазі мають другорядне значення, виробляються такі моделі багаторазово з різноманітних матеріалів моделювання. Використовуються такі моделі для вивчення дизайну ергономіки, а також для перших аналізів маркетингу.

Таким чином, функціональна структура інтегрованого робочого формоутворення виробу може бути подана в такій послідовності:

1) одержання тривимірної математичної моделі виробу. Вона створюється із креслення, за частковими аналітичними залежностями. Якщо виріб придатний, то модель одержують на трикоординатній вимірjuвальній сітці шляхом обмірювання оригіналу скануванням поверхні пошарово;

2) комп'ютерна оптимізація конструкції створюється за програмами згідно з функціональним призначенням, дизайном, іншими вимогами, що ставляться до розроблюваного виробу. Важливість цього етапу визначається ще й тим, що для комп'ютерної оптимізації не потрібна твердотільна модель, що різко скорочує час на проектування;

3) пошарове подання теоретичної моделі сукупністю відносно простих моделей;

4) створення програм комп'ютерного керування рухом робочого «інструмента», за допомогою якого пошарово,

відповідно до сукупності 2-D моделей, буде матеріалізуватися теоретична модель виробу або його прототипу;

5) пошарове одержання одним із способів цілісної твердотільної моделі або виробу, або серії виробів;

б) остаточний виріб або модель одержують наступним уточненням властивостей. Для цього на першій стадії встановлюються розходження властивостей очікуваного прототипу й необхідного виробу за геометричною формою, фізичними, механічними, хімічними та іншими властивостями.

Вихід на основний ринок відбувається в передсерійній фазі залежно від галузі в кількості до 500 штук. Окремі конструктивні елементи виробляються з матеріалу серії за допомогою більш пізнього інструменту й технології. Передсерія необхідна для інтенсивного тесту його й ринку. Ця фаза виробництва необхідна для визначення параметрів оптимізації. Остання вносить деякі коригування кінцевої продукції (зворотний зв'язок), моделей і прототипів, необхідних у рамках створення продукції, як правило, за допомогою звичайних технологій, при комбінації з ливарним виробництвом. Ці моделі вручну збирають та склеюють, зокрема, за допомогою фрезерних верстатів з ЧПУ, копіювальних та токарських верстатів.

Етапи розвитку науки, інформатики, техніки CNC, лазерної техніки дозволили перейти до інтегрованих способів прискореного формоутворення, позбутися декількох фаз створення прототипів. Робочий процес прискореного виготовлення деталей прототипів являє собою органічне поєднання можливостей технологій обробки інформації, трикоординатного моделювання (CAD) і сучасних способів виготовлення. Цей спосіб дозволяє у просторі поєднати або надзвичайно зблизити виготовлення типової або одиничної моделі або деталі й скоротити час на їхнє виготовлення залежно від складності на 30-70 % (рисунок 3.1).

Технологія прискореного формоутворення виробу (моделі, прототипу) базується: на можливості комп'ютерного автоматизованого проектування виробу (за кресленням, аналітичними залежностями, результатами вимірювань), комп'ютерній оптимізації його конструкції, вимогах дизайну, форми,

функціональних властивостей (CAD) трансформації трикоординатної моделі на сукупність двовимірних, двокоординатних моделей; можливості відтворити сукупність пошарових моделей, тобто матеріалізувати всю модель як єдине ціле, як тверdotільний виріб або його прототип (CAM) (рисунок 3.2).

**Високими слід вважати такі технології, які мають сукупність основних ознак, - наукоємність, системність, фізичне й математичне моделювання з метою структурно-параметричної оптимізації, високоефективний робочий процес розмірної обробки, комп'ютерне технологічне середовище й автоматизація всіх етапів.**

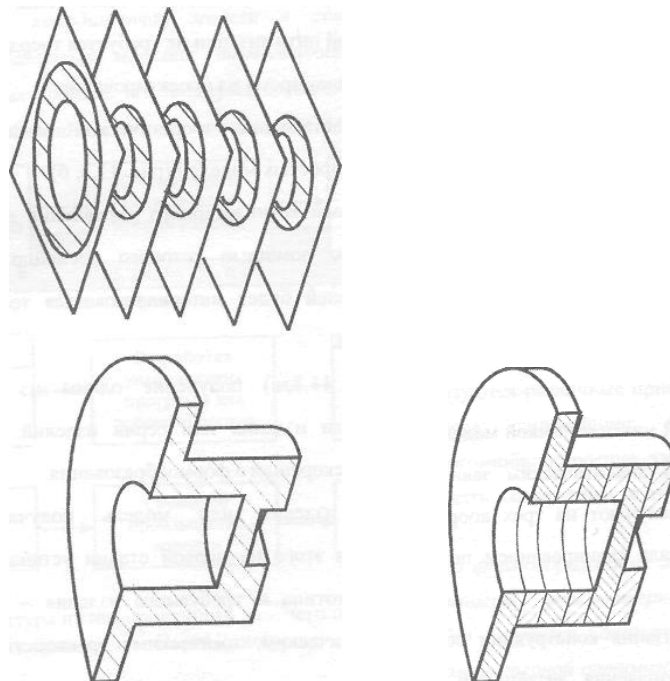


Рисунок 3.1 – Схема формоутворення виробу

<b>Rapid Prototyping Матеріалізація теоретичної моделі - CAM</b>	<b>Розроблення керуючих програм для робочого органа</b>	<b>Трансформація 3-D моделі на двовимірні 2D</b>
<b>Дороблення виробу або прототипу</b>	<b>Серійне виробництво виробу</b>	<b>Вихід на ринок</b>

Рисунок 3.2 – Робочий процес формоутворення

## ЛЕКЦІЯ 4 НАНОТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

### 4.1 Деякі актуальні аспекти розвитку нанотехнологій

Досягнення в розробленні й виготовленні наноструктур різного призначення найбільшою мірою визначаються рівнем розвитку технологій, які дозволяють із атомною точністю одержувати наноструктури необхідної конфігурації та розмірності, а також методів комплексної діагностики властивостей наноструктур, включаючи контроль у процесі виготовлення й керування на його основі, технологічними процесами. За прогнозами, саме впровадження нанотехнологій визначить розвиток промисловості ХХІ ст. подібно до того, як відкриття атомної енергії, винахід лазера й транзистора визначили розвиток промисловості у ХХ ст.

Якщо при зменшенні об'єму якої-небудь речовини по одній, двох або трьох координатах до розмірів нанометрового масштабу виникає нова якість або ця якість виникає в композиції з таких об'єктів, то ці утворення варто віднести до наноматеріалів, а технології їхнього одержання й подальшу роботу з ними – до нанотехнологій. Переважна більшість нових фізичних явищ на наномасштабах виникає із хвильової природи часток (електронів і т.д.), поведінка яких підкоряється законам квантової механіки. Простіше за все це пояснити на прикладі напівпровідників.

Коли по одній або декількох координатах розміри стають порядку і менше довжини хвилі де Бройля носіїв заряду – напівпровідникова структура стає резонатором, а спектр носіїв заряду – дискретним. Те ж саме з рентгенівськими дзеркалами. Товщини шарів, здатних відбивати у фазі рентгенівське випромінювання, лежать у нанометровому діапазоні. В інших випадках виникнення нової якості може бути пов'язане з менш наочними явищами. Гадаємо, що такий підхід дозволяє скласти досить повне уявлення про наноматеріали і можливі галузі їхнього використання.

Використання сучасних конструкційних матеріалів звичайно обмежується тим, що збільшення міцності призводить до зниження пластичності. Дані по наноконструкціях показують,

що зменшення структурних елементів і більш глибоке вивчення фізики деформаційних процесів, які визначають пластичність наноструктурних матеріалів, можуть призвести до створення нових типів матеріалів, що поєднують високі міцність і пластичність.

Аналіз проведених в останні роки вітчизняних і закордонних досліджень свідчить про високу перспективність таких основних напрямків у сфері розроблення конструкційних матеріалів: виготовлення наноструктурних керамічних і композиційних виробів точної форми, створення наноструктурних твердих сплавів для виробництва різальних інструментів із підвищеною зносостійкістю й ударною в'язкістю, створення наноструктурних захисних термо- і корозійностійких покриттів, створення полімерних композитів з наповнювачами з наночасток і нанотрубок, що мають підвищену міцність й низьку займистість.

У лабораторних дослідженнях отримані зразки виробів з нанофазної кераміки (щільність на рівні 0,98-0,99 від теоретичного значення) на основі оксидів алюмінію й ряду перехідних металів. Експериментально підтверджено, що щільна наноструктурна кераміка має підвищену пластичність при порівняно невисоких температурах. Збільшення пластичності при зменшенні розміру часток викликано зсувним переміщенням нанокристалічних зерен одне відносно одного при накладенні навантаження. При цьому відсутність порушення міжзернового зв'язку пояснюється ефективним дифузійним переносом атомів у приповерхневому шарі часток. У перспективі підвищена пластичність означає можливість надпластичного формування керамічних і композиційних виробів, що виключає необхідність праце- і енерговитратної фінішної обробки матеріалів високої твердості.

В останні роки розроблені нанокомпозитні металокерамічні матеріали, зокрема на основі  $WC/Co$  і  $Ti/Fe$ , що значно перевершують за зносостійкістю, міцністю й ударною в'язкістю аналоги із звичайною мікроструктурою.

Підвищені експлуатаційні характеристики нанокомпозитних матеріалів обумовлені утворенням при спіканні специфічних безперервних ниткоподібних структур, що формуються в результаті тривимірних контактів між наночастками різних фаз.

Розроблення й впровадження в промислове виробництво технології створення нанокompозитних виробів буде сприяти вирішенню проблеми виготовлення високоякісних різальних інструментів. Підвищення корозійної стійкості наноструктурних покриттів обумовлено у першу чергу зниженням питомої концентрації домішок на поверхні зерен у міру зменшення їхніх розмірів. Більш чиста поверхня забезпечує більш однорідну морфологію та більш високу корозійну стійкість міжзернових меж. Наноструктурні покриття характеризуються надвисокою міцністю. Один з основних механізмів зміцнення обумовлений ефектом скупчення дислокацій поблизу перешкод, якими при зменшенні розмірів зерен є їхні межі. Важливою перевагою покриттів з нанорозмірною структурою є обумовлена підвищеною пластичністю можливість зниження в них залишкових напруг, що дозволяє виготовляти покриття міліметрової товщини.

Використання диспергованих у полімерній матриці неорганічних наповнювачів з нанорозмірних порошоків дозволяє істотно підвищити вогнестійкість пластмас, що є одним з основних недоліків при використанні їх як конструкційних матеріалів, оскільки продукти згоряння полімерів, як правило, являють собою отруйні речовини. Результати досліджень показують, що зниження горючості може бути доведене до самозагасання полум'я. При цьому нанорозмірні порошоків наповнювачі не знижують механічної міцності й оброблюваності матеріалів. Полімерні нанокompозити мають високу стійкість, що відкриває перспективи їхнього використання для захисту поверхні виробів, які експлуатуються в умовах впливу високих температур.

Сучасний науково-технічний прогрес, безсумнівно, визначається розвитком електроніки, основою якої є досягнення у різних областях фундаментальних наук, головним чином фізики твердого тіла, фізики напівпровідників, а також твердотільної технології. Останні досягнення науки показують, що, на відміну від традиційної мікроелектроніки, потенційні можливості якої в найближче десятиліття, очевидно, будуть вичерпані, подальший розвиток електроніки можливий тільки на базі принципово нових фізичних і технологічних ідей.



Так, протягом ряду десятиліть підвищення функціональної складності й швидкодії систем досягалося збільшенням щільності розміщення й зменшенням розмірів елементів, принцип дії яких не залежав від їхнього масштабу. При переході до розмірів елементів порядку десятків одиниць нанометрів виникає якісно нова ситуація, яка полягає в тому, що квантові ефекти (тунелювання, розмірне квантування, інтерференційні ефекти) впливають на фізичні процеси в наноструктурах і на функціонування приладів на їхній основі.

Багатообіцяючим є також створення наноструктур, у яких роль функціональних елементів виконують окремі молекули. У перспективі це дозволить використати принципи приймання й переробки інформації, реалізовані в біологічних об'єктах (молекулярна наноелектроніка). Нові можливості щодо підвищення потужності, температурної й радіаційної стійкості, розширення діапазону частот, поліпшення ергономічних характеристик приладів відкриває напрямок, у якому синтезуються ідеї й технологічні досягнення вакуумної й твердотільної електроніки (вакуумна наноелектроніка).

Застосовуючи речовини й структури з наперед заданим оптичним спектром можна "набудувати" джерела й приймачі випромінювання, що дозволяє селективно впливати на біологічні й хімічні процеси й одержувати сигнали в необхідних спектральних діапазонах для контролю таких процесів.

Інша важлива обставина полягає в тому, що саме завдяки застосуванню наноструктур вдається використати дуже компактні потужні джерела лазерного випромінювання. Це дозволить розвивати високоточні, економічні й екологічно чисті технології обробки матеріалів. Підкреслимо, що ці ж джерела дуже ефективні для застосування в медицині.

Прогрес у розробленні нано- і мікроелектромеханічних пристроїв і систем обіцяє таку ж революцію в техніці, яку зробила мікроелектроніка в електроніці. Мікроелектромеханіка стала самостійним напрямком 15-20 років тому. Основою цього напрямку є об'єднання поверхневої мікрообробки, розвинутої у мікроелектронній технології, з об'ємною обробкою та використанням нових матеріалів і фізичних ефектів. Бурхливе зростання мікроелектромеханіки, що є по суті міждисциплінарним

напрямок, пов'язане насамперед із широким використанням мікроелектронних технологій із стільниковою мікроструктурою. Такий підхід дозволив за короткий час створити нові об'ємні конструктивні елементи – мембрани, балки, порожнини, отвори з великим аспектним співвідношенням (калібром) за рахунок використання так званих LiGA-технологій на основі синхротронного випромінювання й т.д.

Це забезпечило прорив у сфері мікродвигунів, мікророботів, мікронасосів для мікрофлюїдики, надчутливих сенсорів різних фізичних величин (тиску, прискорення, температури й ін.), мікрооптики. Так, мікромеханічні датчики в сучасних автомобілях є основою систем безпеки (повітряні подушки), контролю за станом коліс, підвіски й т.п. Але найбільш яскравим представником мікроелектромеханічних систем служать зондові сканувальні, які є основою не тільки ряду вимірювальних систем у нанометровому діапазоні, але й технологічних пристроїв для нанотехнологій.

Перехід до наноелектромеханіки пов'язаний з використанням нанотехнології та нових фізичних ефектів. Так, при створенні порожнин – важливого компонента різних пристроїв – використовуються все в більшій мірі процеси, що самоорганізуються (вуглецеві нанотрубки, пористі мембрани на основі оксиду алюмінію). Це дозволяє збільшити відтворюваність, підвищити надійність, оскільки найменші зміни розмірів, пов'язані з використанням традиційних технологій, ведуть до експонентно сильної зміни параметрів.

У розвинених закордонних країнах цьому напрямку приділяється значна увага – створюються дослідницькі інститути, розгорнута підготовка фахівців. У США цими питаннями займаються такі відомі фірми, як Intel, MEMS, Industry Group, Sandia National Labs. Розгляньте коло питань – від ручки без розбрикування чорнила до бездротової передачі даних, оптичних пристроїв керування зброєю та мінісупутників. Агентство перспективних розробок МО США реалізує програму «Розумний пил», спрямовану на створення надмініатюрних пристроїв, здатних генерувати енергію, проводити моніторинг навколишнього середовища, накопичувати й передавати інформацію.

Таким чином, розвиток нано- і мікроелектромеханіки є необхідною умовою розвитку основ нанотехнології.

## **4.2 Керамічні матеріали й нанокераміка**

Технологія створення нових керамічних матеріалів і нанокераміки включає розроблення:

- високоякісних порошків, у тому числі ультра- і нанодисперсних, для виробництва оксидної й безкисневої кераміки із стабільним хімічним, фазовим і гранулометричним складом;
- нових видів арматурних елементів (ниткоподібних кристалів, волокон, мікросфер, дисперсних часток);
- високоміцних термостійких композиційних матеріалів, у тому числі нанокерамічних, на основі тугоплавких сполук нітридів, карбідів, оксидів і високопродуктивних екологічно чистих технологій одержання виробів;
- наукових основ проектування спеціалізованого технологічного устаткування з автоматизованою системою керування й контролю якості керамічних матеріалів і виробів та їхнього виробництва.

### **Призначення, основні функціональні показники**

Нові керамічні матеріали, у тому числі нанокераміка та нанокомпозити, мають унікальні властивості та експлуатаційні характеристики. Вони необхідні як для вдосконалювання існуючих, так і для створення принципово нових технологій і конструкцій. Керамічні матеріали в 1,5-2 рази легше металів, мають високу міцність, жаро-, зносо-, корозійну й ерозійну стійкість, хімічно інертні й придатні для використання в умовах, що лежать за межами можливостей застосування металів (окисні середовища з температурою до 1600° С, поєднання високих температур і великих навантажень).

## **Галузь застосування**

Основними галузями застосування керамічних матеріалів є:

- машинобудування, космічна, інструментальна промисловість (теплонапружені елементи двигунів, зносостійкі пари тертя, фільтри, сопла, бандажі, тиглі, контейнери для плавлення особливо чистих речовин, лезвійний, штамповий, вимірjuвальний і абразивний інструмент);
- хімічна промисловість (каталітичні нейтралізатори й сажеві фільтри ДВЗ, фільтри й мембрани для очищення й поділу різних середовищ, хімічно стійкі деталі насосів і запірної арматури);
- електротехніка (металокерамічні вакуумщільні вузли та електроізолятори, джерела живлення на основі твердих електролітів -  $Al_2O_3$ , конденсатори, п'єзоелементи, резистори);
- медицина (біоімплантати);
- створення військової техніки та засобів індивідуального захисту.

## **Підстави для вибору**

Застосування перспективних керамічних матеріалів дозволить створити нове покоління виробів ракетно-космічної техніки, машин, механізмів і приладів з більш високими якісними характеристиками (продуктивністю, точністю, ресурсом, енерго- і матеріалоемністю). Їхнє використання забезпечує екологічну чистоту технологічних процесів, скорочуються витрати стратегічних дефіцитних металів (вольфраму, молібдену, нікелю, кобальту, міді), енергії, з'являється можливість експлуатувати доступні недефіцитні сировинні джерела.

## **Стан і тенденція розвитку**

Провідні закордонні фірми протягом двадцяти п'яти років проводять великі НДДКР з розроблення й використання перспективних керамічних матеріалів у автомобільній, авіаційній, хімічній, електронній, металургійній промисловості, медицині. Багато робіт здійснюються в рамках національних і міжнародних програм, значна частина яких фінансується

відповідними державами (АТТАР у США, «Місячне світло» у Японії, «Еврика» в Європі). До 1995 р. провідні фірми США, Японії, Німеччини вийшли на якісно новий рівень готовності до широкого впровадження керамічних деталей у серійні двигуни й організації їхнього масового виробництва. Відомо, що у 2000 р. в США було потрібно 165 мільйонів керамічних деталей для автомобілів на суму 1 мільярд доларів, та передбачається, що до 2010 р. це число зросте до 560 мільйонів деталей на суму 3,5 мільярдів доларів. Зараз за кордоном, а саме в Росії та інших країнах, готується промислове виробництво конструкційних керамічних матеріалів для різального інструменту, підшипників та кісткових імплантів.

У 1980-1990 рр. за рівнем розробок нових керамічних матеріалів і нанокераміки СРСР не поступався світовим лідерам у цій галузі – США і Японії. Загальні тенденції розвитку технології створення й виробництва керамічних матеріалів і нанокераміки в Росії в цілому збігаються зі світовими. Основними напрямками розробок є:

- хімічний синтез високочистої сировини, у тому числі ультра- і нанодисперсних порошків оксидів, карбідів, нітридів, а також арматурних елементів – волокон, ниткоподібних кристалів;
- ефективні технології формування, спікання, з'єднання та механічної обробки виробів.

Зараз у Російській Федерації наноматеріали знаходяться у стадії дослідного виробництва, тоді як у найбільш економічно розвинених країнах розгорнуте тоннажне виробництво нанопорошків і виробів з них. Останнім часом тенденція відставання підсилилася, у результаті обсяги застосування керамічних матеріалів у Росії становлять не більше 2% від рівня США.

## **ЛЕКЦІЯ 5**

### **ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРОШКІВ**

#### **5.1 Одержання виробів з ультрадисперсних порошків**

Для одержання матеріалів із щільністю, близькою до 100%, необхідно дотримуватися таких умов:

- 1) використовувати частки 1 мкм, дефектні;
- 2) частки повинні бути одного розміру й форми;
- 3) однаковість розташування часток. Після рівномірного розподілу відразу формувати зразки;
- 4) для обмеження переміщення часток у вихідний матеріал додають другий компонент для зміни фазового складу в області меж зерен;
- 5) забезпечення заданої температури формування або спікання.

Метод спікання належить до методів порошкової металургії

#### **5.2 Види спікання**

- спікання під нормальним тиском (звичайне);
- спікання під тиском (гаряче пресування – немає масового виробництва, графітові форми);
- спікання при ізостатичному пресуванні (гаряче ізостатичне пресування – ГІП, гумові форми);
- спікання при нагріванні електричним струмом;
- рідкофазне спікання. Для прискорення спікання додають другий компонент, що утворює рідку фазу при температурі спікання;
- реакційне спікання. Метод, при якому одночасно здійснюються спікання й твердофазні реакції.

## 5.3 Методи твердофазного синтезу

5.3.1 Метод, при якому тверда речовина служить вихідним матеріалом, що переводиться до пароподібного стану такими фізичними впливами, як теплота або сила механічного удару. Метод називається ФОПФ – метод фізичного осадження з парової фази. Якщо випарювання досягається шляхом нагрівання за допомогою нагрівача, то цей метод називається методом випарювання–конденсації, або методом сублімації. Сублімація – перехід речовини із кристалічного стану безпосередньо (без плавлення) у газоподібний. Сублімація відбувається з поглинанням теплоти (ендотермічна реакція). Якщо процес здійснюється у вакуумі, то метод називають методом вакуумного осадження з парової фази.

До фізичних методів також відносяться:

- метод іонного осадження, у якому використовується тліючий розряд;
- метод розпилення;
- плазмополум'яний метод, у якому застосовується дуговий розряд.

5.3.2 Метод хімічного транспорту в паровій фазі (ХТПФ) – вихідна тверда речовина переводиться до газоподібного стану за допомогою хімічної реакції шляхом додавання компонента, що називається транспортуючим агентом. Осадження твердої речовини здійснюють, проводячи зворотну реакцію в області конденсації.

Відмінна риса цього методу – проведення процесу в запаяній трубці (ампулах).

5.3.3 Метод хімічного осадження з парової фази – ХОПФ (або метод газозфазних реакцій). Вихідними речовинами є певні гази. Осаджуються в результаті хімічної реакції тверда фаза нового складу. Відмінна риса методу ХОПФ – хімічні реакції при конденсації. При низькому (звичайному) тиску ХОПФ проводять в електропечах. Коли реакційні гази вводять у полум'я горіння горючих газів, метод називають полум'яно-хімічним.

5.3.4 ФОПФ – це метод ХОПФ із використанням засобів (електричне поле, лазерне опромінення, плазма й ін.) для керування реакцією.

Методи ХОПФ і ФОПФ використовують при виготовленні плівок (для електронних схем) і порошків (для виготовлення спечених виробів).

У таблицях 5.1, 5.2 зазначено, якими методами можна одержувати продукти реакції в різних формах відповідно з газової фази й з рідкої фази.

Таблиця 5.1 - Синтез осаждением з газової фази

<b>Фізичні методи (ФОПФ)</b>	<b>Хімічні методи (ХТПФ, ХОПФ)</b>
<i>Масивні кристали</i>	
1 Випар–конденсація	1 Хімічний транспорт (ХТПФ) 2 ХОПФ при звичайному тиску
<i>а) Плівки</i>	
1 Випар–конденсація 2 Іонне осадження 3 Розпилення 4 Плазмополум'яний	1 ХТПФ 2 ХОПФ при звичайному Р 3 ХОПФ із використанням плазми (тіючого розряду дуги) 4 ХОПФ із використанням світла (лазер) 5 Активоване реактивне напилювання 6 Хімічне розпилення
<i>б) Волокна</i>	
1 Випарювання–конденсація	1 ХОПФ при звичайному тиску
<i>в) Порошок</i>	
1 Випарювання–конденсація 2 Плазмополум'яний	1 ХОПФ при звичайному тиску 2 ХОПФ при використанні хімічного полум'я 3 ХОПФ із використанням плазми 4 ХОПФ із використанням світла (лазера)



Таблиця 5.2 - Синтез осадженням з рідкої фази

Методи вирощування з розплаву	Методи вирощування з розчину	Методи рідкофазних реакцій
<i>Масивні кристали</i>		
1 Витягування 2 Градієнта температур 3 Плаваючої зони 4 Плавлення в полум'ї 5 Синтезу при надвисокому тиску	1 Охолодження 2 Випарювання 3 Гідротермальний 4 Метод флюсу	1 Гідротермальних реакцій
<i>Плівки</i>		
1 Витягування	1 Метод флюсу	1 Електролізної металізації 2 Безелектролізної металізації
<i>Волокна</i>		
1 Витягування 2 Пульверизації	—	1 Гідротермальних реакцій
<i>Порошок</i>		
1 Метод флюсу	1 Метод флюсу 2 Ліофільного сушіння 3 Сушіння за допомогою розбрикування 4 Сушіння екстракцією розчинника	1 Лужного осадження (гідроліз) 2 Лужного осадження 3 Гідролізу алкоголяту металу 4 Осадження солей органічних кислот 5 Осадження солей органічних сполук 6 Гідротермальних реакцій

#### 5.4 Золь-гельний процес у керамічній і скляній технологіях

Прогрес у галузі матеріалознавства багато в чому пов'язаний із створенням високих технологій. Принципово нові технологічні рішення знаходять, поєднуючи процеси синтезу неорганічної та органічної хімії. Використовуючи золь-гельний процес, створюють нові з комплексом заданих властивостей і поліпшують властивості традиційних матеріалів при одночасному зниженні температури їхнього спікання.

Золь-гельні процеси можуть проходити в системах двох категорій:

- водних – в солях металів;
- у спиртових, – в алкоксидах металів.

Переваги золь-гельної технології:

- 1) висока хімічна однорідність багатокomпонентних систем (на молекулярному рівні);
- 2) висока поверхнева енергія гелів і порошків, що сприяє зниженню температури спікання;
- 3) висока хімічна чистота реагентів;
- 4) можливість одержання продуктів у вигляді: порошків, плівок, мікросфер, скла, волокна;
- 5) висока чистота й однорідність складу продуктів синтезу;
- 6) можливість безпосереднього переходу продуктів синтезу з аморфного до кристалічного стану без введення мінералізаторів;
- 7) можливість синтезу принципово нових матеріалів, різке зниження температури їхнього синтезу;
- 8) можливість керування властивостями синтезованих керамічних матеріалів і стекл.

Золь-гельний метод має ряд недоліків, наведених нижче.

Одним з найважливіших недоліків золь-гельного методу є висока вартість вихідних матеріалів, особливо чистих алкоксидів металів.

До недоліків належить необхідність суворого дотримання послідовності й умов проведення процесу для кожної окремої технології, а також шкідливий вплив на здоров'я людей вихідних органічних розчинників (спирту).

Тривалість процесів у золь-гельному методі є також недоліком методу. Продукти термодеструкції олігомерів не завжди повністю окислюються. Домішки вуглецю й груп –ОН шкідливі для одержання чистих оксидних матеріалів, стекл. Більша усадка гелів також є недоліком, тому що може призвести до розтріскування виробів.

Для отримання заданих фаз і матеріалів можуть бути використані як переваги, так і недоліки золь-гельного методу, його розвиток має дуже широкі перспективи.

### **Терміни**

**Золь–стан**, при якому тверду речовину (порошок) диспергують у великій кількості рідини.

**Гель–стан**, при якому рідина диспергує у великій кількості твердої речовини.

З точки зору системи рідкофазних реакцій стан системи відповідає «золю» тоді, коли частки починають випадати в осад. Утворені частки по одній переносяться в розчинник і розподіляються в ньому рівномірно, врешті-решт виникає стан гелю, утворення якого служить відмінною рисою методу. Перехід з одного стану до іншого називається золь-гельним переходом.

Наприкінці процесу потрібно підтримувати аморфний стан гелю. Досягти його важко, тому що частки, що випадають на початку процесу у вигляді золю, мають високі кристалічні властивості. Процес рідинофазні реакції  $\rightarrow$  золь  $\rightarrow$  гель супроводжується поступовим збільшенням упорядкованості або ступеня полімеризації.

Полімеризація – послідовне приєднання молекул продуктів гідролізу. У результаті полімеризації можуть утворюватися лінійні й просторові структури.

Золь-гельний метод важко застосувати у випадку, коли в системі рідкофазних реакцій починаються процеси зародкоутворення й росту кристалів з утворенням часток, що характеризуються високими кристалічними властивостями.

Початок систематичних досліджень в області золь-гельної технології в кераміці відноситься до 60-х рр., в області скла – до 70-х рр. ХХ ст. З 1981 р. щорічно проводяться конференції, присвячені золь-гельному методу, у т.ч. з ультраструктурних процесів отримання кераміки, скла й композиційних матеріалів; з хімічних способів виготовлення кераміки; зі способів виготовлення скла і ситал на основі гелів і т.д.

## 5.5 Золь-гельний метод одержання особливо чистих речовин

Найбільш простою системою, яка використовується для здійснення процесу, є трикомпонентна ТЕОС–вода–спирт або двокомпонентна система ТЕОС–вода, що характеризується областю незмішуваності. Це визначає вибір концентрацій компонентів для одержання гомогенних розчинів. Гідроліз ТЕОС можна здійснювати будь-якою кількістю води. Залежно від призначення продуктів золь-гельного процесу обирають задану кількість води для гідролізу та каталізатори. Каталізаторами служать кислоти й луки. ТЕОС – тетраетоксисилан або алкоксид кремнію (рисунок 5.1).

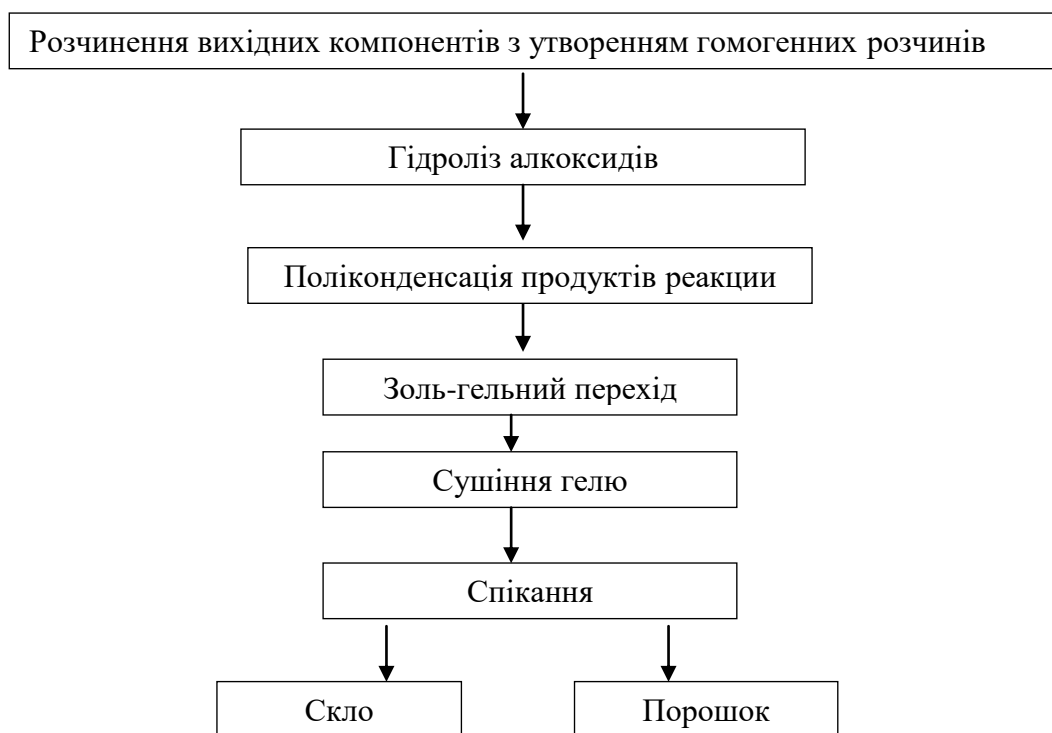
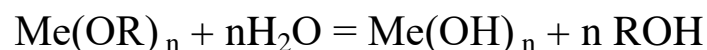
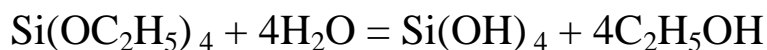


Рисунок 5.1 - Загальна схема золь-гельного процесу

Алкоксиди металів піддаються гідролізу за рівнянням:

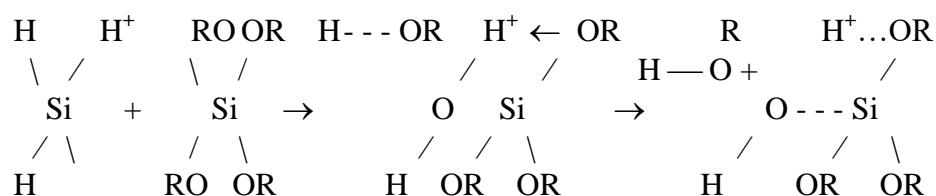


або для ТЕОС

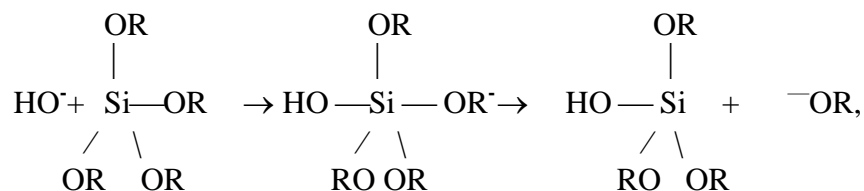


Монолітні стекла, порошки  $\text{SiO}_2$  з багатокомпонентних складів одержують із розведених розчинів гідролізату при кислому або лужному гідролізі. Гідроліз при кислотному каталізаторі здійснюється за механізмом електрофільного заміщення, при лужному – нуклеофільного.

### 1 Електрофільний механізм реакції гідролізу



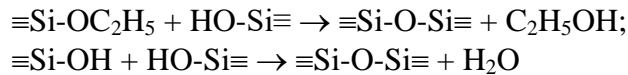
### 2 Нуклеофільний механізм реакції гідролізу



де R – H або  $\text{Si}(\text{OR})_3$

У цьому випадку відбувається «інверсія» тетраедра: під дією атаки гідроксилу алкоксигрупа відходить від протилежної сторони тетраедра.

У зв'язку з утворенням силанольних груп  $\text{Si}-\text{OH}$  рН розчину може змінюватися. Одночасно з реакцією гідролізу починається поліконденсація, й ці процеси не можна розділити в часі. Силоксанові зв'язки утворюються відразу після появи силанольних груп у результаті їхньої взаємодії між собою або з етоксигрупами. При цьому спостерігається полімеризація.



Молекули води й спирту, що утворилися, знову беруть участь у процесі гідролізу. При цьому каталізатор впливає не тільки на швидкість гідролізу, але й на структуру продукту поліконденсації: у кислому середовищі утворюються лінійні полімери (звичайно), в лужній – розгалужені кластери. У кислому середовищі розгалужені кластери можуть також утворитися в процесі поліконденсації сильно розведених розчинів (коли  $\text{H}_2\text{O}:\text{TEOS} = 20:1$ ). З розчинів з низьким вмістом води при кислому гідролізі утворюються лінійні полімери, з розведених розчинів при кислому й лужному гідролізі (каталізі) – розгалужені кластери.

Зазначені реакції ведуть до утворення круглих кремнеземистих часток у золі, а потім у результаті їхньої коагуляції - до гелеутворення. Золь-гельний перехід, як уже підкреслювалося, важко точно помітити. Найчастіше його спостерігають візуально за зміною в'язкості в часі. На в'язкість розчинів і золів впливають співвідношення: вода, ТЕОС, вид каталізатора, температура гідролізу й навколишнього середовища та інші фактори.

Питання про механізм золь-гельного переходу належить до найбільш складних і маловивчених. Цей перехід завершується, коли однофазна рідина перетворюється на двофазний гель, що складається із твердої й рідкої фаз. Цей гель може бути перетворений на двофазний ксерогель або аерогель (тверда фаза + газова). Перехід необоротний і проходить без зміни об'єму, він проявляється в збільшенні в'язкості, але про нього не можна судити тільки за значенням в'язкості.

## ЛЕКЦІЯ 6 СУЧАСНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

### 6.1 Електрофізичні й електрохімічні методи обробки

У машинобудуванні часто виникають технологічні проблеми, пов'язані з обробкою матеріалів і деталей, форму та з'єднання поверхневого шару яких важко одержати механічними методами. До таких проблем належить обробка досить міцних, дуже в'язких, ламких і неметалевих матеріалів, тонких і нежорстких деталей, пазів і отворів, що мають розміри в кілька мікрометрів, поверхонь деталей з малою шорсткістю або малою товщиною дефектного поверхневого шару. Подібні проблеми вирішуються застосуванням електрофізичних і електрохімічних (ЕФЕХ) методів обробки. Для здійснення розмірної обробки заготовок ЕФЕХ методами використовують електричну, хімічну, звукову, світлову, променеву та інші види енергії.

ЕФЕХ методи обробки успішно доповнюють обробку різанням, а в окремих випадках мають переваги над нею. При ЕФЕХ методах обробки силові навантаження або відсутні, або настільки малі, що практично не впливають на сумарну погрішність точності обробки. Методи дозволяють не тільки змінювати форму оброблюваної поверхні заготовки, але й впливати на стан поверхневого шару. Так, наприклад, оброблена поверхня не зміцнюється, дефектний шар незначний, видаляються підпали поверхні, отримані при шліфуванні, й т.п. При цьому підвищуються зносостійкі, корозійні, міцнісні й інші експлуатаційні характеристики деталей. Кінематика формоутворення поверхонь деталей ЕФЕХ методами обробки, як правило, проста, що забезпечує точне регулювання процесів і їхню автоматизацію. ЕФЕХ методи обробки універсальні й безперервні, дозволяють виконувати одночасне формоутворення всіх оброблюваних поверхонь. На оброблюваність заготовок ЕФЕХ методами, за винятком ультразвукового та деяких інших, твердість і в'язкість оброблюваного матеріалу практично не впливають. У промисловості широко застосовують комбіновані методи обробки, які дають значно більший ефект, ніж кожний з методів окремо. Відзначимо, що в деяких ЕФЕХ методах обробки

можлива не досить повна провідність, через яку здійснюється іскровий розряд енергії, накопиченої конденсатором. Тривалість імпульсу становить 20–200 мкс. При збільшенні ємності конденсатора накопичений у ньому запас енергії збільшується й, отже, підвищується продуктивність процесу. Залежно від кількості енергії в імпульсі режим обробки ділять на твердий або середній — для попередньої обробки й м'який або особливо м'який — для оздоблювальної обробки. М'який режим обробки дозволяє одержувати розміри з точністю до 0,002 мм при шорсткості поверхні 0,63–0,16 мкм. Обробку ведуть у ваннах, заповнених діелектричною рідиною. Рідина виключає нагрівання електродів (інструмента й заготівки), охолоджує продукти руйнування, зменшує величину бічних розрядів між інструментом і заготівкою, що підвищує точність обробки. Для забезпечення безперервності процесу обробки необхідно, щоб зазор між інструментом-електродом і заготівкою був постійним. Для цього електроіскрові верстати оснащують системою, що стежить, і механізмом автоматичної подачі інструмента. Інструменти-електроди виготовляють із мідно-графітових і інших матеріалів. В ерозійних верстатах використовують різні генератори імпульсів електричних розрядів: RC (резистор-ємність); RLC (L — індуктивність); LC; лампові генератори. У промисловості застосовують широкодіапазонні транзисторні генератори імпульсів. Ці генератори споживають потужність 4-18 кВт при силі струму 16-125 А. Продуктивність обробки становить 75-1900 мм<sup>3</sup>/хв при шорсткості обробленої поверхні 4-0,2 мкм.

Електроіскровим методом обробляють практично всі струмопровідні матеріали, але ефект ерозії при тих самих параметрах електричних імпульсів різний. Залежність інтенсивності ерозії від властивостей металів називають електроерозійною оброблюваністю. Якщо прийняти електроерозійну оброблюваність сталі за одиницю, то для інших металів її можна подати в таких відносних одиницях: тверді сплави — 0,5; титан — 0,6; нікель — 0,8; мідь — 1,1; латунь — 1,6; алюміній — 4; магній — 6.



Електроіскровим методом доцільно обробляти тверді сплави, важкооброблювані метали й сплави, тантал, молібден і інші матеріали. Електроіскровим методом одержують наскрізні отвори будь-якої форми поперечного перерізу, глухі отвори й порожнини, фасонні порожнини й отвори із криволінійними осями, вирізують заготовки з листа при використанні дротового або стрічкового інструмента-електрода, виконують плоске, кругле й внутрішнє шліфування, ріжуть заготовки, таврують деталі. Електроіскрову обробку застосовують при виготовленні штампів, прес-форм, різального інструменту. Зміцнення полягає в тому, що на поверхню виробів наносять тонкий шар якого-небудь металу, сплаву або композиційного матеріалу. Подібні покриття підвищують твердість, зносостійкість, жаростійкість, ерозійну стійкість і інші характеристики виробів.

## 6.2 Електроімппульсна обробка

При цьому способі використовуються електричні імпульси великої тривалості (500-10000 мкс), у результаті чого відбувається дуговий розряд. Більші потужності імпульсів, одержуваних від електронних або машинних генераторів, забезпечують високу продуктивність обробки. Застосування генераторів і графітових електродів, а також обробки при зворотній полярності дозволило зменшити руйнування електродів (рисунок 6.1).

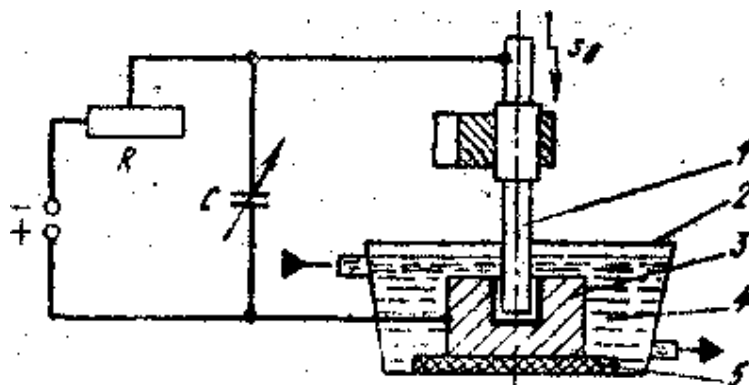


Рисунок 6.1 – Схема електроімппульсної обробки

Електроімпульсну обробку доцільно застосовувати при попередній обробці штампів, турбінних лопаток, фасонних отворів у деталях з жароміцних сплавів.

Точність розмірів і шорсткість оброблених поверхонь залежать від режиму обробки. При електроімпульсній обробці знімання металу в одиницю часу у 8-10 разів більше, ніж при електроіскровій обробці.

### **6.3 Високочастотна електроімпульсна обробка**

Даний спосіб застосовують для підвищення точності й зменшення шорсткості поверхонь, оброблених електроерозійним методом. Метод заснований на використанні електричних імпульсів малої потужності при частоті 100-150 кГц. Продуктивність методу в 30-50 разів вище, ніж при електроіскровому методі при значному збільшенні точності й зменшенні шорсткості. Зношування інструмента незначне.

Високочастотний електроіскровий метод застосовують при обробці деталей із твердих сплавів, тому що він виключає структурні зміни та утворення мікротріщин у поверхневому шарі матеріалу оброблюваної заготовки

### **6.4 Електроконтактна енергія**

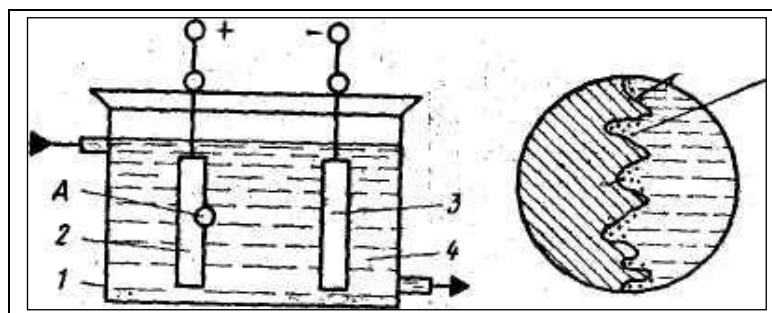
Спосіб заснований на локальному нагріванні заготовки в місці контакту з електродом-інструментом і видаленні розм'якшеного або навіть розплавленого металу із зони обробки механічним способом (відносним рухом заготовки й інструмента). Джерелом теплоти в зоні обробки служать імпульсні дугові розряди. Електроконтактну обробку оплавленням рекомендують для обробки великих деталей з вуглецевих і легованих сталей, чавуну, кольорових сплавів, тугоплавких і спеціальних сплавів.

Метод не забезпечує високої точності і якості поверхні, але дає високу продуктивність знімання металу.

## 6.5 Електрохімічні методи обробки

Електрохімічні методи обробки (ЕХО) засновані на законах анодного розчинення при електролізі. При проходженні постійного електричного струму через електроліт на поверхні заготовки-аноду, включеної в електричний ланцюг, відбуваються хімічні реакції, і поверхневий шар металу перетворюється на хімічну сполуку. Продукти електролізу переходять у розчин або видаляються механічним способом. Продуктивність процесів ЕХО залежить в основному від електрохімічних властивостей електроліту, оброблюваного струмопровідного матеріалу й щільності струму.

**Електрохімічне полірування** (рисунок 6.2) виконують у ванні, заповненій електролітом. Залежно від оброблюваного матеріалу електролітом можуть бути розчини кислот або лугів.



1 – ванна; 2 – оброблювана заготовка; 3 – пластина-електрод;  
4 – електроліт; 5 – мікрорівності; 6 – продукти анодного розчинення

Рисунок 6.2 - Схема електрохімічного полірування

Оброблювану заготовку підключають до анода; електродом-катодом служить металева пластина із свинцю, міді, сталі. Для більшої інтенсивності процесу електроліт підігрівають до температури 40-80 °С.

Після подачі напруги на електроди починається процес розчинення матеріалу заготовки-анода. Розчинення відбувається головним чином на виступах мікронерівностей поверхні внаслідок більш високої щільності струму на їхніх вершинах. Крім того, западини між мікрорівностями заповнюються

продуктами розчинення: оксидами або солями, що мають знижену провідність. У результаті вибіркового розчинення, тобто більшої швидкості розчинення виступів, мікронерівності згладжуються й оброблювана поверхня набуває металевого блиску. Електрополірування поліпшує електрофізичні характеристики деталей, тому що зменшується глибина мікротріщин, поверхневий шар оброблюваних поверхонь не деформується, виключаються зміцнення й термічні зміни структури, підвищується корозійна стійкість.

Електрополірування дозволяє одночасно обробляти партію заготовок по всій їхній поверхні. Цим методом отримують поверхні деталей під гальванічні покриття, доводять робочі поверхні різального інструменту, виготовляють тонкі стрічки й фольгу, очищають і декоративно обробляють деталі.

Електрохімічну розмірну обробку виконують у струмені електроліту, який прокачують під тиском через міжелектродний проміжок, утворений оброблюваною заготовкою-анодом і інструментом-катодом.

Струмінь електроліту, що безупинно подається в міжелектродний проміжок, розчиняє солі, що утворюються на заготовці-аноді, і видаляє їх із зони обробки. При цьому способом одночасно обробляється вся поверхня заготовки, яка перебуває під активним впливом катода, що забезпечує високу продуктивність процесу. Ділянки заготовки, що не потребують обробки, ізолюють. Інструменту надають форму, зворотну формі оброблюваної поверхні. Формоутворення поверхні відбувається за методом відбиття (копіювання), при якому відсутнє зношування інструмента, оскільки таким є струмінь електроліту.

## **6.6 Анодно-механічна обробка**

При **анодно-механічній обробці** заготовці й інструменту надають такого ж руху, як при звичайних методах механічної обробки різанням. Електроліт подають у зону обробки через сопло (рисунок 6.3).

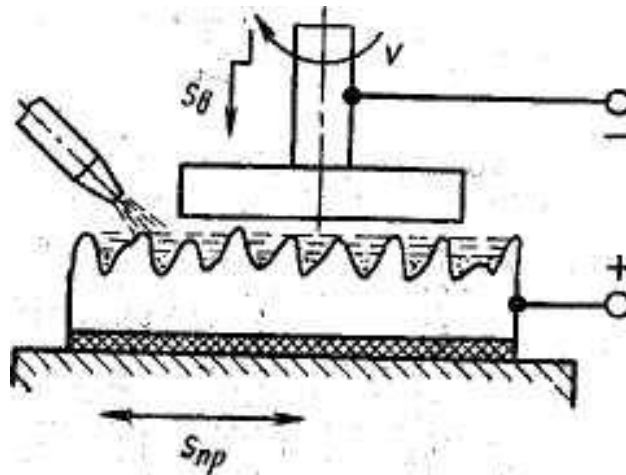


Рисунок 6.3 - Схема анодно-механічної обробки плоскої поверхні

При пропусканні через розчин електроліту постійного електричного струму відбувається процес анодного розчинення, як при електрохімічній обробці. При зіткненні інструмент-катода з мікронерівностями оброблюваної поверхні заготовки анода відбувається процес електроерозії, властивий електроіскровій обробці. Крім того, при пропусканні електричного струму метал заготовки в точці контакту з інструментом розігрівається так само, як при електроконтактній обробці, і матеріал заготовки розм'якшується. Продукти електроерозії й анодного розчинення видаляються із зони обробки при відносних рухах інструмента й заготовки.

Анодно-механічним способом обробляють заготовки із всіх струмопровідних матеріалів, високоміцних і важкооброблюваних металів і сплавів, в'язких матеріалів.

У верстатах для анодно-механічної обробки використовують системи ЧПУ. Програма здійснює керування швидкостями рухів заготовки й інструмента, підтримує сталість зазора в робочому просторі між ними, задає параметри електричного режиму при переході з чорнової обробки на чистову.

Анодно-механічним методом ріжуть заготовки на частини, прорізають пази й щілини, обточують поверхні тіл обертання, шліфують плоскі поверхні й поверхні, що мають форму тіл обертання, полірують поверхні, заточують різальний інструмент.

## 6.7 Ультразвукова обробка

Процес ультразвукової обробки полягає в тому, що інструмент коливається з ультразвуковою частотою та ударяє по зернах абразиву на оброблюваній поверхні, які сколюють частки матеріалу заготовки (рисунок 6.4).

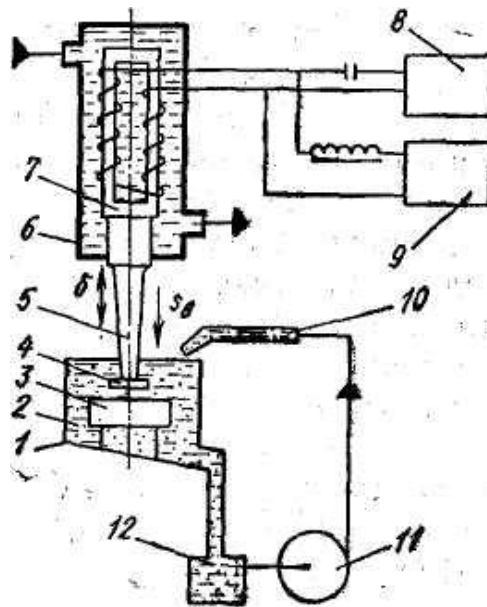


Рисунок 6.4 - Схема ультразвукової обробки

Заготовку 3 поміщають у ванну з інструментом-пуансоном 4. Інструмент закріплений у магнітострикційному сердечнику 7 у кожусі 6, крізь який прокачують воду для сердечника. Для порушення коливань сердечника магнітострикційного перетворювача служить генератор 8 ультразвукової частоти й джерело постійного струму 9. Абразивну суспензію 2 подають під тиском по патрубку 10 насосом, який омиває суспензію з резервуара 12.

Прокачування суспензії виключає осідання абразивного порошку на дні ванни й забезпечує подачу в зону обробки абразивного матеріалу, гравітаційні явища в рідині сприяють інтенсивному перемішуванню абразивних зерен під інструментом, заміні зносостійких зерен новими, а також руйнуванню оброблюваного матеріалу. Ультразвуковим методом

обробляють ламкі тверді матеріали: скло, кераміку, ферити. Ультразвуковим методом обробляють наскрізні та глухі отвори будь-якої форми поперечного перерізу, фасонні порожнини, ріжуть заготовки на частини, профілюють зовнішні поверхні, гравірують, прошивають отвори з криволінійними осями, нарізають різьблення.

Робочі рухи для зазначених видів обробки: швидкість різання  $v$  (рух абразивних зерен у напрямку оброблюваної поверхні) і рух подачі  $s$  при обробці отворів, порожнин;  $s_{np}$  при розрізуванні заготовок;  $s_n$  і  $s_{np}$  при розрізуванні заготовок по складній траєкторії.

Робочі інструменти для обробки отворів діаметром 0,5- 20 мм виконують суцільними; діаметром 20–100 мм – порожніми (обробка за способом трепанації). Пази довбають, а заготовки ріжуть ножеподібними пуансонами; внутрішні порожнини обробляють пуансонами, форма торців яких зворотна формі оброблюваної поверхні. Інструменти виготовляють із загартованих (HRC 35-40), але в'язких матеріалів. Точність розмірів і шорсткість поверхонь, оброблених ультразвуковим методом, залежать від зернистості використовуваних абразивних матеріалів і відповідають точності й шорсткості поверхонь, оброблених шліфуванням.

## 6.8 Променеві методи обробки

До променевих методів формоутворення поверхонь деталей машин відносять електронно-променеву й світлопроменеву (лазерну) обробку.

Електронно-променева обробка заснована на перетворенні кінетичної енергії спрямованого пучка електронів на теплову. Висока щільність енергії сфокусованого електронного променя дозволяє обробляти заготовки за рахунок нагрівання, розплавлення та випарювання матеріалу з вузьколокальної ділянки. Схема установки для електронно-променевої обробки (електронної гармати) показана на рисунку 6.5. У вакуумній камері 1 установки, що живиться від джерела, забезпечується емісія вільних електронів. Електрони формуються в пучок

електродом 10 і під дією електричного поля, створюваного високою різницею потенціалів між катодом 11 і анодом, прискорюються в осьовому напрямку. Промінь нейтронів проходить систему юстування 9, діафрагму 8, коректор зображення 7 і магнітні лінзи 6, які остаточно регулюють потік електронів у промінь малого діаметра й фокусують на поверхні заготовки 4, закріпленої в пристосуванні 3 столу 2. Промінь переміщається по поверхні заготовки відхильною системою 5, яка може керуватися системою ПУ. Система ПУ також керує поздовжніми й поперечними переміщеннями стола, на якому закріплена заготовка, тривалістю імпульсів та інтервалами між ними. При розмірній обробці заготовок установка працює в імпульсному режимі, що забезпечує локальне нагрівання заготовки, у процесі обробки температура досягає 6000 °С, а на відстані від кромки променя не перевищує 300°С. Тривалість імпульсів та інтервали між ними підбирають так, щоб за один імпульс встиг нагрітися й випаруватися метал тільки під променем. Тривалість імпульсів становить  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  с, а частота 50–6000 Гц. Діаметр сфокусованого електронного променя – кілька мікрометрів.

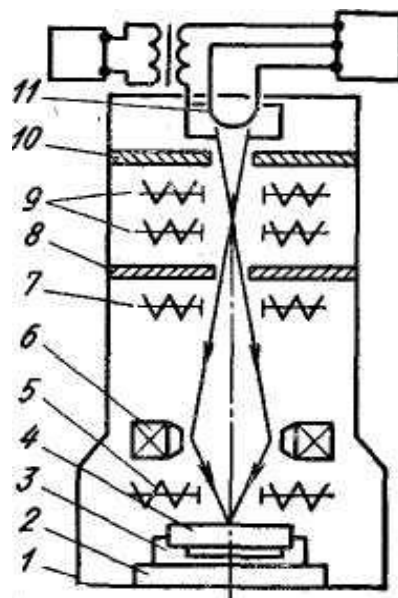


Рисунок 6.5 - Схема електронно-променевої обробки



Світлопроменева (лазерна) обробка заснована на тепловому впливі світлового променя високої енергії на поверхню оброблюваної заготовки. Джерелом світлового випромінювання служить лазер – оптичний квантовий генератор (ОКГ). Створені конструкції твердотільних, газових і напівпровідникових ОКГ. Їх робота заснована на принципі стимульованого генерування, світлового випромінювання.

Атом речовини, маючи певний запас енергії, перебуває в стійкому енергетичному стані й розташовується на певному енергетичному рівні. Для виведення атома із стійкого енергетичного стану його необхідно збудити. Збудження («накачування») активної речовини здійснюють світловою імпульсною лампою.

Збуджений атом, одержавши додатковий фотон від системи накачування, випромінює відразу два фотони, в результаті чого виникає своєрідна ланцюгова реакція генерації лазерного випромінювання.

Для механічної обробки використовують твердотільні ОКГ, робочим елементом яких є рубіновий стержень, що складається з оксидів алюмінію, активованих 0,05 % хрому. Рубіновий ОКГ працює в імпульсному режимі, генеруючи імпульси когерентного монохроматичного червоного кольору. При увімкненні пускового пристрою ОКГ електрична енергія, запасена в батареї конденсаторів, перетворюється на світлову енергію імпульсної лампи. Світло лампи фокусується відбивачем на рубіновий стержень, і атоми хрому приходять у збуджений стан. Із цього стану вони можуть повернутися в нормальний, випромінюючи фотони з довжиною хвилі 0,69 мкм (червона флуоресценція рубіна).

Взаємодія фотонів із збудженими атомами дає лавиноподібні потоки фотонів у різних напрямках. Наявність торцевих дзеркальних поверхонь рубінового стержня приводить до того, що при багаторазовому відбитті підсилюються вільні світлові коливання в напрямку осі стержня рубіна внаслідок стимулювання збудженими атомами. Через 0,5 мс більше половини атомів хрому приходять у збуджений стан, і система стає нестійкою. Вся запасена в стержні рубіна енергія одночасно вивільняється, і кристал випускає сліпуче яскраве червоне світло.

Промені світла мають високу спрямованість. Розбіжність променів звичайно не перевищує 0,1 мм. Системою оптичних лінз промінь фокусується на поверхні оброблюваної заготовки (рисунок 6.6).

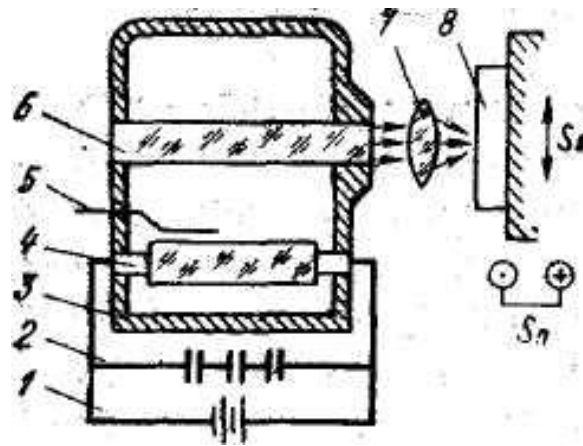


Рисунок 6.6 - Схема лазерної обробки

Енергія світлового імпульсу ОКГ звичайно невелика й становить 20–100 Дж, але вона виділяється в мільйонні частки секунди й зосереджується в промені діаметром  $\sim 0,01$  мм. У фокусі діаметр світлового променя становить усього кілька мікрометрів, що забезпечує температуру 6000–8000 °С.

## 6.9 Плазмова обробка

Сутність обробки полягає в тому, що плазму (повністю іонізований газ), що має температуру 10000-30000 °С, спрямовують на оброблювану поверхню заготовки.

Плазму одержують у плазмотронах (рисунок 6.7). Дуговий розряд збуджується між вольфрамовим електродом 5 і мідним електродом 4, виконаним у вигляді труби, який охолоджується проточною водою. У трубу подають газ (аргон, азот) або суміш газів. Обтискаючи дуговий розряд, газ при з'єднанні з електронами іонізується та виходить із сопла плазмотрона у вигляді яскравого струменя 2, що спрямовується на заготовку 1, яка підлягає обробці.

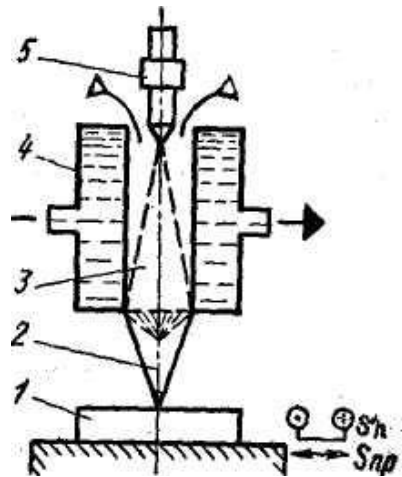


Рисунок 6.7 - Схема плазмової голівки

Плазмовим методом обробляють заготовки з будь-яких матеріалів, виконуючи прошивання отворів, вирізування заготовок із листового матеріалу, стругання, гостріння. При прошиванні отворів, прорізуванні й вирізуванні заготовок голівку встановлюють перпендикулярно до поверхні заготовки, при струганні й гострінні – під кутом 40–60°.

Принципово новим методом виготовлення деталей є плазмове напилювання. У камеру плазмотрона подається порошкоподібний конструкційний матеріал і одночасно інертний газ під високим тиском. Під дією дугового розряду конструкційний матеріал плавиться та переходить у стан плазми.

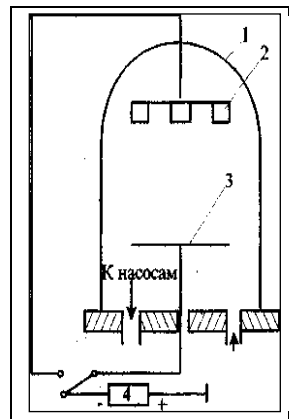
Струмінь плазми стискується в плазмотроні плазмоутворюючим газом. Виходячи з сопла, струмінь плазми спрямовується на екран. Системи вертикальної й горизонтальної розгорток забезпечують переміщення струменя по площі розгорток.

### 6.10 Іонне (катодне) розпилення

Метод полягає в розпиленні бомбардуванням іонами газорозрядної мішені з матеріалу, що наноситься, та наступному осадженні часток на поверхні виробів. Іонні розпилювальні системи класифікують за кількістю електродів (діодні, тріодні,

тетродні), за видом використаної напруги (постійна, змінна, високочастотна), за способом збудження плазми (із самозбудженням, з додатковим розрядом, з автономними іонними джерелами), за наявністю або відсутністю потенціалу на підкладці (із зсувом і без).

У найбільш простому випадку система розпилення складається із двох електродів, які поміщені у вакуумну камеру (рисунок 6.8). Матеріал, що підлягає напилюванню 3, розташовують на катоді. На іншому електроді (або окремо) встановлюють підкладку, наприклад, інструменти. Вакуумну систему відкачують до вакууму (0,005 Па) і наповнюють робочим газом, за який найчастіше використовують аргон, до тиску близько 0,5 Па. Потім на електрод з інструментами подають негативний потенціал і бомбардуванням іонами аргону роблять їхнє очищення. При цьому відбувається розпилення органічних і неорганічних забруднень поверхні. Після очищення підкладки негативний потенціал прикладають до мішені й розпилюють її. Частки, які розпорошуються, ежектуються через плазму розряду, осаджуються на інструментах і утворюють поверхню.



- 1 – вакуумна камера; 2 – оброблювані деталі;  
3 – подача газу на матеріал; 4 – джерело живлення

Рисунок 6.8 - Схема іонного (катодного) розпилення

## **ЛЕКЦІЯ 7**

# **ВИДИ Й ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НЕРУЙНУЮЧОГО КОНТРОЛЮ**

### **7.1 Основи неруйнуючого контролю**

Застосуванню неруйнуючого контролю (НК) передую розроблення моделі, що відображає зміну властивостей матеріалів і виробів за характерними ознаками. НК полягає в перевірці фізичним методом відповідності показників якості контрольованої продукції встановленим вимогам без порушення її властивостей, функціонування й придатності до застосування.

Неруйнуючий контроль заснований на одержанні інформації про якість матеріалів і виробів, що перевіряють, при взаємодії їх з речовинами або фізичними полями у вигляді електричних, світлових, звукових або інших сигналів. Сучасні методи НК відповідно до ГОСТ 18353-79 підрозділяються на дев'ять основних видів: радіаційний, акустичний, магнітний, вихрострумний, електричний, радіохвильовий, тепловий, оптичний, проникаючими речовинами, капілярний та ін. Методи кожного виду НК класифікують за характером взаємодії фізичних полів або речовин з контрольованим об'єктом, первинними інформативними ознаками і способами одержання первинної інформації.

Якість матеріалів і виробів формується на всіх етапах їхнього створення й експлуатації – проектування, виготовлення й споживання. У процесі контролю порівнюють вихідні або проміжні характеристики продукції з розрахунковими або встановленими даними, зазначеними в стандартах або технічних умовах. На промислових підприємствах відповідно до ГОСТ 16504-74 застосовують вхідний, операційний і приймальний контроль. Вхідний контроль призначений для виключення неякісних матеріалів, дефектних виробів, що надходять із інших підприємств або ділянок виробництва до початку виробництва.

Операційний (технологічний) контроль призначений для оцінки продукції в процесі її виготовлення. Значне поширення отримує активний операційний контроль. Вимірювальні прилади активного контролю подають інформацію про характеристики

одержуваного матеріалу або виробу, а система зворотного зв'язку автоматично управляє виробничим процесом.

Приймальний контроль застосовують для готової продукції після закінчення всіх технологічних операцій. Контроль може бути суцільним або вибіркоvim. Перший передбачає перевірку кожної одиниці продукції. Вибірковий контроль доцільний при стабільному технологічному процесі в масовому або серійному виробництві. Норма вибірки визначається на підставі експлуатаційних даних, аналізу технологічного процесу, вартості контролю й виробу. Розмір вибірки, а також умови приймання партії деталей визначаються методами статистичного контролю. У процесі експлуатації виробів проводять профілактичний, регламентований і цільовий контроль.

Аналіз контрольованої продукції дозволяє виділити деякі загальні ознаки для широкої номенклатури застосовуваних матеріалів з різними фізичними властивостями (матеріалознавські), різними видами дефектів типу несучільностей (дефектоскопічні), розмірами, формою перехідних ділянок (концентратори), товщиною (геометричні), технічним станом, величиною й характером напружено-деформованого стану, ознаками передруйнування (експлуатаційні).

Вірогідність контролю залежить від інтенсивності зміни контрольованих показників і фізичних властивостей матеріалу при зміні умов навантаження, обробки, експлуатації, а також від вибору фізичного поля або явища, що максимально реагує на ці зміни. Вибір і застосування методу контролю обумовлюються такими факторами: агрегатним станом контрольованого середовища (газоподібне, рідке, тверде); видом матеріалу (діелектрик, провідник, магніт і т.п.); видом структури контрольованого матеріалу (монокристалічна, крупноструктурна); здатністю взаємодіяти з наведеним полем або застосовуваною речовиною; умовами контролю (у вакуумі, при високих температурах, тиску); розмірами, конфігурацією й конструктивними особливостями об'єкта контролю; видом вирішуваного завдання (діагностика, структуроскопія, вологометрія).

У сучасних умовах при великому розмаїтті методів і приладів необхідний ретельний аналіз для вибору найбільш ефективного та економічного НК. Принцип вибору методів НК матеріалів і виробів ґрунтується на їхніх класифікаційних ознаках. Основними ознаками є: характер взаємодії фізичних полів або речовин з контрольованим об'єктом, первинна інформативна характеристика, індикація первинної інформації, остаточна інформація. Кожний метод має свою сферу найбільш ефективного застосування.

Раціональне використання комплексу неруйнуючих методів контролю дозволяє в деяких випадках збільшити його ефективність. При цьому поняття комплектності не обмежується тільки поєднанням методів НК із метою дублювання результатів контролю. Під комплексним контролем мають на увазі раціональне поєднання різних неруйнуючих методів, які можуть і повинні забезпечити достовірну оцінку якості виробу в цілому.

За контрольованими параметрами застосовувані засоби неруйнуючого контролю поділяються на прилади й установки, призначені для виявлення дефектів типу порушень суцільності (тріщини, раковини, розшарування, плівки, пористість, осередки корозії, пухкість і т.д.), контролю геометричних характеристик (зовнішні й внутрішні діаметри, товщина стінки, покриттів, шарів, ступінь зношування й т.д.), вимірювання фізико-механічних і фізико-хімічних характеристик (електричні, магнітні й структурні параметри, відхилення від марки матеріалу й хімічного складу, вимір твердості, пластичності коерцитивної сили, контроль якості зміцнених шарів, склад та розподіл феритної фази й т.п.), технічної діагностики для передбачення виникнення різного роду дефектів, у тому числі порушень суцільності, зміни розмірів і фізико-механічних властивостей виробів на період їх експлуатації.

Однією із сучасних тенденцій у використанні техніки, яка застосовується при випробуваннях, є заміна руйнуючих випробувань неруйнуючими. Руйнуючі випробування зразків дозволяють установити відповідність експлуатаційних характеристик виробу обмірюваним. Якщо ці зв'язки встановлені, то НК дає можливість різко скоротити обсяг і періодичність випробувань руйнуючими методами. Установлення зв'язків між

змiнами параметрiв фiзичного поля або речовини та характеристиками контрольованої продукцiї при їхнiй взаємодiї становить фiзичнi основи дефектоскопiї.

## 7.2 Радiацiйний контроль

Радiацiйний контроль заснований на реєстрацiї й аналізі iонiзуючого випромiнювання при його взаємодiї з контрольованим виробом. До iонiзуючих випромiнювань належать рентгенiвськi й гамма-випромiнювання, а також потоки заряджених або нейтральних часток .

Рентгенiвське випромiнювання є електромагнiтним випромiнюванням i виникає в рентгенiвськiй трубцi при гальмуванні прискорених електронiв. Кiнетична енергiя електронiв, що гальмуються, перетворюється на електромагнiтну енергiю, яка випромiнюється у виглядi фотонiв.

Гамма-випромiнювання, як i рентгенiвське, являє собою електромагнiтне випромiнювання високої енергiї, що має велику проникаючу здатнiсть. Джерелами гамма-випромiнювання є радiоактивнi iзотопи.

Альфа-випромiнювання – це потiк позитивно заряджених ядер атомiв гелiю, що вилiтають iз ядра радiоактивного атома. Альфа-частинки мають велику енергiю, однак вони характеризуються малою проникаючою здатнiстю.

Бета-випромiнювання являє собою потiк електронiв або позитронiв, що утворюються в результатi розпаду нестабiльних ядер. Iонiзуюча здатнiсть бета-частинок значно нижча, нiж альфа-частинок.

Нейтронне випромiнювання – потiк нейтральних часток (нейтронiв), що мають велику проникаючу здатнiсть. Залежно вiд енергiї нейтрони piдроздiляються на тепловi (повiльнi) i швидкi. Тепловi нейтрони добре поглинаються такими речовинами, як бор i кадмiй. Швидкi нейтрони сповiльнюються воднем i речовинами, що мiстять водень.



### 7.3 Дифракція в керметах

У цьому випадку необхідно розглядати дифракцію від двох різних кристалічних структур, решітки яких можуть бути пов'язані або не пов'язані одна з одною і можуть бути пружно перекручені, а також дифракцію від області зчленування кристалів різних фаз, що може бути чітко окресленою або розмитою й у загальному випадку не точною. Ці завдання можна розв'язувати на підставі феноменологічного підходу або обрати модель двофазної структури, яка була б досить простою, щоб її можна було використати в загальних рівняннях дифракції. Автори роботи пропонують класифікувати дифракційні ефекти й особливості контрасту в керметах за типом зчленування, що існує між решітками двох фаз.

За даними роботи, ідентифікацію типу кристалічної структури методом мікродифракції в просвічувальному електронному мікроскопі доцільно проводити тоді, коли дослідження можливе лише в локальній одиничній мікроділянці зразка. Якщо другі фази являють собою хоча й дрібні, але рівномірно розподілені однотипні частки, то більш точну інформацію дає картина рентгенівської дифракції, при якій розподіл може досягати 60 нм. Для ідентифікації більш дрібних часток можна застосовувати метод електронної мікроскопії.

### 7.4 Ефекти контрасту в керметах

Розгляд фольги композиційних матеріалів у просвічувальному електронному мікроскопі, як правило, пов'язаний з ефектом контрасту від часток другої фази.

Частка другої фази, що перебуває в матриці, може викликати появу контрасту двох типів – за рахунок зміни амплітуди й фази хвиль у колонках кристала, що проходять через частку, і за рахунок зміни амплітуди й фази хвиль, що проходять через колонки кристала поблизу частки, де кристал спотворений через присутність часток. Перший тип прийнято називати контрастом на виділенні, другий – матричним. Різниця між цими типами контрасту є досить значною, оскільки матричний

контраст виникає тільки при наявності пружної деформації решітки й тому може бути інтерпретований аналогічно контрасту на дислокації, а контраст на виділенні більш складний і не має нічого спільного з контрастом від інших дефектів решіток.

Контраст за рахунок різниці структурних факторів виникає тоді, коли когерентне виділення має структурний фактор, відмінний від структурного фактора матриці, і, отже, іншу екстинційну довжину (наприклад, утворення у твердому розчині незалежно від температури спікання руйнуються по міжфазних і міжзернових межах).

У роботі показано, що метод ПЕМ – ефективний спосіб вивчення кристалічної структури керметів. Було розроблено метод тонких фольг і проведено електронно-мікроскопічне дослідження структури сплаву ВК20К на електронних мікроскопах Тев1а-8613 при прискорювальній напрузі 100 кВ та Тев1а-8540 при напрузі 120 кВ. Фольги готувалися методом іонного бомбардування після попередньої механічної обробки зразка алмазною пастою й алмазною шкуркою до товщини 0,1-0,15 мм. Проводилося двостороннє іонне полірування – травлення зразків у вихідному стані й після зношування. Однак при підготовці зразків після зношування алмазним доведенням попередньо знімали шар з боку, протилежного зношеній поверхні. У процесі наступного двостороннього іонного полірування зі зношеного боку знімали лише незначний шар, отже, фольги одержували безпосередньо в зоні, що цікавить, зі зміненою при зношуванні структурою.

У структурі фаз WC і Co після спікання утворюються дислокації й двійники, що пояснюється великими термічними напругами, які з'являються при охолодженні твердого сплаву після спікання через розходження коефіцієнтів термічного розширення зерен карбиду вольфраму й прошарків металевого кобальту. Збільшення кількості дислокацій і двійників, а також дроблення двійників у фазах Co і WC після зношування підтверджують, що їх зношуванню передують пластична деформація. У структурі сплаву після спікання, а також у поверхневому шарі після зношування між зернами карбиду WC і прошарками Co-фази на поверхні карбиду WC був виявлений карбід WC, що дозволяє припустити існування найтоншого перехідного шару, близького до чистого вольфраму.

## 7.5 Растрова електронна мікроскопія

Електронна фрактографія широко використовується для металографічних досліджень матеріалів і при вивченні механізму їх руйнування. Вона дає можливість вивчати структуру матеріалів на різних стадіях їх одержання, починаючи з вихідних часток і закінчуючи готовим виробом, не змінюючи при цьому вихідної структури. Фрактографічні дослідження мають переваги й при вивченні фізичної природи матеріалу. Останнім часом їх обсяг у матеріалознавстві істотно збільшився за рахунок застосування растрових електронних мікроскопів.

У растровій електронній мікроскопії (РЕМ) зображення будується по точках і є результатом взаємодії електронного пучка з поверхнею зразка. Спостережувана область послідовно опромінюється електронним пучком мікроскопа, який рухається, подібно скануванню в телебаченні.

### Принцип дії

Пучок електромагнітного випромінювання рухається по поверхні зразка вздовж розташованих близько одна від одної ліній, що утворюють растр. Падаюча хвиля взаємодіє з поверхнею зразка, у результаті чого може бути поглинена, відбита, розсіяна, диспергована або поляризована. Зразок може активізуватися й емітувати аналогічне або відмінне від падаючого випромінювання. Результат взаємодії пучка – сигнал, пропорційний ступеню прояву одного з перелічених ефектів, уловлюється спеціальним чутливим пристроєм і підсилюється. Потім цей сигнал використовується для модуляції інтенсивності, що записується, наприклад інтенсивності електронного пучка катодно-променевої трубки, який рухається по її екрану синхронно із скануючим пучком мікроскопа. Якщо поверхня зразка має властивості, які викликають поглинання, відбиття, розсіювання назад, дисперсію, емісію або поляризацію, що змінюються від точки до точки, налаштованої на відповідний ефект, виникає зображення, що представляє об'єкт ніби видимим при «освітленні» використовуваним випромінюванням.

Принцип роботи растрового мікроскопа заснований на головних властивостях електронного потоку: потоки електронів можна відхиляти електричними або магнітними полями. У сучасних мікроскопах використовуються відхильні електронно-магнітні системи, зручні в експлуатації, оскільки їх можна встановити поза вакуумною колоною. Крім того, використовується можливість зменшення діаметра пучка до необхідного розміру на поверхні зразка, що досягається фокусуванням або електромагнітними лінзами.

## 7.6 Просвічувальна електронна мікроскопія

Для вивчення керметів застосовуються три методи просвічувальної електронної мікроскопії (ПЕМ) – непрямого, напівпрямого й прямого дослідження матеріалу. Непряме дослідження проводять за допомогою реплік поверхневого рельєфу, які відображають тільки поверхневу топографію зразка, напівпряме – також за допомогою реплік, але із включенням дисперсних фаз, зафіксованими репліками в положеннях, які вони займали у вихідному зразку в його протравленій поверхні (електронографічно можна визначити кристалічну структуру включень); пряме дослідження проводять на зразках, приготовлених у вигляді тонкої фольги.

Електронний мікроскоп аналогічний оптичному, але з тією різницею, що для освітлення зразка замість світла з довжиною хвилі близько 500 нм застосовуються електрони з ефективною довжиною хвилі близько 0,5 нм. Це означає, що електронний мікроскоп потенційно може мати в  $10^6$  разів кращу роздільну здатність, ніж оптичний.

Істотне поліпшення роздільної здатності порівняно з оптичним мікроскопом дозволило використати електронний мікроскоп як досить ефективний інструмент для вивчення мікроструктури композицій, тому що він дозволяє спостерігати особливості структури на атомарному рівні.

Сучасні електронні мікроскопи мають величезний діапазон збільшень (від 1000 до 200 000) і високу роздільну здатність,

дозволяють вивчати зразок методами електронної дифракції й темного поля. Це дає істотну інформацію.

### **7.7 Принцип роботи**

При опроміненні зразка електронним пучком електрон може пройти через речовину, не взаємодіючи з нею; зазнавати пружного розсіювання – змінювати напрямок руху без зміни енергії; може продифрагувати – відхилитися в обраному напрямку, обумовленому структурою кристалічного зразка; зазнати непружного розсіювання – змінити як напрямок руху, так і енергію, а також бути поглиненим. Видимий контраст при спостереженні зразка може бути обумовлений кожним із цих процесів, крім першого. В електронних мікроскопах звичайно застосовуються електромагнітні лінзи – магнітні котушки із залізними полюсними наконечниками, іноді - електростатичні лінзи. Для забезпечення досить значної величини вільного пробігу електронів уся система повинна перебувати у вакуумі не менше 10 Па. Освітлювальною системою служить електронна гармата, що складається з нагрівальної нитки, оточеної екраном, на який подається потенціал зсуву. Нижче розташований заземлений анод з отвором у центрі, через який прискорені електрони потрапляють у колону мікроскопа.

### **7.8 Основні типи контрасту зображення**

Топографічний контраст для всіх емітованих електронів обумовлений зміною інтенсивності сигналу, що реєструється при зміні кута нахилу елемента поверхні до падаючого пучка, оскільки коефіцієнти вторинної електронної емісії й відбиття залежать від величини кута цього нахилу. У відбитих електронах спостерігають характерне тіньове зображення рельєфу, оскільки відбиті електрони, рухаючись до детектора по прямолінійних траєкторіях, не потрапляють на детектор з ділянок, закритих перешкодою. Коефіцієнт вторинної електронної емісії вторинних електронів при зміні кута нахилу ділянки поверхні, що підлягає

бомбуванню, до падаючого пучка значно змінюється, траєкторія їх скривлена, тому в описуваному випадку їм надається перевага. Контраст зображення подібний візуальному: западини темні, виступи відкидають тіні. Зображення в растровому мікроскопі сприймається як тривимірне, об'ємне.

При спостереженні в РЕМ гострі вершини й ребра рельєфу зображуються занадто яскраво. Це результат крайового ефекту, пов'язаного з підвищеним виходом і більш ефективним уловлюванням на детекторі електронів з опуклостей, що випускають електрони, об'єм для яких більше, а робота виходу електронів нижче, ніж для плоских ділянок. Крайовий ефект підсилюється при підвищенні енергії первинних електронів і зниженні атомного номера об'єкта, часто приводить до втрати окремих деталей зображення й зниження роздільної здатності.

### **Застосування методу**

Найцікавішим прикладом порівняльних досліджень мікроструктур ламкого руйнування методами растрової й просвічувальної мікроскопії по репліках є робота. Автори на підставі детального аналізу переваг і недоліків обох методів показують, як вибрати найбільш результативний метод для вирішення різних питань матеріалознавства, щоб визначити області раціонального (роздільного або спільного) його застосування.

Дослідження проводили на електронних мікроскопах просвічувального типу 1ЕМ-6А, НИ-200Т і растровому 5И-10. Насамперед авторами була проведена оцінка фрактографічних досліджень як методу контролю процесів спікання матеріалів. Звичайно в подібних випадках аналізують по фрактограмах такі мікроструктурні характеристики, як розміри й морфологія кристалів складових фаз, розподіл пористості, а також характер взаємодії по межах, ступінь розвитку й міцність міжзернових контактів. У роботі встановлено, що при дослідженні на РЕМ різкість зображення граней, що дозволяє проводити надійну ідентифікацію мікроструктурних складових матеріалів і оцінювати їхню зміну в процесі спікання, зменшується зі збільшенням електричного опору матеріалу.

Поряд з електричним опором на різкість зображення мікроструктурних елементів у зломі матеріалів впливає пористість. Зі збільшенням пористості різкість зображення зростає. Однак автори встановили, що спостережуване на РЕМ-фрактограмах зображення мікроструктурних елементів (при розмірах менше 2 мкм) є недостатньо чітким для проведення кількісного аналізу. При розмірах менше 2 мкм окремі зерна часто не роз'єднуються, при розмірах менше 1 мкм спостерігаються переважно агрегати зерен, тому розміри, визначені на РЕМ, можуть бути в 1,5–2 рази більше визначених на ПЕМ по репліках: для матеріалів з розміром зерен більше 2 мкм результати визначення добре узгоджені. Проте через швидкість і легкість препарування можливості вивчення маломіцних та високопористих зразків дослідженням на РЕМ надається перевага для якісного аналізу мікроструктурних змін у процесі спікання матеріалів (наприклад, відносної зміни розміру зерен, форми й розподілу пор, включень), що особливо важливо, на думку авторів роботи, на початкових стадіях розробки технології одержання матеріалів. Показано, що аналіз мікроструктур руйнування по репліках дозволяє ідентифікувати такі субструктурні характеристики матеріалів, як двійники, субмежі, домени, визначити їхній вплив на розвиток тріщин відколу.

Дослідженнями на РЕМ мікроструктур руйнування матеріалів встановлено, що й у цьому випадку чіткість зображення різних елементів мікрорельєфу відколу залежить від електричного опору матеріалів при близьких розмірах кристалів. Найбільш чітке зображення мікрорельєфу спостерігається для електропровідних матеріалів. РЕМ- і ПЕМ-мікроструктури відколу показують, що й для таких матеріалів зображення по репліках містять більше інформації, ніж зображення на РЕМ. Це, як показано в роботі, елементи мікрознімків і фрагментації на поверхнях відколу, характер зародження й просування тріщин у кристалах, що дозволяють уявити механізм взаємодії.

Дослідження мікроструктур руйнування на РЕМ через легкість і швидкість підготовки зразків-препаратів, а також можливість використання зразків значних розмірів можна проводити для якісного й кількісного (при розмірі

мікроструктурних елементів більше 2 мкм) аналізу матеріалів на різних стадіях спікання й оцінки міцності міжчасткових контактів, а також для вивчення механізму формування й поширення магістральних тріщин, спостереження тріщин на поверхні руйнування. Дослідження мікроструктур руйнування за допомогою ПЕМ по репліках доцільно використовувати для мікроструктурних досліджень матеріалів, у тому числі високодисперсних (розмір мікроструктурних елементів менше 2 мкм), для виявлення субструктурних дефектів у кристалах (двійників, доменів усередині кристалітних пор, включень) по мікроструктурах відколу і їх впливу на розвиток тріщин для вивчення процесів взаємодії на межі зерен поряд з дослідженнями з відкольними частками, що витягають на репліку з поверхні руйнування, для прямого вивчення механізмів спікання матеріалів і механізмів їхньої деформації, а також руйнування.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Крыжний Г.К. Стратегический технологический менеджмент: Учеб. пособие. – Харьков: ХГП У, 1999.
- 3 Грабченко А.И. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Учеб. пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 448 с.
- 4 Семченко Г.Д. Современные процессы в технологии керамики: Учеб. пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 80 с.
- 5 Кислый П.С., Боднарук Н.И., Боровикова М.С. Керметы. – К.: Наук. думка, 1985. – 272 с.
- 6 Белокур И.И., Коваленко В.А. Дефектоскопия материалов и изделий. – К.: Техника, 1989. – 192 с.
- 7 Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирования надежности конструкций из композиционных материалов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 260 с.

В.М. Остапчук, Л.А. Тимофєєва, Е.С. Геворкян

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛИ ТА ЗАСОБИ  
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

*КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ*

Відповідальний за випуск Геворкян Е.С.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 27.09.07 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 4,5. Обл.-вид.арк. 4,75.

Замовлення № Тираж 50 Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК 2874 від 12.06.2007 р.

Друкарня УкрДАЗТу,

61050, Харків - 50, пл. Фейєрбаха, 7