

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 1 / 76

## **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»

протокол від 19 червня 2024 р.  
№ 4

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з навчальної дисципліни «Технологічні методи забезпечення надійності обладнання галузі»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «магістр»  
спеціальності 131 «Прикладна механіка»,  
освітньо-професійні програми «Прикладна механіка»,  
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки  
(назва факультету)  
кафедра механічної інженерії  
(назва кафедри)

Рекомендовано на засіданні  
кафедри механічної інженерії  
(назва кафедри)

01 травня 2024 р., протокол № 5

Розробник: докт. техн. наук, проф. **ПОЛОНСЬКИЙ Леонід**  
(науковий ступінь, посада, ПРІЗВИЩЕ, власне ім'я)

Житомир  
2024

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 2 / 76

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
Тема 1. Значення проблеми надійності для машин .....	4
Тема 2. Класифікація відмов. Поверхневий шар та його особливості .....	13
Тема 3. Зношування. Природа, класифікація та закономірності зношування .....	20
Тема 4. Пари тертя .....	25
Тема 5. Змащувальні матеріали .....	30
Тема 6. Нафтові і ненафтові мастила .....	33
Тема 7. Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин способами пластичного деформування та нанесенням поверхневих покривів .....	41
Тема 8. Поліпшення експлуатаційних властивостей наплавлених і напилених газотермічними покриттями деталей машин, обробкою різанням алмазними та надтвердими інструментальними матеріалами .....	71

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 3 / 76

Поліпшення статичної міцності виробів за рахунок конструкторських заходів не завжди рівноцінне підвищенню їх довговічності, тому що зі зростанням межі міцності збільшується ймовірність втомного та крихкого руйнування. Використання високоміцних матеріалів обмежується їх чуттєвістю до концентрації напруг, до різного роду дефектів поверхонь. Тому при виготовленні об'єктів виробництва, яким необхідні висока зносостійкість та опір змінним і динамічним навантаженням, корозійна стійкість під впливом силових факторів, особливого значення набуває комплексне вирішення конструкторських задач і пошук технологічних методів зміцнення, що враховують явище спадковості.

Раціональний вибір методів зміцнення та впровадження їх у практику машинобудування дозволяє у широких межах змінювати зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість та інші експлуатаційні властивості виробів. Нанесення шарів металу або іншого матеріалу з високими фізико-механічними властивостями гарантує не тільки необхідний термін служби машин, але й дозволяє відновлювати номінальні розміри та експлуатаційні характеристики деталей під час ремонту. Досвід виробництва і експлуатації машин свідчить, що зміцнення поверхонь тертя контактуючих елементів значною мірою підвищує їх надійність і довговічність. Кожному виду відмов деталей машин зараз можна підібрати і метод зміцнення з метою зменшення або повної ліквідації шкідливого впливу концентраторів напруг або поліпшення умов взаємодії пар тертя. Зміцненням можна підвищувати зносостійкість у тих випадках, коли вичерпані резерви зростання довговічності за рахунок вибору того або іншого матеріалу. Раціональним вибором методу зміцнення можна зменшити трудомісткість виготовлення і металоємність деталей машин, а, отже, і самих машин та агрегатів.

Сучасний арсенал технологічних методів поліпшення надійності виробів налічує до 10 напрямків і до 120 різновидів способів виконання оздоблювально-зміцнювальних операцій, що дозволяють не тільки поліпшувати мікрорельєф поверхонь, але й змінювати будову та властивості поверхневих прошарків металу у необхідному напрямку і створювати шари з наперед заданими властивостями та оптимальним мікрорельєфом.

Курс лекцій розрахований на 16 год.

## Тема 1. Значення проблеми надійності для машин

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 4 / 76

1. Значення проблеми надійності для машин.
2. Надійність машин. Поняття і показники.
3. Причини втрати машиною працездатності.

**1. Значення проблеми надійності для машин.** Однією з основних проблем машинобудування є проблема надійності. Для сучасних машин характерні такі напрямки їх розвитку, як збільшення ступеня автоматизації, підвищення робочих параметрів — навантажень, швидкостей, температур, боротьба за малі габарити і масу, підвищення вимог до точності функціонування, до ефективності їх роботи (продуктивність, потужність, коефіцієнт корисної дії (ККД)), об'єднання машин у системи з одним центром керування. Ускладнення машин і зростання вимог до них призвели до необхідності підвищення вимог і до їх надійності та довговічності.

**Надійність** — це поняття, що відображає властивість машини зберігати необхідні якісні показники протягом усього періоду експлуатації.

Вирішення проблеми надійності машин — це значний резерв підвищення ефективності виробництва, продуктивності суспільної праці.

Ненадійна машина не зможе ефективно функціонувати, тому що кожна її зупинка через пошкодження окремих елементів або погіршення технічних характеристик нижче допустимого рівня, як правило, тягне за собою великі матеріальні збитки, а в окремих випадках може мати катастрофічні наслідки.

На сьогодні промисловість навіть передових країн несе величезні збитки через недостатню надійність і довговічність машин, що виготовляються. Наприклад, за весь період експлуатації витрати на ремонт і технічне обслуговування машин у зв'язку з їхнім зносом у декілька разів перевершує вартість нової машини, зокрема, для автомобілів – до 6 раз, для літаків – до 5 раз, для металообробних верстатів – до 8 раз, для радіотехнічної апаратури – до 12 раз.

Внаслідок корозії щорічні витрати виплавленого металу сягають 10 %. Суттєве недовикористання потенційних можливостей має місце для машин і агрегатів, до яких висуваються високі вимоги безвідмовності. Вони, як правило, знімаються з експлуатації набагато раніше того терміну служби, який могли б відпрацювати.

З особливо великими втратами часу і матеріальних засобів пов'язаний вихід з ладу унікальних машин і агрегатів, таких, як доменні печі, потужні турбіни, важкі крани тощо. Надійна робота технологічного обладнання (металообробних верстатів, зварювальних апаратів, термічних печей тощо) може призвести до випуску неякісної та ненадійної продукції.

Але можуть бути і такі наслідки ненадійності виробів, які не можна

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 5 / 76

оцінити ніякими економічними показниками. Це загибель людей внаслідок авіакатастроф, відмови військової техніки у відповідальний момент і т. д.

Особливістю проблеми надійності є її зв'язок з усіма етапами проектування, виготовлення та використання машини, розпочинаючи з моменту, коли формується і обґрунтовується ідея створення нової машини і закінчуючи прийняттям рішення про її утилізацію.

Кожен з етапів дає свій внесок у вирішення важкої задачі створення машини необхідного рівня надійності з найменшими витратами часу і матеріальних засобів. Основні рішення по надійності, прийняті на стадії проектування або виготовлення машини, безпосередньо впливають на її експлуатаційні та економічні показники, які часто входять між собою у протиріччя.

Тому необхідно виявляти зв'язки між показниками надійності та можливостями з їх поліпшення на кожному з етапів проектування, виготовлення та експлуатації машин.

При проектуванні та розрахунку машини **закладається** її надійність. Вона залежить від конструкції машини та її вузлів, застосовуваних матеріалів, методів захисту від різних шкідливих впливів, системи змащування, пристосованості до ремонту і обслуговування та інших конструктивних особливостей.

При виготовленні машини **забезпечується** її надійність. Вона залежить від якості виготовлених деталей, методів контролю продукції, що випускається, можливостей керування ходом технологічного процесу, від якості складання машини та її вузлів, методів випробування готової продукції, інших показників технологічного процесу.

При експлуатації машини **реалізується** її надійність. Показники надійності та довговічності проявляються лише у процесі використання машини і залежать від методів та умов експлуатації машини, прийнятої системи її ремонту, методів технічного обслуговування, режимів роботи та інших експлуатаційних факторів.

Проблема надійності – комплексна. Вона проникає у сфери виробництва і експлуатації машин, для її вирішення залучаються різні галузі знань, вона вимагає прийняття нових організаційно-технічних рішень. Разом з тим не дивлячись на широту своїх інтересів, надійність – це відносно нова галузь науки і техніки зі своєю методологією та місцем серед низки інших наук.

**2. Надійність машин. Поняття і показники.** Сьогодні в інженерній практиці, як правило, не застосовуються розрахунки на надійність і

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 6 / 76

довговічність машини, немає навіть загальної схеми такого розрахунку, а є лише окремі види розрахунків, що являють собою, по суті, розрізнені етапи комплексного рішення.

Таке становище пояснюється складністю проблеми розрахунку машин на надійність. Це пов'язано не тільки з обсягом розрахунків, оскільки кожна сучасна машина має велику кількість елементів з потенційною можливістю відмов, але і з розробкою принципової схеми розрахунку машини на безвідмовність і довговічність.

Розрахунки машин на надійність складні і тому, що в основі інженерної задачі з визначення параметрів машини з врахуванням зносу, корозії, втоми тощо лежать різноманітні за фізичною суттю і характеристикою процесу.

Якщо врахувати, що для багатьох сучасних машин характерні не лише широкий діапазон навантажень і швидкостей, але й вплив корозійно-агресивних середовищ, високих і низьких температур, наявність вакууму, електромагнітних впливів, ядерного опромінювання та інші впливи, то пошук закономірностей протікання процесу руйнування можливе тільки на основі застосування методів і засобів фізико-хімічної механіки матеріалів.

Крім того, повинні бути розроблені методи розрахунку на довговічність і безвідмовність різних елементів машини з врахуванням характеру діючих сил і швидкостей, розмірів і конфігурації з'єднань, умов експлуатації, службового призначення даного вузла і вимог до його вихідних параметрів. При цьому повинна бути врахована ймовірнісна природа процесів руйнування матеріалів виробу.

Машину неможливо ізолювати від впливу середовища, в якому вона працює, від впливу процесів, що відбуваються у ній самій при здійсненні робочих функцій, від дії залишкових явищ, які є наслідком технологічних процесів, що застосовувались при виготовленні машини. Всі види енергії – механічна, теплова, хімічна, електромагнітна і т. д. – впливають на машину і викликають у ній зворотні і незворотні процеси, що погіршують її вихідні характеристики.

Тому необхідно вивчати джерела і причини шкідливих впливів на машину, досліджувати фізичну суть процесів, що зменшують працездатність машини, вивчати реакції машини на різні впливи і на основі цього створити такі системи, які могли б протягом необхідного періоду часу виконувати задані функції, незалежно від взаємодії із зовнішнім середовищем

Надійність виробу є одним із основних показників його якості.

Тому надійність, що вивчає зміни показників якості в часі є ніби «динамікою якості», її розгорткою у часі. Оцінка, досягнутого рівня надійності

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 7 / 76

і необхідність його підвищення повинна вирішуватися, у першу чергу, з економічних позицій, тому що економіка є основним критерієм для вирішення більшості практичних питань надійності. Адже сучасний рівень розвитку техніки дозволяє досягти практично любых показників якості і надійності виробу, а вся справа полягає у витратах на досягнення поставленої мети.

Ці витрати можуть бути такими великими, що ефект від поліпшення надійності об'єкта не відшкодує їх, а сумарний результат від проведених заходів буде негативним.

Вирішення задачі з підвищення або оцінки надійності складної машини звичайно включає розгляд її елементів, окремих вузлів і агрегатів.

Кожен виріб характеризується певними вихідними параметрами – величинами, що визначають показники якості даного виробу.

Вихідні параметри можуть характеризувати самі різноманітні властивості даного виробу в залежності від його призначення і тих вимог, що до нього висуваються. Це можуть бути показники точності функціонування, механічні характеристики та характеристики міцності, кінематичні і динамічні параметри, економічні показники тощо.

Терміни і визначення по надійності стандартизовані (ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення). Основні з них:

**Працездатність** – стан виробу, за якого він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення вихідних параметрів у межах, встановлених нормативно-технічною документацією.

**Відмова** – подія, що полягає у порушенні працездатності виробу. Приклади відмов: поломка вала, заклинювання золотника гідросистеми, відхід за допустимі межі ККД двигуна тощо. Звичайно різні відмови мають і різні наслідки — від незначних відхилень у роботі машини до аварійних ситуацій. Люба відмова виникає або може виникнути через деякий період часу, що є випадковою величиною. В залежності від причин відмови необхідно по різному оцінювати і час роботи виробу.

Тут може бути 2 основних випадки.

Перший – коли час оцінюється календарною протяжністю роботи виробу. Це характерно для таких причин порушення працездатності виробу, як корозія, дія зовнішніх температурних факторів, опромінювання тощо. Час роботи до відмови в цьому випадку називається **терміном служби до відмови**.

Для більшості машин основне значення для оцінки втрати працездатності має не календарний час, а протяжність роботи виробу або відповідний їй об'єм

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 8 / 76

виконаної роботи (кількість циклів, шлях, продуктивність тощо) (другий випадок). Час роботи виробу до відмови, виражений у годинах, називається в цьому випадку **напрацюванням до відмови**.

Вироби (їх елементи) характеризуються, як правило, не одним, а декількома параметрами. Термін служби або напрацювання до відмови виробу – це час досягнення практичного значення одним із його вихідних параметрів. Протяжність роботи виробу з тієї або іншої причини (необхідність ремонту, зростання небезпеки від подальшої експлуатації тощо) може бути регламентована.

**Надійність** – це властивість виробу зберігати в часі свою працездатність (вже було сказано вище).

**Надійність виробу** – узагальнена властивість, що вміщує в себе поняття безвідмовності та довговічності.

**Безвідмовність** – властивість виробу безперервно зберігати працездатність протягом деякого періоду часу або деякого напрацювання.

**Довговічність** – властивість (здатність) виробу зберігати працездатність до настання граничного стану, тобто, протягом всього періоду експлуатації при визначеній системі обслуговування і ремонту.

Безвідмовність розглядається як самостійна безперервна робота виробу без будь-яких втручань для підтримки працездатності.

Довговічність розглядає роботу виробу за весь період його експлуатації і враховує, що довготривала робота виробу неможлива без ремонтних і профілактичних заходів, що відновлюють працездатність, втрачену під час експлуатації.

Відмова – це **випадкова подія**; термін служби або напрацювання до відмови – **випадкова величина**; процес, що призводить до втрати працездатності – **випадкова функція**. Тому і показники, що застосовуються для оцінки надійності виробу, мають ймовірнісну природу. Основним показником безвідмовності виробу є ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  (коефіцієнт надійності) – ймовірність того, що в заданому інтервалі часу  $t = T$  (або у межах заданого напрацювання) не виникне відмови виробу. Значення  $P(t)$ , як і всякої ймовірності, може знаходитися у межах  $0 \leq P(t) \leq 1$ .

Наприклад, якщо ймовірність безвідмовної роботи машини протягом  $T = 1000$  год. дорівнює 0,95, то це означає, що з великої кількості машин даної моделі у середньому близько 5 % машин втратять свою працездатність раніше,



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 9 / 76

ніж через 1000 год. роботи. Ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  і ймовірність відмови  $F(t)$  утворюють повну групу подій, тому

$$P(t) + F(t) = 1,0.$$

Допустиме значення  $P(t)$  вибирається в залежності від ступеня небезпечності відмови. Наприклад, для відповідальних виробів авіаційної техніки допустимі значення коефіцієнта надійності доходять до  $P(t) = 0,9999$  і вище, що практично дорівнює 1.

Якщо наслідки відмови пов'язані з незначними економічними втратами, допустимі значення  $P(t)$  можуть бути значно нижчими.

Необхідно мати на увазі, що застосування  $P(t)$  без визначення періоду часу  $t = T$ , протягом якого відбувається робота розглядуваного виробу, не має сенсу.

Створення високоякісних виробів з  $P(t) = 1$  можливе за рахунок великої надлишковості, тобто, при наявності запасу надійності.

Запас надійності  $K_H$  можна визначити, як

$$K_H = \frac{X_{\max}}{X_{ек}} > 1,0,$$

де  $X_{\max}$  – прийнятий максимальний вихідний параметр;  $X_{ек}$  – необхідний експлуатаційний вихідний параметр.

Необхідно розрізняти показники для довговічності елемента виробу і для виробу або машини в цілому.

Основним показником довговічності елемента виробу є його **термін служби (напрацювання) до відмови T**.

Після періоду роботи елемента  $t = T_p$  вироби повинні ремонтуватися або замінюватися.

Довговічність елемента виробу характеризується одним показником  $T$ . Довговічність складного виробу повинна оцінюватися з врахуванням термінів служби (напрацювання) окремих його елементів.

Для оцінки довговічності складного виробу застосовують **2** категорії показників.

По-перше, це показники, що характеризують вихід за допустимі межі основних технічних характеристик (вихідних параметрів) виробу в цілому.

По-друге, довговічність всієї машини повинна характеризувати її здатність виконувати свої робочі функції з мінімальними витратами на заміну зношених

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 10 / 76

деталей, налагодження, обслуговування і ремонт.

Час, що витрачається на ремонт і технічне обслуговування, залежить не лише від методів експлуатації та ремонту, але і від конструкції виробу, його придатності для ремонту та обслуговування.

**Ремонтопридатність** – це властивість виробу, що полягає у його пристосованості до попередження, знаходження та ліквідації відмов і пошкоджень шляхом проведення технічного обслуговування та ремонтів.

Класифікація машин за надійністю може бути здійснена з двох точок зору. По-перше, за тими наслідками, до яких може привести відмова, і, по-друге, за тими причинами, що призводять до необхідності відновлювати втрачену під час експлуатації працездатність.

Класифікація стосується двох основних складових надійності – безвідмовності і довговічності.

**3. Причини втрати машиною працездатності.** У процесі експлуатації на машину діють всі види енергії, що може призвести до зміни параметрів окремих елементів, механізмів і машини в цілому. При цьому наявні три джерела впливів на машину:

- 1) дія енергії навколишнього середовища;
- 2) внутрішні джерела енергії, пов'язані як із робочими процесами, що протікають у машині, так і з роботою окремих механізмів машини;
- 3) потенційна енергія, накопичена у деталях машини під час їх виготовлення (внутрішні напруги у відливках, монтажні напруги тощо).

При роботі машини спостерігаються наступні види енергії, що впливають на працездатність:

**Механічна енергія** – що не тільки передається по усіх ланцюгах машин у процесі роботи, але й впливає на неї у вигляді статичних або динамічних навантажень від взаємодії з навколишнім середовищем.

**Теплова енергія** – діє на машину та її частини при коливаннях температури навколишнього середовища під час здійснення робочого процесу.

**Хімічна енергія** також проявляє вплив на роботу машини. Навіть повітря, що містить вологу і агресивні складові, може викликати корозію окремих вузлів машини.

Якщо ж машина працює в умовах агресивних середовищ, то хімічні впливи викликають процеси, що призводять до руйнування окремих елементів вузлів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 11 / 76

машини.

Ядерна (атомна) енергія, що проявляється у процесі розщеплення атомних ядер, може впливати на матеріали, змінюючи їх властивості.

Електромагнітна енергія у вигляді радіохвиль пронизує весь простір навколо машини і може впливати на роботу, наприклад, електронної апаратури.

Біологічні фактори можуть впливати на працездатність машини. Наприклад, в умовах тропіків наявні мікроорганізми, які не тільки руйнують деякі види пластмас, а можуть впливати і на метали.

Різні види енергії, впливаючи на машину, викликають в її вузлах і деталях процеси, що погіршують вихідні параметри виробу. Це, у свою чергу, тягне за собою зміну вихідних параметрів виробу, що може призвести до відмови.

Процеси, що призводять до зміни вихідних властивостей виробу, протікають у матеріалах, з яких виготовлено виріб, причому, не тільки в матеріалах деталей машин, але й у мастилах, пальному тощо – у всьому, що участвує в робочому процесі машини.

Пошкодження матеріалу виробу – це відхилення його параметрів (властивостей), що контролюються, від вихідних.

Дефект – такий стан виробу, за якого він не відповідає хоча б одній з вимог технічної документації, але залишається працездатним.

Зворотні процеси – тимчасово змінюють параметри деталей, вузлів і системи у деяких межах без тенденції прогресивного погіршення. Наприклад: пружні деформації у вузлах.

Незворотні процеси призводять до прогресивного погіршення технічних характеристик машини з плином часу.

Найхарактернішими незворотними процесами у машинах є знос, корозія, втома.

Для оцінки надійності виробу необхідно оцінювати швидкість протікання процесів, що понижують його працездатність.

Швидкопротікаючі процеси мають періодичність зміни, що вимірюються долями секунди (вібрація).

Процеси середньої швидкості – такі, що пов'язані з періодом безперервної роботи машини (зміна температури самої машини, зміна температури навколишнього середовища, зміна вологості тощо).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 12 / 76

**Повільні процеси** – ті, що протікають за час роботи машини між періодичними оглядами або ремонтами. Вони продовжуються дні та місяці (знос основних механізмів машини, плинність металів тощо).

Види пошкоджень деталей машин і відмови можна розбити на **2** групи:

До **допустимих** пошкоджень відносяться короблення, деякі види зносу, втомна поверхневих шарів.

**Недопустимими** є поломки деталей внаслідок недостатньої міцності (статичної, динамічної або втомної), теплові тріщини, у деяких випадках — корозія, деякі види зносу, що протікають зі значною інтенсивністю.

Процесом **старіння** називаються незворотні зміни властивостей або стану матеріалів виробу внаслідок дії різноманітних факторів.

Для сучасних машин і виробів найбільш характерні параметричні відмови.

Наприклад: втрата потужності двигуна авіалайнера може призвести до неможливості польоту, витікання мастил в елементах гідросистеми призводить до падіння тиску тощо.

Відмови функціонування та параметричні відмови можуть бути поступовими та раптовими.

Всі особливості відмов та їх наслідки достатньо точно оцінюються допустимою ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$ .

### Контрольні запитання

1. В чому суть проблеми надійності машин?
2. Що таке надійність?
3. Напрямки розвитку сучасних машин.
4. Коли закладається надійність машин?
5. Коли забезпечується надійність машин?
6. Коли реалізується надійність машин?
7. Основні терміни та визначення: працездатність, відмова, термін служби, напрацювання до відмови, безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність

### Тема 2. Класифікація відмов. Поверхневий шар та його особливості

1. Поступові, раптові та складні відмови.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 13 / 76

2. Макро- та мікрогеометрія поверхні. Залишкові напруги I, II і III родів. Розподіл залишкових напруг і твердості матеріалу по глибині поверхневого шару.

3. Вплив технології обробки на формування поверхневого шару.

**1. Поступові, раптові та складні відмови.** Основною ознакою, що визначає різні види відмов, служить характер виникнення та протікання процесів, що призводять до відмови.

Існують наступні види відмов:

**Поступова відмова** – виникає внаслідок протікання того або іншого процесу старіння, що погіршує початкові параметри виробу.

Основною ознакою поступової відмови є те, що ймовірність її виникнення  $F(t)$  протягом заданого періоду часу  $t_1 - t_2$  залежить від протяжності попередньої роботи  $0 - t_1$ .

Чим більший час експлуатації виробу, тим вища ймовірність виникнення відмови.

Більшість відмов відносяться до цього виду і пов'язані вони з процесами зносу, корозії, втоми, плинності.

Графічно цей вид відмов можна зобразити наступним чином (рис. 1):

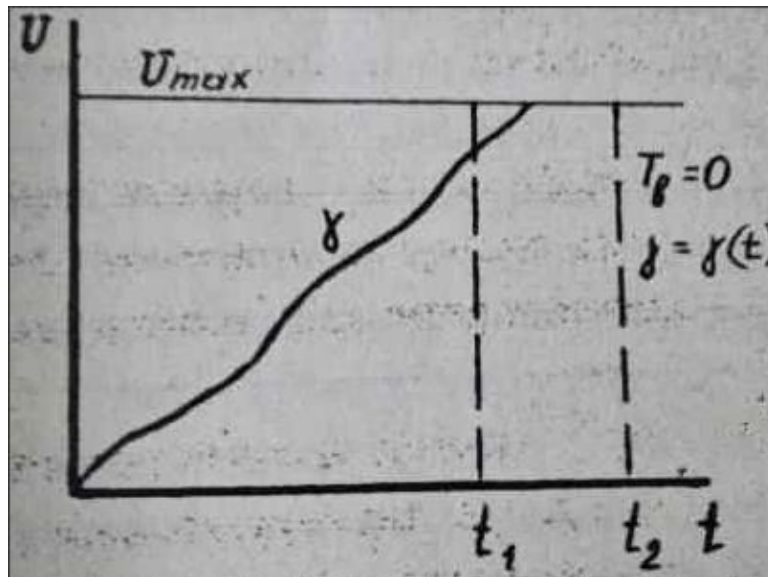


Рис. 1. Поступова відмова

(тут  $U$  – пошкодження (наприклад, лінійний знос);  $T$  – час)

**Раптова відмова** (рис. 2) – виникає внаслідок поєднання несприятливих факторів і впливів, що перевершують можливість виробу до їх сприйняття.

Відмова виникає через проміжок часу  $T_b$ , що є випадковою величиною.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 14 / 76

Основною ознакою раптової відмови є незалежність ймовірності її виникнення протягом періоду часу  $t_2 - t_1$  від протяжності попередньої роботи  $T_b$ . Швидкість протікання відмови

$$\gamma = \frac{dU}{dt} \rightarrow \infty.$$

Приклади таких відмов: теплові тріщини, що виникають внаслідок припинення змащування; поломка деталей, що попали в екстремальні умови.

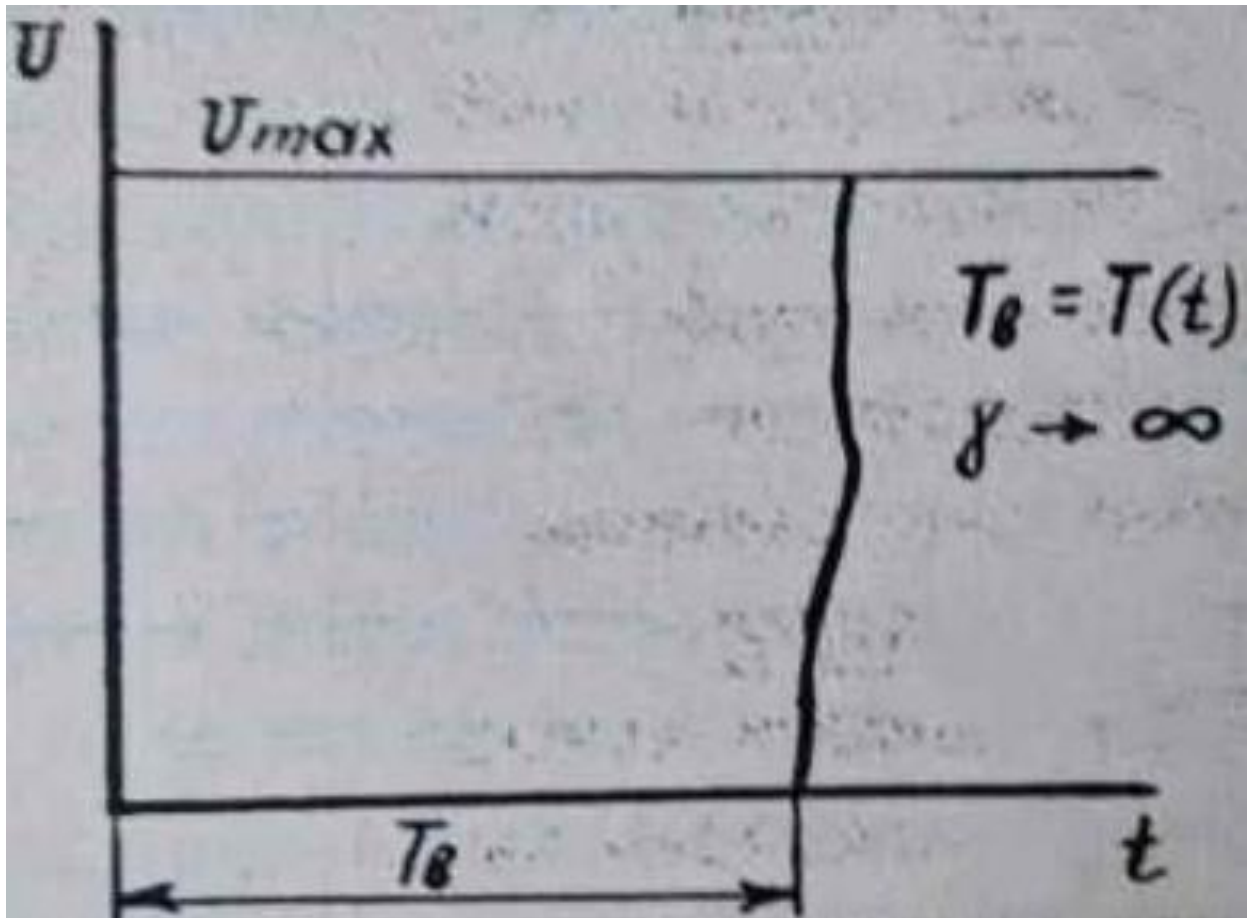


Рис. 2. Раптова відмова

Третій вид відмов – **складні відмови** (рис. 3).

Складна відмова включає у себе особливості двох попередніх. Час експлуатації до початку відмови  $T_b$  є довільним, але сама відмова відбувається зі швидкістю

$$\gamma = \frac{dU}{dt}.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 15 / 76

На практиці приклад такої відмови – недопустимі ударні впливи на машину можуть стати джерелом виникнення тріщини втомі через концентрацію напруг і ця тріщина, поступово розвиваючись, призведе до відмови.

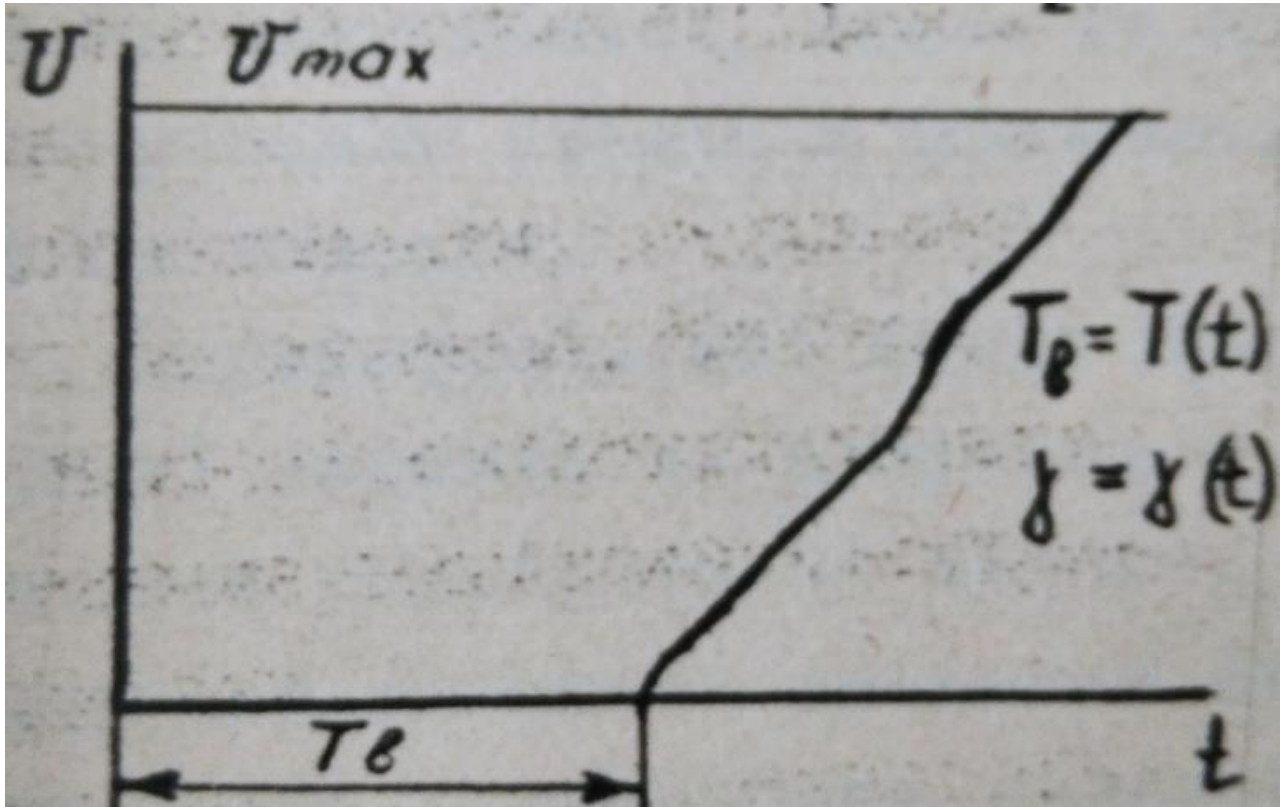


Рис. 3. Складна відмова

Всі види відмов можна розділити на параметричні та функціональні.

Відмова функціонування призводить до того, що вибір не може виконувати своїх функцій. Найчастіше ці відмови пов'язані з поломкою.

Параметрична відмова призводить до виходу певних параметрів за допустимі межі. Такі відмови, як погіршення точності обробки на верстаті, падіння ККД передачі тощо обмежують можливість нормального або установленного технічними нормативами функціонування виробу, але не зупиняють його.

Надійність роботи виробів, у першу чергу, визначається змінами тих або інших параметрів тому стан машин і механізмів визначається параметричними відмовами.

Стан поверхневого шару визначають процеси, що виникають при взаємодії з іншими тілом або з навколишнім середовищем, наприклад, при зносі, контактній деформації, корозії тощо. Крім того, багато видів руйнування всього

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 16 / 76

тіла деталі починається з поверхні і залежить від її стану.

**Особливий вплив поверхневого шару** матеріалу на працездатність виробу пов'язаний з трьома причинами:

1. Поверхневі шари твердого тіла наділені надлишком енергії, тому що молекули і атоми, що знаходяться біля поверхні, мають вільні зв'язки, які сприяють виникненню таких явищ, як поглинання (адсорбція), зчеплення (когезія), прилипання (адгезія), змочування, внаслідок чого сам поверхневий шар отримує своєрідну будову.

2. Поверхневий шар формується внаслідок різноманітних технологічних процесів, які не тільки утворюють необхідну форму поверхні та змінюють властивості матеріалу, але й змінюють властивості твердого тіла біля його поверхні.

3. У процесі експлуатації відбувається безперервна зміна параметрів поверхневого шару в значно більшій степені порівняно зі змінами, що відбуваються по всьому об'єму.

Поверхневий шар з геометричної точки зору являє собою досить складну формацію.

**2. Макро- та мікрогеометрія поверхні. Залишкові напруги I, II і III родів. Розподіл залишкових напруг і твердості матеріалу по глибині поверхневого шару.** Розрізняють **макрогеометрію** поверхні, тобто, характеристику її форми – овальність, огранку, конусність для циліндричних поверхонь, випуклість, сідлоподібність. Ці характеристики впливають на працездатність і тому допустимі відхилення від форми обумовлюються відповідними стандартами.

**Мікрогеометрія** характеризується шорсткістю і хвилястістю (сукупністю виступів і впадин, що періодично повторюються, з кроком, що перевершують базову довжину, прийняту стандартом для визначення параметрів шорсткості). Геометричними параметрами (розмірами) характеризуються і інші дефекти поверхні – тріщини, сколи, подряпини, інші локальні відхилення рельєфу.

Специфічною особливістю поверхневого шару є виникнення **внутрішніх залишкових напруг**.

Внутрішні напруги, що виникають під час нагрівання та охолодження деталі, утворюють рівноважну систему і можуть проявлятися у вигляді **макронапруг**, що охоплюють крупні об'єми деталі (напруги I роду), **мікронапруг** у межах одного або декількох кристалічних зерен (напруги II роду) і



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 17 / 76

**субмікроскопічних напруг**, що діють між елементами кристалічних ґраток (напруги III роду).

Внутрішні (або залишкові) напруги є наслідком певного технологічного процесу, тому розрізняють ливарні, зварювальні, гартувальні, шліфувальні та інші залишкові напруги.

Особливо небезпечні напруги розтягу, що призводять до зменшення міцності на втому та зносостійкості.

Залишкові напруги, що виникають у поверхневих шарах при механічній обробці, звичайно відносяться до напруг I і II родів.

Типові епюри залишкових напруг I роду наступні (рис. 4):

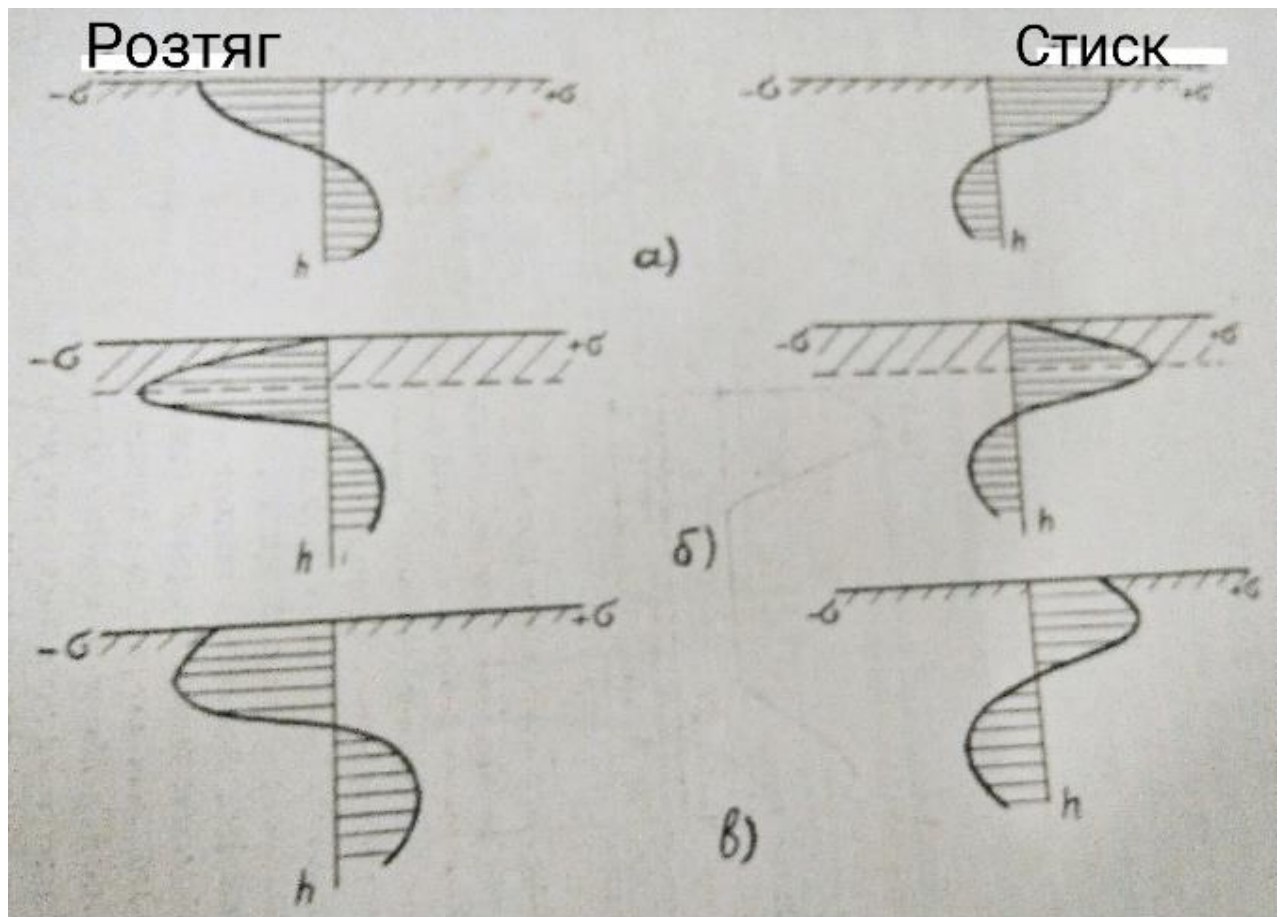


Рис. 4. Типові епюри залишкових напруг

Характер епюри залежить від умов і режимів обробки.

Різноманітність епюр пояснюється одночасною дією різних факторів і, у першу чергу, поєднанням силових і температурних впливів.

В загальному вигляді будова поверхневого шару після обробки складається з таких ділянок (рис. 5):

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 18 / 76

1. Шар підвищеної твердості, до якого прилягає аморфний шар із плівок вологи, газів і забруднень.
2. Наклепаний шар із сильно деформованими кристалічними ґратками, що мають свою текстуру, яка виникла під впливом сил різання або тертя.
3. Наклепаний шар з деформованими кристалічними ґратками (без яскраво вираженої орієнтації).
4. Матеріал з вихідною структурою.

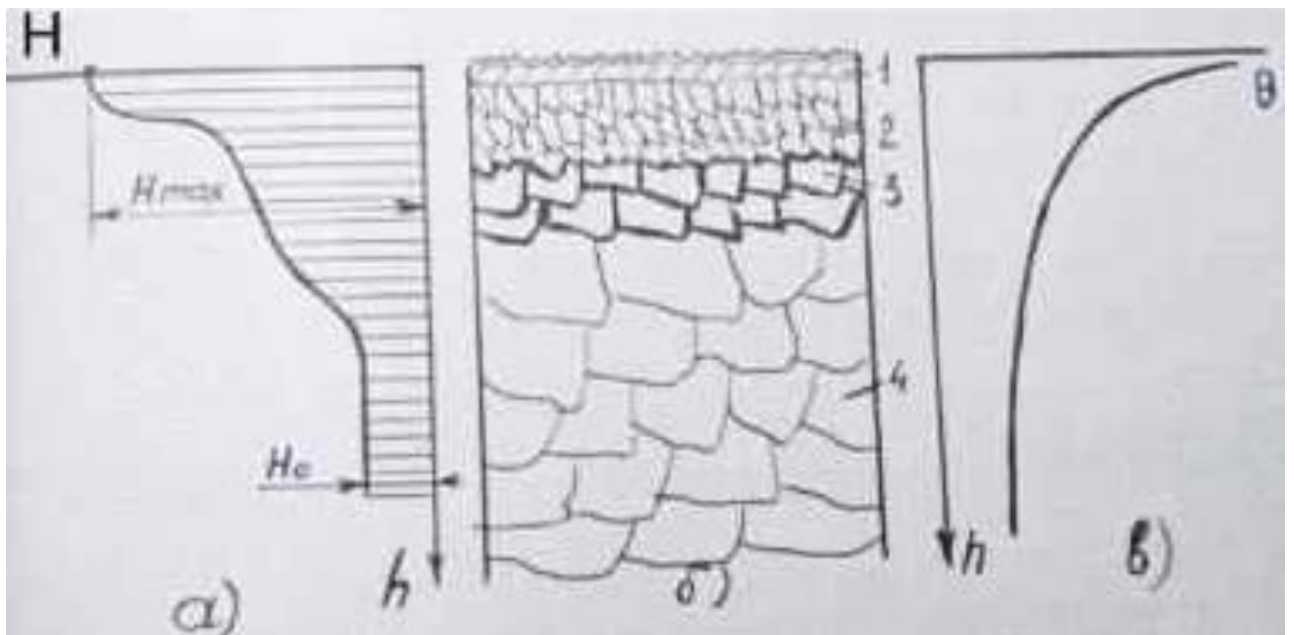


Рис. 5. Будова поверхневого шару

**3. Вплив технології обробки на формування поверхневого шару.** Тому що основні фактори любого виду обробки – **температурний** і **силовий** – діють одночасно, то знак залишкових напруг у зовнішньому шарі залежить від того, який з цих факторів домінує.

Наприклад, при шліфуванні титанових сплавів у поверхневому шарі виникають напруги розтягу, що можуть досягти межі плинності.

При фрезеруванні тепловий фактор вже не грає такої ролі в утворенні залишкових напруг, особливо, при низьких і середніх швидкостях різання.

У поверхневих шарах при фрезеруванні з різними швидкостями різання можуть виникати як напруги стиску, так і напруги розтягу. При малій швидкості різання більший вплив має силовий фактор і тому у поверхневому шарі виникають напруги стиску.

Значний вплив на характер залишкових напруг мають процеси поверхневого зміцнення та захисні покриття.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 19 / 76

Визначено, що після загартування СВЧ, поверхневого наклепу, азотування та цементації діють напруги стиску з максимумом біля поверхні, тому деталі після такої обробки мають підвищену міцність на втому.

Після нанесення більшості гальванічних покриттів у поверхневих шарах виникають напруги розтягу.

Намагання отримати поверхневий шар з найліпшими експлуатаційними показниками привело свого часу до виникнення різних технологічних процесів фінішної обробки: шліфування, суперфінішування, полірування, абразивної доводки. При цьому на будову поверхневого шару, його геометричні характеристики, на величину та знак залишкових напруг впливають не тільки методи обробки, а й їх режими, а також поєднання умов обробки та геометричних параметрів застосовуваних інструментів.

### **Контрольні запитання**

1. Які відмови відносяться до поступових?
2. Що таке раптова відмова?
3. Охарактеризуйте складну відмову.
4. Основні ознаки відмов трьох видів – поступових, раптових і складних.
5. Параметричні та функціональні відмови.
6. Макро- та мікрогеометрія поверхонь – точність форми та розташування; шорсткість, хвилястість; тріщини, сколи, подряпини, задирки та їхній вплив на працездатність виробів.
7. Напруги I, II і III родів.
8. Епюри розподілу внутрішніх напруг у поверхневому шарі.
9. Розподіл твердості по глибині поверхневого шару.
10. Вплив технологій обробки на формування внутрішніх напруг і твердості у поверхневих шарах деталей машин.

**Тема 3. Зношування. Природа, класифікація та закономірності зношування**

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 20 / 76

1. Природа та класифікація процесів зношування.
2. Сухе, рідинне та граничне тертя.
3. Показники зносу.
4. Періоди протікання зносу в часі.

**1. Природа та класифікація процесів зношування.** Знос, що виникає при терті спряжених поверхонь, є найбільш характерним видом пошкодження.

**Зношування** – це процес поступової зміни розмірів тіла при терті, що проявляється у відокремленні з поверхні тертя матеріалу і (або) його залишкової деформації.

Зношування може супроводжуватися процесами корозії та є складним фізико-хімічним процесом.

При контакті двох спряжених поверхонь та їх відносному переміщенні у поверхневих шарах виникають механічні і молекулярні взаємодії, які в кінці-кінців і призводять до руйнування мікроб'ємів поверхні, тобто, до зносу.

У процесі зношування вихідний (технологічний) мікрорельєф перетворюється в експлуатаційний. Причому, шорсткість поверхні внаслідок зносу може бути і більшою, і меншою, якщо порівнювати її з вихідною.

Причини виникнення зносу:

1. Втома від взаємного ковзання.
2. Мікрорізання внаслідок взаємодії.
3. Руйнування поверхневих окисних плівок.
4. Адгезійний (когезійний) відрив матеріалу.

На рис. 6 показано трансформацію **технологічного** рельєфу в **експлуатаційний**:

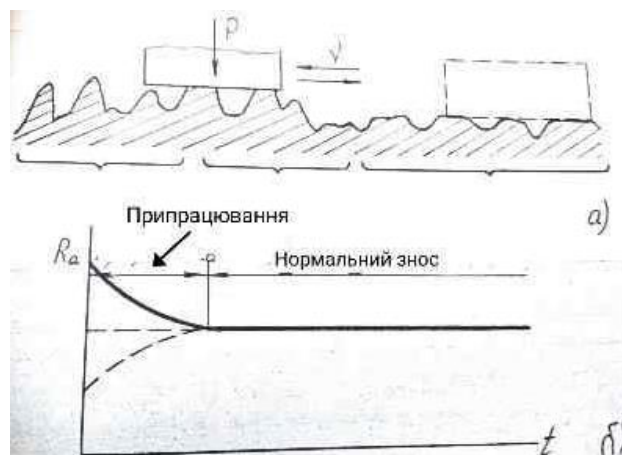


Рис. 6. Трансформація технологічного рельєфу в експлуатаційний

Механічне зношування відбувається внаслідок тільки механічної взаємодії матеріалів виробів; молекулярно-механічне зношування супроводжується

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 21 / 76

також проявом дій атомних і молекулярних сил; корозійно-механічне зношування відбувається при терті матеріалу, що вступив у хімічну взаємодію з навколишнім середовищем.

Найхарактерніші процеси та явища, супутні процесу зношування, наступні:

1. Виникнення високих локальних температур, які при великих місцевих тисках можуть досягати значень, відповідних фазовим перетворенням у поверхневих шарах, або приводити до розплавлення металу (поява «зварювальних містків»). Поєднання механічних і термічних напруг, що постійно повторюються, може викликати появу мікротріщин, змикання яких на деякій глибині призводить до відокремлення матеріалу.

2. Протікання хімічних процесів (утворення окисних плівок, інших хімічних сполук); розчинення одного з тіл тертя під впливом процесів, що відбуваються в зоні контакту; збільшення крихкості поверхневого під дією атомарного водню, що виділяється при хімічних реакціях.

3. Вплив на зношування змащування, яке визначає інтенсивність зносу. Крім позитивного ефекту, змащування може проявляти розклинюючу дію, що сприяє руйнуванню поверхневого шару, коли мастило попадає у мікротріщини.

4. Протікання процесів переносу матеріалів з однієї поверхні на іншу. Це перенесення плівки еластичнішого тіла на тверде тіло внаслідок схоплювання (наприклад, бронзи на чавун або сталь).

**2. Сухе, рідинне та граничне тертя.** Вплив мастил на інтенсивність зношування пар тертя загальновідомий.

При **сухому** терті має місце найбільша швидкість зношування. При роботі деталей машин намагаються уникати сухого тертя. Шар мастил ліквідує унікальний контакт двох поверхонь, завдяки чому зменшуються сили тертя і зменшується знос.

**Рідинне** тертя, при якому поверхні тертя повністю розподілені шаром мастила, може бути забезпечене двома основними методами: гідростатичним і гідродинамічним (подача мастила під тиском).

Недоліки рідинного тертя:

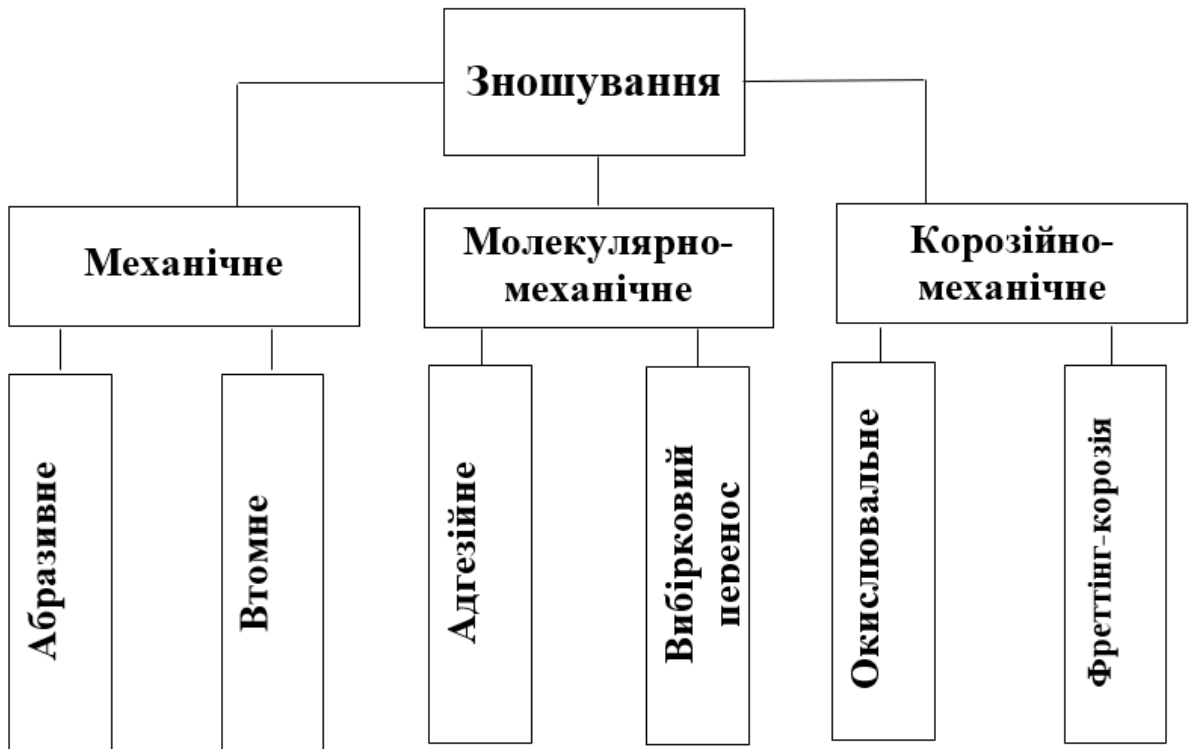
1. Ускладнює конструкцію вузла.
2. Наявність мастильного прошарку між поверхнями може порушувати точність переміщення (позиціонування) вузла.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 22 / 76

Найбільш характерним для більшості вузлів тертя є граничне тертя, коли шар мастила не перевершує декількох мікрон. У цьому випадку на тертя та знос впливають як характеристики спряжених матеріалів, так і властивості мастильного шару. Знос може відбуватися при локальних розривах мастильної плівки і при передачі зусиль через цю плівку, що відіграє роль еластика.

**Граничне** тертя суттєво зменшує порівняно з сухим тертям, швидкість зношування.

### Класифікація процесів зношування



Мастильні матеріали:

1. Рідкі мінеральні мастила.
2. Густі (консистентні) мастила.
3. Тверді мастила.

Знаходять застосування також і так звані самозмащувальні матеріали, до складу яких входять тверді та рідкі мастила.

**3. Показники зносу.** Показниками зносу є:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 23 / 76

Лінійний знос  $U$  (мкм) – зміна розміру поверхні при її зношуванні, виміряного у напрямку, нормальному до поверхні тертя (по нормалі до поверхні тертя).

Швидкість зношування  $\gamma = \frac{dU}{dt}$  (мкм/год) – відношення величини зносу до часу, протягом якого він виник.

Інтенсивність зношування  $j = \frac{dU}{dS}$  – відношення величини зносу до шляху тертя. Якщо знос і шлях вимірюються в однакових одиницях, величина буде безрозмірною.

Закон зношування матеріалів повинен в загальному вигляді виражати в аналітичній формі залежність  $U$  або  $\gamma$  від наступних факторів:

1. Від силових і кінематичних параметрів, у першу чергу, від тиску на поверхнях тертя  $p$  і швидкості відносного ковзання  $V$ .
2. Від параметрів, що характеризують склад, структуру і механічні властивості матеріалів пари тертя (твердість  $H$ , межа плинності  $\sigma_s$ , модуль пружності  $E$  тощо).
3. Від властивостей поверхневого шару – його шорсткості, жорсткості.
4. Від виду тертя і змащування.
5. Від зовнішніх умов – температура, вологість, наявність вакууму, накладання вібрацій.

Крім того, всі закономірності повинні описувати зміну зносу в часі  $t$ .

#### 4. Періоди протікання зносу в часі.

Зношування є багатостадійним процесом, тому зміна зносу в часі звичайно відображається кривою, що складається з трьох ділянок (іноді – двох).

Класична форма зносостійкості складається з трьох ділянок (рис. 7):

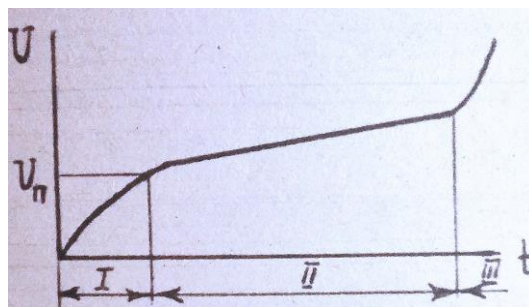


Рис. 7. Періоди протікання зносу в часі

**Період I** – припрацювання – відбувається перетворення технологічного рельєфу поверхні в експлуатаційний.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 76

Під час цього періоду швидкість зношування монотонно зменшується до значення  $\gamma = const$ , характерного для **періоду II** – період сталого зносу.

**III період** – період катастрофічного зносу. Характерний інтенсивним зростанням швидкості зносу.

Для сталого зносу:

$$U = \gamma t ;$$

$$U = U_n + \gamma t ,$$

де  $U_n$  – знос за період припрацювання.

У загальному випадку швидкість зношування:

$$\gamma = k p^m V^n ,$$

де  $k$  – коефіцієнт зношування (залежить від матеріалів пари тертя і умов зношування);  $m = 0,5 \dots 3,0$  (показник степені);  $V$  – швидкість відносного ковзання;  $p$  – тиск на поверхні тертя.

Дослідженнями встановлено, що основною характеристикою тертя є твердість матеріалу.

Існує лінійна залежність між твердістю та зносостійкістю:

$$\varepsilon = bH ,$$

де  $\varepsilon$  – відносна зносостійкість;  $H$  – твердість за Віккерсом;  $b$  – коефіцієнт пропорційності ( $b \approx 7,3$ ).

### Контрольні запитання

1. Що таке зношування?
2. Причини виникнення зносу.
3. Технологічний та експлуатаційний рельєф.
4. Механічне, молекулярно-механічне і корозійно-механічне зношування.
5. Процеси та явища, супутні зношуванню.
6. Сухе, рідинне і граничне тертя.
7. Періоди зносу в часі і його показники зносу – швидкість, інтенсивність.

Тема 4. **Пари тертя**



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 25 / 76

1. Типові поєднання матеріалів для пар тертя. Класи зносостійкості.
2. Класифікація з'єднань за умовами зношування.

### **1. Типові поєднання матеріалів для пар тертя. Класи зносостійкості.**

Досвід експлуатації різних машин дозволяє виділити групи типових поєднань матеріалів для різних пар тертя:

1. Сталь – антифрикційний кольоровий сплав. Поєднання термообробленої сталі у парі з бронзами на основі олова, цинку, алюмінію, свинцю широко застосовується для підшипників ковзання різних типів, черв'ячних пар, з'єднань «ходовий гвинт-гайка».

2. Сталь – антифрикційний чавун; сталь – сталь; чавун – чавун. Часто застосовується при порівняно невеликих швидкостях ковзання для таких пар тертя як направляючі ковзання верстатів, пари тертя гідросистем, зубчасті та ланцюгові передачі, диски фрикційних муфт і гальм, підшипники кочення.

3. Метал – полімерний матеріал. Застосовується таке поєднання для зубчастих і черв'ячних передач, підшипників і направляючих ковзання, гвинтових передач.

4. Спеціальна сталь – абразивне середовище. Спеціальні хромисті і марганцеві сталі застосовують для деталей, що працюють у контакті з ґрунтом, породою, потоками газу та рідини (лепехи плугів, ланцюги гусениць тракторів, зуби ковшів екскаватора, лопатки турбін тощо).

5. Сталь або чавун – фрикційний сплав. Для гальмівних пристроїв, де необхідне забезпечення значного тертя на суміщених поверхнях. В якості фрикційних застосовуються асбокаучукові, асбосмоляні та металокерамічні матеріали. Від них вимагається висока теплостійкість, тому що при гальмуванні температура може досягати 1000 °С більше.

6. Сталь – самозмащувальні матеріали. Це поєднання застосовується для з'єднань типу підшипників ковзання, шарнірів при невисоких швидкостях. В якості самозмащувальних застосовують пористі сплави, що містять мідь, свинець, графіт.

Для довгої експлуатації машин необхідно вже на стадії проектування призначити, разом із квалітетами точності і шорсткістю, і клас зносостійкості.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 26 / 76

Пропонується застосовувати 10 класів (табл. 1), що охоплюють основний діапазон випадків, які зустрічаються у машинах.

Таблиця 1

Класи зносостійкості машин за інтенсивністю зносу

Клас	Інтенсивність зносу, $j$	Вид контакту	Приклади	
			З'єднання	Матеріали
0	$10^{-12} > j \geq 10^{-13}$	Пружний	Поршневі кільця, калібри	Чавун-чавун, твердий сплав-сталь
1	$10^{-11}$ $10^{-12}$			
2	$10^{-10}$ $10^{-11}$			
3	$10^{-9}$ $10^{-10}$	Пружно-пластичний	Напрямні верстатів, протектори шин	Чавун-чавун, гума, асфальт
4	$10^{-8}$ $10^{-9}$			
5	$10^{-7}$ $10^{-8}$	Пластичний	Диски і колодки гальм	Пластмаса-чавун
6	$10^{-6}$ $10^{-7}$			
7	$10^{-5}$ $10^{-6}$			
8	$10^{-4}$ ... $10^{-5}$	Мікрорізання	Лемехи, зуб ковша екскаватора	Сталь ґрунт
9	$10^{-3}$ $10^{-4}$			

Швидкість та інтенсивність зносу пов'язані між собою через швидкість відносного ковзання співвідношенням:

$$\gamma = j V.$$

Часто при оцінці надійності машини необхідно визначити, до якого класу зносостійкості відносяться окремі її вузли. У цьому випадку зручно мати класифікацію, побудовану на основі градації швидкості зношування  $\gamma$  (мкм/год) за класами зносостійкості.

В якості класифікації запропонована така градація швидкості зносу, в якій знос за фіксований проміжок часу – 100 год, – співрозмірний з висотою мікронерівностей за параметром  $Ra$ .

Приналежність до даного класу зносостійкості означає, що за 100 год роботи знос дорівнює найменшому значенню  $Ra$  даної поверхні (табл. 2).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 27 / 76

Таблиця 2

## Класи зносостійкості за швидкістю зносу

Клас зносостійкості	Ra, мкм	$\gamma = \frac{R_{amin}}{100}$ , (мкм/ГОД)	Приклади
1	2	3	4
Закінчення таблиці			
1	2	3	4
0	< 0,01	< $5 \cdot 10^{-5}$	Калібри
1	0,02 – 0,01	$\leq 10^{-4}$	Гідросистеми
2	0,04 – 0,02	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$	Зубчасті передачі
3	0,08 – 0,04	$\leq 4 \cdot 10^{-4}$	
4	0,16 – 0,08	$\leq 8 \cdot 10^{-4}$	Напрямні верстатів
5	0,32 – 0,16	$\leq 1,6 \cdot 10^{-3}$	
6	0,63 – 0,32	$\leq 3,2 \cdot 10^{-3}$	Фрикційні муфти
7	1,25 – 0,63	$\leq 6,4 \cdot 10^{-3}$	
8	2,5 – 1,25	$\leq 1,25 \cdot 10^{-2}$	Лемехи, гальма
9	> 2,5	> $1,25 \cdot 10^{-2}$	

Знос на величину  $Ra$  означає повне зникнення технологічного і утворення експлуатаційного рельєфу, тому при призначенні шорсткості вихідної поверхні можна регулювати протяжність у часі періоду припрацювання по відношенню до фіксованого часу, у даному випадку – 100 год.

**Приклад:**

Необхідно визначити, до якого класу зносостійкості відноситься з'єднання «вал-підшипник ковзання» ( $d = 50$  мм,  $n = 100$  об/хв), якщо за  $T = 5000$  год знос склав 0,01 мм.

Визначаємо швидкість зношування:

$$\gamma = 0,01 \text{ мм} / 5000 \text{ год} = 10 \text{ мкм} / 5000 \text{ год} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ мкм} / \text{год}.$$

Інтенсивність зношування:

$$j = \frac{\gamma}{V} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{9,5 \cdot 10^{-8}} = 2 \cdot 10^{-12},$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 28 / 76

де  $V = \pi d n$ .

Отже, з'єднання відноситься до 6-го класу за швидкістю і 1-го класу за інтенсивністю зносу.

Оцінка швидкості зношування для різних з'єднань і накопичення даних для типових умов експлуатації є передумовою для того, щоб розпочати розрахунок і прогнозування надійності машин із врахуванням їх спрацювання.

**2. Класифікація з'єднань за умовами зношування.** Конструктивна схема з'єднання впливає на розподіл зносу по поверхні тертя і на характер взаємодії зношених поверхонь.

Класифікація з'єднань за умовами їх зношування наступна:

Всі з'єднання поділяються на **два** типи:

I тип – у з'єднань є додаткові не зношувані або мало зношувані напрямні, що забезпечують зближення деталей внаслідок зносу тільки в заданому напрямку.

II тип – відбувається самоустановка зношених деталей.

Крім того, всі з'єднання розподілені на **5** груп за умовами тертя:

1-а група – точки розташовані на одній траєкторії, мають однакові умови зношування для кожного з тіл.

2-а група – зберігаються постійними умови зносу для всіх точок, що лежать на одній траєкторії, тільки в одного тіла.

3-а і 4-а групи – умови зношування не зберігаються постійними для всіх точок обох тіл. Відбувається так званий нерівномірний знос.

5-а група – випадок контакту з твердим середовищем – ґрунтом породою, оброблюваною деталлю тощо, – вивчається знос лише однієї поверхні, що взаємодіє з абразивним середовищем (табл. 3).

Таблиця 3

Група	Тип з'єднання	
	I	II
1	2	3
1	Торцеві гальма і фрикційні муфти	Диски фрикційних муфт

Закінчення таблиці 3

1	2	3
---	---	---

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 29 / 76

2	Ходовий гвинт–гайка	Вал–підшипник ковзання; колодкові гальма
Закінчення таблиці		
1	2	3
3	Поршневі кільця–гільза циліндра	Напрямні ковзання (поступальний рух)
4	Зубчасті зачеплення; кулачок–штовхач	Колесо–рейка, підшипники кочення, ролик–напрямна
5	Різальний інструмент (із жорсткою установкою)	Лемехи плугів, різальний інструмент із самоустановкою

Приналежність з'єднання до тієї або іншої групи визначає методика розрахунку зносу.

### Контрольні запитання

1. Які типові поєднання матеріалів деталей у парах тертя?
2. Самозмащувальні матеріали.
3. Співвідношення швидкості та інтенсивності зношування.
4. Основний показник класифікації зносостійкості за швидкістю зносу.
5. Класифікація з'єднань за умовами зношування.
6. Поділ з'єднань на групи за умовами тертя.

### Тема 5. Змащувальні матеріали

1. Мастильні матеріали.
2. Змащувальні властивості мастил.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 30 / 76

### 3. Службові властивості мастил.

**1. Масильні матеріали.** Масильні матеріали за принципом виконуваної ними роботи поділяються на наступні категорії:

1) **Конструкційні** масильні матеріали – які повинні розглядатися як невід’ємний елемент конструкції машини. Вибір мастила здійснюється конструктором, який проектує машину, одночасно з вибором матеріалу та інших параметрів деталей тертя і воно входить до специфікації деталей і матеріалів на виріб.

2) **Технологічні** мастила – застосовуються при обробці матеріалів тиском і різанням з метою змащування та охолодження інструмента і оброблюваного матеріалу. Мастила для обробки різанням, помимо змащувальних функцій повинні забезпечувати інтенсивне відведення тепла від різальних кромки інструмента. Технологічне мастило вибирається технологом і повинне розглядатися як невід’ємний елемент прийнятого технологічного процесу та записуватися у технологічну карту.

В залежності від умов застосування мастила поділяються на **2** групи:

1. Загального призначення.
2. Мастила спеціалізовані та спеціальні.

Щоб поліпшити експлуатаційні властивості мастил, до їх складу вводять присадки. Мастило з присадками називається **легованим**, а його нелегована основа – **базовим** мастилом.

Основне призначення мастил – зменшити знос і тертя деталей машин. При цьому головним є зменшення, а, по можливості, і попередження зносу – найважливішого фактору, що негативно впливає на довговічність машин та їх працездатність.

Зменшення тертя, при всій його значимості, є другорядною функцією мастила. Величина тертя визначає енергетичні втрати у машинах, але, навіть значні втрати у механізмах при всій їх небажаності звичайно менш небезпечні, ніж знос.

Помимо зменшення зносу і тертя, що є прямою функцією мастил, останні повинні відводити тепло з зони тертя, захищати змащовані поверхні від корозії, а в окремих випадках виконувати функції, що не мають відношення до змащування, наприклад, передавати рух у гідравлічних системах.

Здатність мастила виконувати і зберігати всі ці функції якнайдовше визначається його експлуатаційними властивостями.

Поведінка мастил в об’єктах змащування визначається багатьма експлуатаційними властивостями, що наводяться у паспорті відповідного сорту мастила.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 76

**2. Змащувальні властивості мастил.** Експлуатаційні властивості мастил поділяються на 2 групи:

- 1) змащувальні;
- 2) службові.

Змащувальні властивості, тобто, властивості, що характеризують здатність мастил забезпечувати працездатність поверхонь тертя шляхом максимального зменшення або попередження всіх видів зносу (зношувальні властивості) та максимального зменшення тертя (фрикційні властивості).

**3. Службові властивості мастил.** По відношенню до змащувальних властивостей друга група властивостей має підпорядкований характер. Їх називають службовими властивостями.

Це, у першу чергу, в'язкість, що в одних випадках прямо, а в інших – дотично впливає на змащувальні властивості.

І далі:

1. Густина – відношення маси мастила до його об'єму (в системі СІ одиниця вимірювання –  $кг / м^3$ ). Густина нафтових мастил при атмосферному тиску 273 мм рт. ст. і температурі 20 °С знаходиться у межах 0,82...0,96  $кг / м^3$ .

2. Стискуваність. Характеризується модулем пружності при всебічному стиску. Більшість мастил мають стискуваність у межах 20 %.

3. Теплові властивості – впливають на змащувальні властивості, оскільки вони визначають умови тепловідведення від поверхні тертя. Теплопровідність характеризується коефіцієнтом теплопровідності.

4. Коефіцієнт об'ємного розширення – має значення при розрахунку резервуарів для зберігання мастил.

5. Застигання. При пониженні температури мастила його в'язкість зростає до тих пір, поки не відбудеться застигання.

6. Стабільність – здатність зберігати свої вихідні властивості під час експлуатації. Стабільність після в'язкості є найважливішою властивістю, тому що визначає довговічність мастила.

7. Піноутворюваність – перешкоджає виконанню мастилом його функцій.

Шкідливі наслідки піноутворення полягають у наступному:

- 1) піна може вибиватись через ущільнення назовні, що призводить до зменшення рівня мастила в об'єкті змащування;
- 2) насичене повітрям мастило нездатне забезпечити несучу властивість мастильного шару при терті;
- 3) порушується можливість рівномірної подачі мастила і систему;
- 4) піноутворюваність пришвидшує процес окислення мастила.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 32 / 76

8. Емульгування – здатність мастила змішуватись з водою.

Недопустиме через такі причини:

- а) зменшується в'язкість, що погіршує умови тертя;
- б) мастило перестає бути однорідним;
- в) вода в емульсії сприяє корозії дотичних до неї деталей;
- г) збільшується об'єм мастила в об'єкті змащування.

9. Корозійна стійкість – мастила можуть викликати корозію зміщуваних поверхонь при наявності у них кислот, води та інших агресивних присадок.

10. Вплив на неметалеві матеріали – агресивність мастил по відношенню до неметалевих матеріалів має значення з точки зору сумісності мастил із ущільненнями.

11. Липкість і нерозтікання – попереджує розбризкування мастил.

12. Змивання мастил водою – важливо при забрудненні поверхонь тертя або готової продукції.

13. Мийні властивості.

14. Негорючість мастил – має значення з точки зору безпечних умов праці при застосуванні мастил.

15. Сумісність з харчовими продуктами – при змащуванні обладнання харчової промисловості.

### **Контрольні запитання**

1. Конструкційні мастильні матеріали.
2. Технологічні мастильні матеріали
3. Основні службові властивості масел.
4. Змащувальні властивості мастил.
5. Поділ мастил на групи.
6. Основне призначення змащувальних матеріалів.

### **Тема 6. Нафтові і ненафтові мастила**

1. Нафтові мастила.
2. Склад базових мастил і присадки.
3. Ненафтові мастила.
4. Зміна властивостей мастил під час експлуатації, асортимент сучасних



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 33 / 76

мастил.

**1. Нафтові мастила.** Для змащування машин в основному застосовують нафтові мастила.

Свіжі нафтові мастила являють собою складну суміш вуглеводів різної будови чотирьох класів:

1. Парафінових.
2. Нафтових.
3. Ароматичних.
4. Змішаної будови.

У них присутні похідні вуглеводів – сірчані сполуки, а також небажані, але завжди наявні сполуки кисню – смоли і нафтові кислоти, кількість яких у мастилi тим менша, чим вища ступiнь його очищення при переробцi нафти.

Якість і склад нелегованого мастила залежить від нафти, з якої воно отримане, а також від технології її переробки. Нафта різних родовищ і навіть одного родовища, але взята з різних горизонтів, іноді різко відрізняється за складом. Тому різні партії мастила одного сорту, виготовлені за однією технологією, можуть мати певну різницю в експлуатаційних властивостях.

На території колишнього СРСР розрізняють дві основні групи нафти, з якої отримують мастила:

- 1) малосірчаниста (Баку, Грозний). Вона складається з нафтових вуглеводів і містять до 0,2 % сірки;
- 2) сірчаниста (Татарстан, Поволжя, Сибір). Складається з парафінових вуглеводів і містить до 1 % сірки.

Нафтові мастила отримують з мазуту (залишок після відгонки з нафти світлих продуктів – бензину, гасу, дизельного палива).

Чисті нафтові мастила мають посередні змащувальні властивості, хоча останні можуть бути значно поліпшені внаслідок легування.

Граничні значення температур, при яких можуть застосовуватися нафтові мастила без присадок, становлять (-30)...(-40) °С – 100...150 °С в залежності від сорту мастила.

Нафтові мастила можна застосовувати і при більш високих температурах, але в цьому випадку вони інтенсивно випаровуються та окислюються. Довга експлуатація нелегованих мастил при температурі більше 100 °С не

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 34 / 76

рекомендується.

Нафтові мастила не викликають корозії чорних та кольорових металів, але й не захищають від ржавіння сталі та, особливо, чавунні поверхні у присутності вологи. Також вони можуть викликати набрякання гумових ущільнень.

Леговані мастила.

Введення до нафтової основи присадок у суворо дозованій кількості дозволяє значно змінити властивості вихідного мастила.

Деякі сучасні мастила для відповідальних об'єктів змащування містять до 4–5 найменувань присадок, хоча, в принципі, їх кількість повинна бути мінімальною.

**2. *Склад базових мастил і присадки.*** У своїй основі мастила складаються з вуглеводів різних класів та їх похідних. Крім того, у мастилах всіх видів містяться хімічно малоактивні сірчанисті сполуки. Потім, у мастилах присутні кисневі сполуки двох категорій:

Асфальто-смолисті речовини;

Нафтові кислоти.

Крім того, у мастилах присутні спирти парафінового ряду – гліколи та гліцерин.

*Присадки до мастил.* Присадки, що вводяться до складу мастил, дозволяють отримувати нові продукти з наперед заданими властивостями, що мають мало спільного з вихідним базовим мастилом.

Існують наступні види присадок:

1. Присадки для поліпшення змащувальних властивостей. Їх застосовують для захисту від стирання, від задирання, для стимулювання стирання, для зменшення коефіцієнта тертя.

2. Антиокислювальні присадки – застосовують для уповільнення старіння внаслідок окислення.

3. Антикорозійні присадки – створюють на поверхнях тертя плівки, що захищають їх від корозії.

4. Антипінні присадки – у їх якості застосовують різні рідини, що руйнують бульбашки повітря.

5. В'язкісні присадки – різні полімерні сполуки, що стабілізують в'язкість мастила при зміні його температури.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 35 / 76

6. Присадки депресори – парафіни, що понижують температуру застигання мастил.

7. Антиемульгатори – спирти, що руйнують водо маслянисті емульсії.

8. Адгезійні присадки – тваринні та рослинні жири, що поліпшують липкість і нерозтікання.

**3. Ненафтові мастила.** Жирові мастила бувають тваринного і рослинного походження. Вони значно відрізняються від нафтових мастил за своїм складом. Основою нафтових мастил є вуглеводи.

Жирові мастила являють собою суміш складних ефірів, утворених різними жирними кислотами і гліцерином.

Змащувальні властивості жирових мастил кращі, ніж чисто нафтових. Але вони гірші нафтових по відношенню до стабільності під час експлуатації – швидко окислюються.

Ще до другої світової війни жирові мастила практично вийшли зі вжитку як самостійний вид мастильних матеріалів для машинобудування внаслідок їх дорожнечі та дефіцитності і низької стабільності.

Галузь, де вони збереглися до сьогодні – змащування приладів. Зокрема для змащування годинникових механізмів застосовують кісткове масло.

Застосовуються також гірчичне, касторове та інші види рослинних мастил.

Сьогодні жирові мастила, в основному використовують в якості присадок до нафтових мастил з метою поліпшення їх фрикційних властивостей і підвищення липкості.

Приклади з товарного асортименту мастил колишнього СРСР: сепараторне, телеграфне, суднове з присадками суріпного або гірчичного рослинних масел.

### Синтетичні мастила.

Виробництво синтетичних мастил набагато складніше і небезпечне, вартість їх набагато вища, ніж нафтових мастил. Тому їх застосовують лише у тих випадках коли нафтові мастила непрацездатні:

1. Особливо високі і особливо низькі температури експлуатація.

2. Експлуатація в умовах підвищеної пожежної.

3. Інші спеціальні умови, пов'язані наприклад, з вимогами підвищеної стійкості проти радіаційного випромінювання.

Головні споживачі синтетичних мастил – реактивна авіація (перепад тем-

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 36 / 76

ператур (-60 °С)...300 °С.

Сьогодні найбільше практичне значення мають наступні групи синтетичних мастил:

1. Складні групи.
2. Полігліколі.
3. Полісілоксани.
4. Фтористі та хлорофтористі вуглеводи.

#### Ефірні масла (мастила).

Найрозповсюдженішим видом синтетичних масел є складні ефіри карбонових кислот, що отримуються шляхом сполучення жирних кислот зі спиртами.

Найкращими експлуатаційними властивостями відрізняються діефірні масла, такі як ефіри себацінової, адипінової та азелаїнової кислот.

Діефірні масла перевершують нафтові за наступними показниками:

- змащувальними властивостями;
- індексом в'язкості;
- температурою застигання;
- стійкістю проти випаровування.

Недоліки: низька в'язкість, агресивність до гуми, лаків, фарб, свинцю. Є основними змащувальними матеріалами для реактивних двигунів.

Полігліколі – продукти конденсації двоатомних спиртів. Переваги – низька температура застигання; висока стабільність; добрі змащувальні властивості; високі антипригарні властивості (при високих температурах вони не полімеризуються, не утворюють смол і розчиняють продукти власного окислення; мало випаровуються; неагресивні до гуми).

Полісілоксанові мастила (сілікони) – являють собою полімерні кремнійорганічні сполуки. У своїй основі вони мають ланцюжок атомів кремнію та кисню, що передуються. Переваги: низька температура застигання, незначна випаровуваність, низький рівень горючості; хімічна інертність – що визначає їх високу стабільність проти окислення. Але, як і завжди, наші недоліки – продовження наших переваг. Головний недолік – погані змащувальні властивості.

Фтор- і фторхлорвуглецеві мастила – переваги: найвища термічна ста-

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 37 / 76

більність, негорючість, відсутність агресії до металів і гуми, задовільні змащувальні властивості. Недолік – висока температура застигання.

**4. Зміна властивостей мастил під час експлуатації, асортимент сучасних мастил.** Зміна властивостей мастил під час експлуатації, асортимент сучасних мастил. Змащувальні мастила за своєю природою значно менш стабільні в експлуатації, ніж метали та інші конструкційні матеріали машинобудування.

Під дією різних зовнішніх факторів мастило під час експлуатації модифікується і настає момент, коли воно виявляється нездатним виконувати свої функції.

Властивості мастил під час експлуатації змінюються внаслідок старіння під дією окислення та випаровування, а також забруднення твердими механічними домішками та водою.

Старіння – процес незворотний. Забруднення можна ліквідувати шляхом фільтрації твердих домішок і випаровування (або відстоювання) води.

Окислення мастил відбувається через контакт з киснем повітря і призводить до незворотних змін їхнього хімічного складу. При окисленні мастил відбувається наступне:

- 1) внаслідок утворення кислот зростає їх корозійна агресивність;
- 2) щільні продукти окислення випадають в осадок і утворюють на поверхнях деталей осади;
- 3) внаслідок ущільнення компонентів мастила збільшується його в'язкість;
- 4) поява у мастилі смол призводить до його потемніння. Зміна кольору – найхарактерніша ознака окислення мастил.

Стійкість проти окислення є головним фактором, що визначає термін служби мастила.

Заходи, що сприяють зменшенню швидкості окислення:

1. Забезпечення більш низьких експлуатаційних температур.
2. Зменшення вільної поверхні контакту мастила з повітрям.
3. Ретельне фільтрування мастила.

Асортимент сучасних мастил.

Конструкційні мастила прийнято розподіляти на:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 38 / 76

- 1) індустриальні для промислового обладнання загального призначення;
- 2) трансмісійні для трансмісій автомобілів, тракторів тощо;
- 3) циліндрові для циліндрів парових і водяних машин;
- 4) осьові для підшипників ковзання залізничного рухомого складу;
- 5) авіаційні для авіаційних поршневих двигунів;
- 6) двигунні (для двигунів внутрішнього згорання);
- 7) гідравлічні для об'ємних динамічних гідропередач;
- 8) мастила для приладів.

Ці назви у більшості застаріли і не повністю характеризують дійсні сфери їх застосування.

Конструкційні мастила можна розділити в залежності від їх призначення на три категорії мастила загального призначення (універсальні), спеціалізовані (для певної категорії об'єктів змащування, наприклад, турбінні, компресорні, моторні тощо) і спеціальні (для одного об'єкта змащування, наприклад, мастило для заднього моста автомобіля).

Конструкційні мастила сучасного асортименту відрізняються наступними особливостями:

#### Мастила загального призначення.

Ці мастила розраховані на застосування в загальних умовах, тобто, для змащування механізмів, що працюють у повітряному середовищі, при граничних температурах від  $(-30^{\circ}\text{C})$  до  $100^{\circ}\text{C}$ , при відсутності особливих вимог, пов'язаних зі специфікою експлуатації машин.

До цього класу відносяться і мастила для зубчастих та інших механізмів верстатів, підйомно-транспортного, металургійного та інших видів обладнання, для автомобілів (крім двигунів).

Мастила загального призначення на практиці часто застосовують в любых об'єктах змащування. Наприклад, мастило індустриальне 50 (И-50) застосовують в автомобільних двигунах, мастило трансформаторне в суміші з авіаційним мастилом МС-20 – у турбореактивних двигунах, мастило індустриальне ІС-20 і турбінне 22 – у гідропередачах.

#### Мастила спеціалізовані і спеціальні.

Мастила для парових і водяних турбін являють собою порівняно мало-в'язкі субстанції високої стабільності. Внаслідок можливості обводнення вони повинні мати особливо високі анти емульсійні властивості. Нічим іншим вони не відрізняються від мастил загального призначення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 39 / 76

Мастила для черв'ячних передач – повинні мати підвищені антифрикційні властивості, що досягається введенням до складу звичайних нафтових мастил жирових присадок, наприклад, 5 % сала, 5...10 % касторового масла. При цьому зменшується коефіцієнт тертя і поліпшується коефіцієнт корисної дії передачі, але одночасно зменшується стійкість мастила проти окислення. Тому звичайно для змащування черв'ячних передач застосовують нелеговані високов'язкі мастила типу циліндрових.

Все сказане відноситься до змащування і інших механізмів, робота яких залежить від величини тертя, наприклад, механізм «гвинт-гайка».

Циліндрові мастила – їх пряме призначення полягає у змащуванні циліндрів парових машин, куди вони подаються разом із паром. Як правило, це високов'язкі мастила з жировими присадками. Оскільки парові машини на сьогодні втратили своє колишнє значення, циліндрові мастила необхідно практично розглядати, як мастила загального призначення.

Гідравлічні мастила – мають низьку в'язкість і в цілому мало відрізняються від мастил загального призначення. Головна вимога до них – високий модуль пружності (мала стискуваність).

Мастила для захисту від релаксійних коливань застосовуються для змащування напрямних верстатів з метою попередження переривчастого переміщення супортів, траверс, столів тощо. Ці мастила містять присадку, що забезпечує зростання коефіцієнта тертя одночасно зі швидкістю ковзання.

Припрацювальні мастила – служать для припрацювання нових механізмів. Містять стираючу і антизадирну присадки.

Моторні мастила – прийнято класифікувати за групами (А–Е) в залежності від напруженості режиму роботи двигунів внутрішнього згорання, для яких вони призначені.

Мастила групи А – високоочищені, без присадок.

Б–Е – містять присадки, що забезпечують захист двигуна від зносу, нагару, корозії. Ці мастила високо стабільні, мають високі мийні властивості і нейтралізують агресивну дію кислих продуктів згорання палива.

Б – застосовуються у карбюраторних двигунах для захисту штовхачів клапанів і кулачків.

В–Е – відповідають вимогам змащування більшості сучасних двигунів.

Компресорні мастила – повинні мати анти емульсійні властивості і низьку температуру застигання.

Авіаційні мастила – високоякісні двигунні мастила високої в'язкості, з низькою температурою застигання.

Мастила для змащування приладів – застосовуються для одноразового

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 40 / 76

наповнення контрольно-вимірювальних приладів і годинників, де вони повинні працювати довгий час (до декількох років). Повинні мати високу нерозтічність по поверхні, високі антифрикційні властивості, високу стабільність проти окислення.

Північні та арктичні мастила – звичайні нафтові мастила застигають при температурі (-30 °С). Щоб забезпечити нормальну експлуатацію машин, які працюють в районах із низькою температурою, не підігріваючи їх, створені «північні» та «арктичні» мастила з температурою застигання (-30 °С).

Додаткове зменшення температури застигання досягається застосуванням так званих депресорних присадок.

### **Контрольні запитання**

1. Характеристики нафтових мастил.
2. Склад базових мастил і присадки.
3. Ненафтові мастила – змащувальні матеріали на базі рослинних і тваринних жирів.
4. Зміна властивостей мастил під час експлуатації.
5. Синтетичні мастила.
6. Старіння мастильних матеріалів.

### **Тема 7. Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин способами пластичного деформування та нанесенням поверхневих покриттів**

1. Дорнування.
2. Обробка глибоких отворів – точність розміру, шорсткість поверхні.
3. Зміцнення та переміцнення поверхневих шарів, режими дорнування,



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 41 / 76

натяг, змащування.

4. Алмазне вигладжування.

5. Інструмент для вигладжування зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь.

6. Параметри і режими вигладжування.

7. Нанесення поверхневих покриттів.

**1. Дорнування.** Дорнування є ефективним способом викінчувально-зміцнювальної обробки отворів і широко застосовується на виробництві.

Розширенню сфер його застосування сприяє висока надійність отримання заданих параметрів оброблюваних поверхонь, простота експлуатації і добрі експлуатаційні властивості оброблених таким способом поверхонь.

Суть дорнування полягає у тому, що через наперед оброблений отвір в оброблюваній деталі пропускається інструмент (дорн), що складається зі стержня, на якому розміщені де формівні елементи з діаметрами, що збільшуються у поздовжньому напрямку до кінця дорна.

При проході через отвір інструмента конічні елементи пластично деформують внутрішню поверхню і стінки деталі, виправляють неточності, вигладжують поверхню і зміцнюють поверхневий шар отвору, внаслідок чого поліпшується її зносостійкість. Таким способом можна обробляти деталі з пластичних металів (сталь, алюмінієві сплави, латуні, бронзи) діаметром 5...160 мм, довжиною до 5000 мм, з товщиною стінок від самих малих (1 мм) до практично безкінечних, з деформаціями від малих поверхневих до значних, що досягають 10...20 % діаметра отвору і з вихідною твердістю металу деталі до 40...45 HRC<sub>e</sub> при наскрізних деформаціях стінок деталі і до 60 HRC<sub>e</sub> при поверхневих деформаціях.

Найбільш ефективною є наступна конструкція дорна (рис. 8, 9):

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 42 / 76

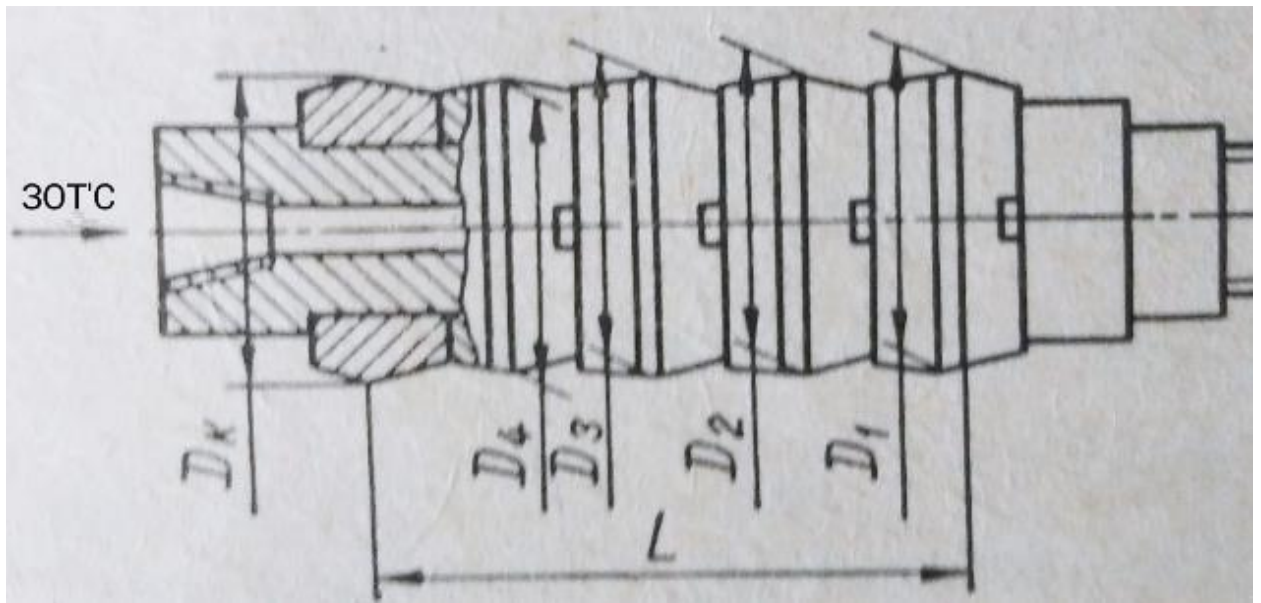


Рис. 8. Дорн

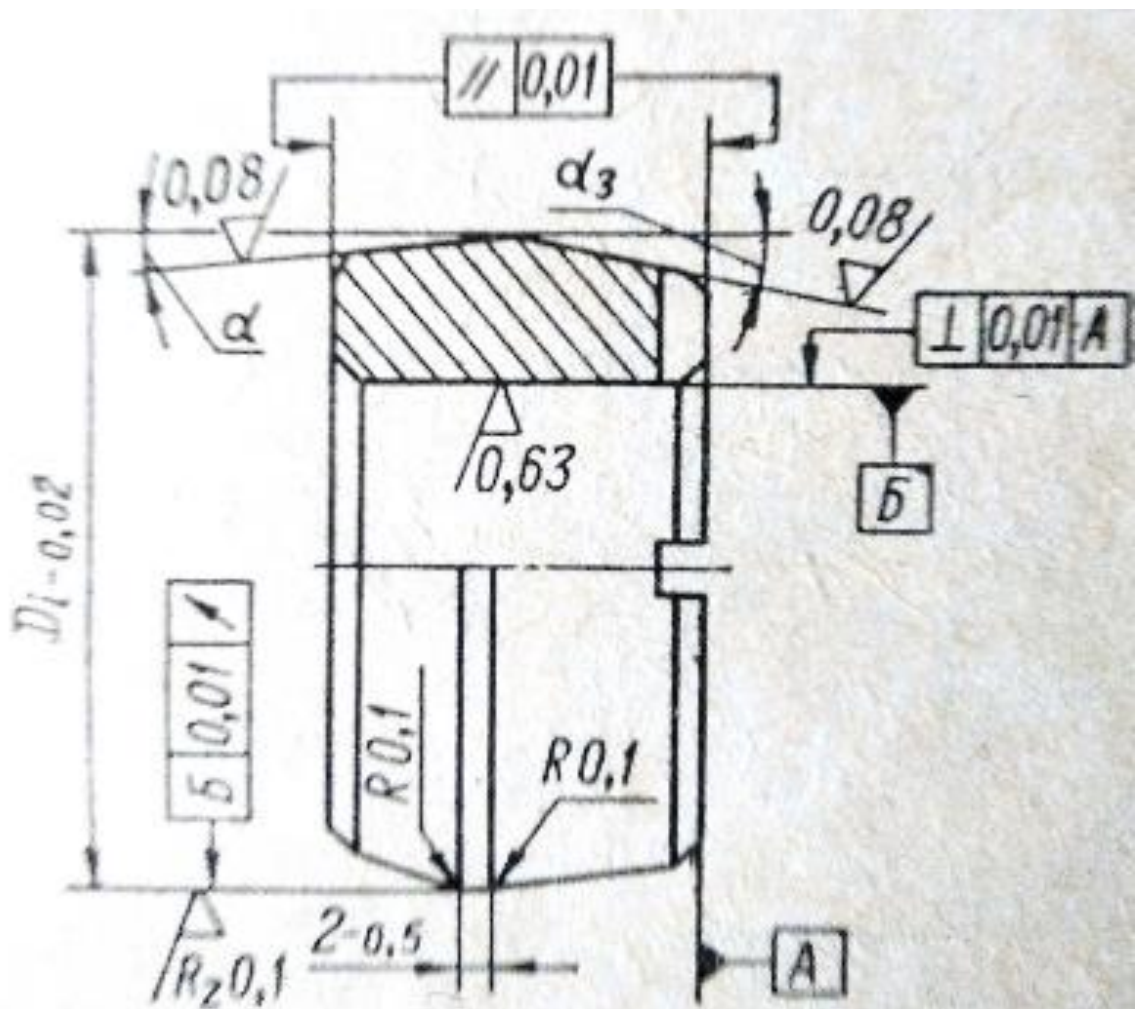


Рис. 9. Кільце дорна

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 43 / 76

Забірна частина кільця виконується у вигляді конуса, що дозволяє легко деформувати метал і легко проникати в отвір.

Ширина циліндричного кільця 1,5...2,0 мм.

Тильна частина кільця для зменшення тертя має зворотній конус.

Кожне наступне кільце відрізняється від попереднього по діаметру на 0,15...0,40 мм – на величину натягу.

## **2. Обробка глибоких отворів – точність розміру, шорсткість поверхні.**

Дорнування здійснюється на протяжних, модернізованих стругальних, довбальних, прошивних і навіть токарних верстатах.

Зі збільшенням натягу зростає зусилля дорнування, збільшується глибина деформованого шару і зменшується шорсткість обробленої поверхні. При збільшенні натягу  $> 0,35$  мм шорсткість зростає, що пояснюється деформуванням металу не тільки в радіальному напрямку, але й у напрямку руху дорна, що під впливом сил тертя утворює на обробленій поверхні задирки, риски і нерівності.

Твердосплавні деформуючі кільця піддаються лише механічному зносу по робочому конусу.

Натяг на кожне кільце повинен бути нерівномірним, на першому він має максимальну величину, на наступних – меншу, а наприкінці робочої частини дорна установлюють 2 кільця одного діаметра.

Режим дорнування:

1) Швидкість 0,03...0,12 м/с.

Геометрія конуса:  $\alpha = 4...5^{\circ}$ .

Параметри поверхні, що досягаються дорнуванням: 7–8 квалітети точності;  $Ra$  0,08...0,63.

Поверхневий шар зміцнюється у 1,5...2,0 рази.

Для змащування сталевих деталей використовують суріпкове, льняне, конопляне, касторове мастила, рідину МР-1. Для чавунних – гас.

Дорнування отворів створює у поверхневому шарі напруги стиску, що досягають 35 МПа.

**3. Зміцнення та перезміцнення поверхневих шарів, режими дорнування, натяг, змащування.** Поліпшувати якість поверхні в ході дорнування можна до певної межі. Ця межа характеризується луценням поверхні внаслідок *пере-*

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 76

## **зміцнення.**

Результати дорнування:

- 1) збільшення ресурсу роботи деталей;
- 2) зменшення витрат запасних частин;
- 3) на 30 % збільшується продуктивність праці за рахунок видалення з технологічного процесу операцій чистового розверстування, хонінгування і термообробки.

**4. Алмазне вигладжування.** Алмазне вигладжування – один із самих простих способів поверхневого пластичного деформування (ППД).

Процес аналогічний точінню, тільки замість різця застосовується алмазний (або з іншого матеріалу) вигладжувач.

Матеріал робочої частини:

1. Природний алмаз.
2. Штучний алмаз.
3. Синтетичний рубін.
4. Мінералокераміка.
5. Тверді сплави.
6. Загартовані інструментальні сталі.

Вимоги до матеріалів накієчника вигладжувача:

$$\sigma_{ст} = 200 \dots 400 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{зг} = 500 \dots 1000 \text{ МПа}.$$

Термостійкість: 700...800°C.

Стійкість вигладжувача повинна бути у межах 10...30 год.

Шорсткість робочої поверхні накієчника  $Ra \leq 0,02 \text{ мкм}$ .

За критерій зносу приймається дільниця зносу, максимальний розмір якої не повинен перевершувати 0,3 мм.

**5. Інструмент для вигладжування зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь.** Геометрична форма робочої поверхні алмазного накієчника вигладжувача визначається формою оброблюваної поверхні і умовами роботи.

Накієчнику може надаватися форма сфери, бокової поверхні циліндра, конуса тощо. Найбільше розповсюдження отримали сферична та конічна форми накієчника.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 45 / 76

Найпростіша конструкція вигладжувача (рис. 10):

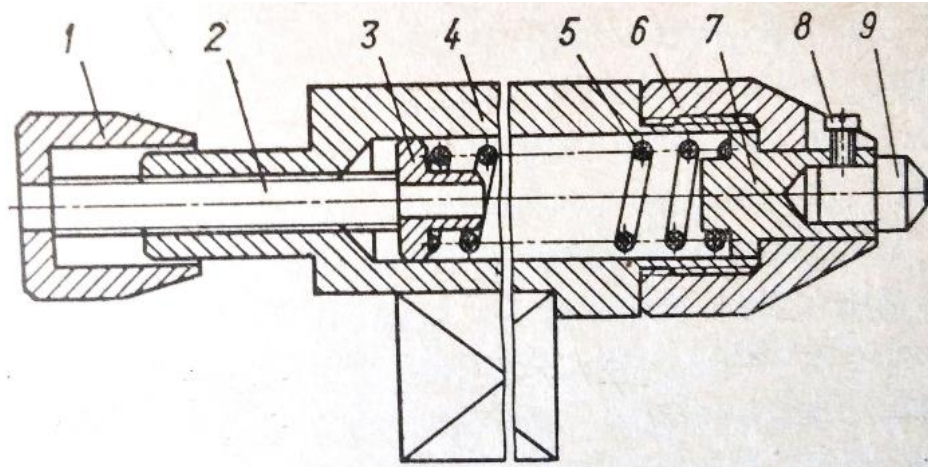


Рис. 10. Пристрій для вигладжування зовнішніх циліндричних поверхонь: 1 – маховик для регулювання зусилля, 2 – гвинт мікрометричний. 3 – упор, 4 – корпус, 5 – пружина, 6 – гайка, 7 – плунжер, 8 – гвинт, 9 – вигладжувач

Поліпшення продуктивності вигладжування досягається шляхом суміщення в одному пристрої різця для чистового розточування 7 (рис. 11) з вигладжувачем 6. Для розточування загартованих сталей або чавунів застосовують різець, оснащений НТМ. Вигладжувач утримується гайкою 3. Зусилля вигладжування створюється пружиною 2, яка через важіль 8 і втулку 5 впливає на вигладжувач. Важільний механізм для зручності змонтований у скалці 1, що знімається, прикріпленій гвинтами до корпусу 4.

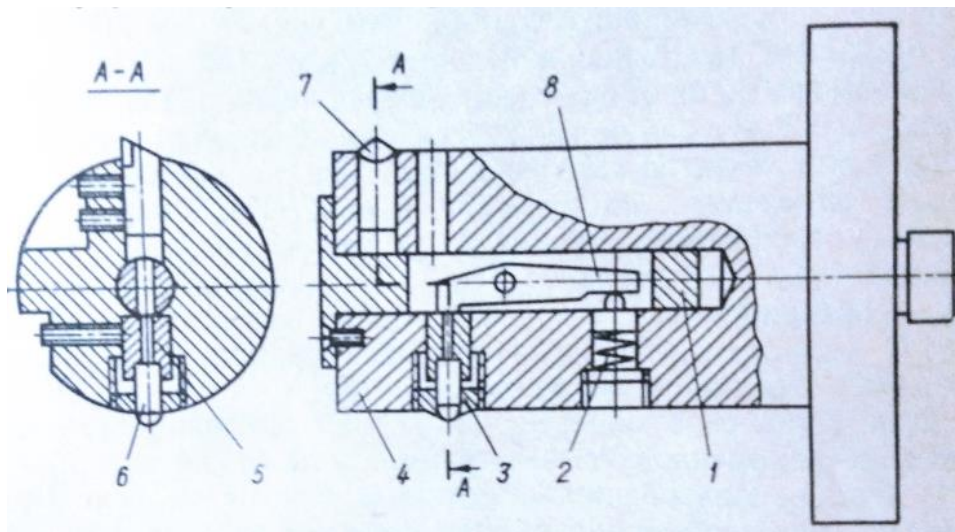


Рис. 11. Комбінований пристрій для чистового розточування та вигладжування отворів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 46 / 76

**6. Параметри і режими вигладжування.** Параметри алмазного вигладжувача:

1. Радіус сфери накієчника  $R$  (для обробки загартованих сталевих виробів  $R \leq 1,5$  мм).

Для обробки матеріалів з твердістю  $HRC_e$  35...50 –  $R = 1,5...2,5$  мм. Для кольорових металів  $R = 2,5...3,0$  мм.

2. Зусилля вигладжування повинне бути оптимальним. Звичайно цн 50...350 Н.

Вигладжуванням досягається шорсткість  $Ra = 0,10...0,32$  мкм і навіть дзеркальна поверхня; при цьому у поверхневому шарі виникають залишкові напруги стиску, зростає його мікротвердість, досягається структурна однорідність поверхневих шарів.

3. Величина заглиблення вигладжувача – до 5 мкм. Для розмірів поверхонь за 7–9 квалітетами це незначна частина допуску на розмір.

Вигладжування змінює рельєф обробленої поверхні, згладжуючи гострі вершини і впадини, збільшуючи опорну площу поверхні. При цьому зберігається точність форми і розмірів деталі.

Алмазним вигладжуванням оброблюють загартовані, цементовані, азотовані і покриті твердими гальванопокриттями деталі.

#### Режими вигладжування:

1. Швидкість обертання оброблюваної деталі при вигладжування:  $V = 3...5$  м/с. Обмеження для швидкості – жорсткість технологічної системи і температура, що виникає у процесі обробки.

Оптимальною є температура 80...120°C. При переході за ці значення температури необхідно працювати зі змащувально-технологічними рідинами (ЗОР) або іншими ЗОТС.

Подача, мм/об, рекомендується у межах 0,03...0,08 мм/об.

У випадку роботи двома вигладжувачами:

$V = 1,0...1,7$  м/с;  $S = 0,4...0,6$  мм/об.

Найбільше зміцнення і найменша шорсткість досягається при таких параметрах вигладжувачів:

1-й:  $R = 1,0...1,5$  мм; зусилля притискання 200...300 Н,

2-й:  $R$  – до 4 мм; зусилля – 100...200 Н.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 47 / 76

Подача:  $S = 0,050 \dots 0,075$  мм/об;  $V = 0,9 \dots 1,5$  м/с.

ЗОР – індустріальне мастило И-20А.

Перший вигладжувач забезпечує міцність поверхневого шару, а другий – згладжує нерівності рельєфу.

Зараз можна стверджувати, що внаслідок алмазного вигладжування стійкість виробів із хромистих сталей у корозійному середовищі збільшується у 3 рази (порівняно зі шліфуванням).

Інструментальні сталі (вигладжені) проявляють підвищену корозійну стійкість в умовах атмосферної корозії (~ у 2 рази).

### Довговічність:

Накопичені дані про довговічність вигладжених деталей показують, що:

- 1) довговічність деталей з концентраторами напруг вища, порівняно з обробленими іншими способами ~ у 10 раз;
- 2) довговічність вигладжених деталей з хромистих сталей збільшується ~ у 30...35 раз;
- 3) довговічність вигладжених кілець підшипників кочення збільшується у 3,5 рази;
- 4) у 1,5 рази збільшується довговічність вигладжених роторів;
- 5) у 2,3...3,5 раз збільшується довговічність вигладжених деталей запірної арматури;
- 6) термін служби вигладжених ущільнювальних кілець зростає ~ у 2 рази.

## **7. Нанесення поверхневих покриттів.**

### Наплавка і газотермічне напилення.

Наплавка є одним із найбільш поширених способів зміцнення. Вона дозволяє підвищити стійкість деталей проти абразивного спрацювання, електрохімічної корозії, ерозії, окалиноутворення, термічної втоми тощо; дозволяє замінити високолеговані сталі вуглецевими, а кольорові метали – чорними. Найчастіше застосовується газове або електродугове наплавлення, а також різні механізовані способи наплавлення.

Зокрема, газове наплавлення використовують для зміцнення тугоплавкими матеріалами деталей, робочі поверхні яких повинні мати значну твердість і високу зносостійкість. Так отримують наплавлені шари товщиною 0,5 мм і більше. Наплавку можна робити і на леговані інструментальні сталі 5ХНМ, 3ХВА, 4ХВС та ін. Найкращі результати наплаки досягаються на низьколегова-

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 48 / 76

них конструкційних сталях 40ХН, 40Х тощо. При виборі наплавки необхідно брати до уваги, що вона у переважній більшості випадків підвищує зносостійкість, але одночасно зменшує межу виносливості, наприклад, для деталей з нормалізованої сталі 45 до 25 % і до 35 % у деталей, виготовлених із цієї сталі і загартованих СВЧ.

Технологічні процеси наплавлення займають провідне місце при виготовленні та відновленні деталей, з їх допомогою відновлюють майже 70 % деталей.

Ручне дугове наплавлення виконують, як правило, металевими електродами при живленні дуги постійним або змінним струмом.

При наплавленні дугою виникають наступні небажані наслідки: окислюється метал, поглинається азот, вигоряють легуючі елементи, відбуваються об'ємні і структурні зміни, що призводить до короблення виробів, порушення термообробки і зменшення твердості.

Електроди для наплавки позначають буквами ЕН і цифрами, що свідчать про гарантовану твердість наплавленого шару. Електроди спеціального призначення позначають трьома буквами. Наприклад, електрод ЕНР-62 розшифровується, як: електрод для наплавки різального інструменту, що забезпечує твердість шару  $HRC_e 62$ .

Газову наплавку здійснюють, як правило, ацетиленокисневим нейтральним полум'ям. В окремих випадках застосовують відновлювальне полум'я.

Наплавка дає можливість отримати на поверхнях деталей шар необхідної товщини і необхідного хімічного складу, високої твердості та зносостійкості.

В загальному об'ємі робіт по відновленню з одночасним зміцненням поверхонь різні способи наплавки забезпечують її обсяги (у %): наплавка під шаром флюсу – 32; вібродугова наплавка – 12; наплавка у середовищі вуглекислого газу – 20; наплавка порошковим дротом – 10; плазмова наплавка – 1,5; гальванічні способи – 5; електрошлакова наплавка – 1,5; заливання рідким металом – 2; полімерні покриття – 5; інші способи – 12.

Автоматична наплавка під шаром флюсу. При цій наплавці в зону горіння дуги (рис. 12) подають сипучий флюс, що складається з дрібних зерен. Під впливом високої температури частина флюсу плавиться, утворюючи навколо дуги пластичну оболонку, яка надійно оберігає розплавлений метал від впливу кисню та азоту.

Автоматична наплавка ефективна у тих випадках, коли необхідно наплавити шар товщиною  $> 3$  мм (наприклад, при обробці таких деталей, як котки, цапфи, ролики, осі тощо), глибоке проплавлення небажане, тому що воно збільшує деформацію деталі.

Вплив на глибину проплавлення має відносне розміщення електрода і деталі. На практиці застосовують наплавку кутом вперед, при якій глибина проплавлення менша, ніж при напрямку кутом назад. Глибина проплавлення також зменшується зі збільшенням вильоту електрода. Для наплавки під шаром



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 49 / 76

флюсу застосовують встановлені на токарних верстатах або спеціальних установках голівки типу А-580, ОКС-1031Б, ОКС-1252М.

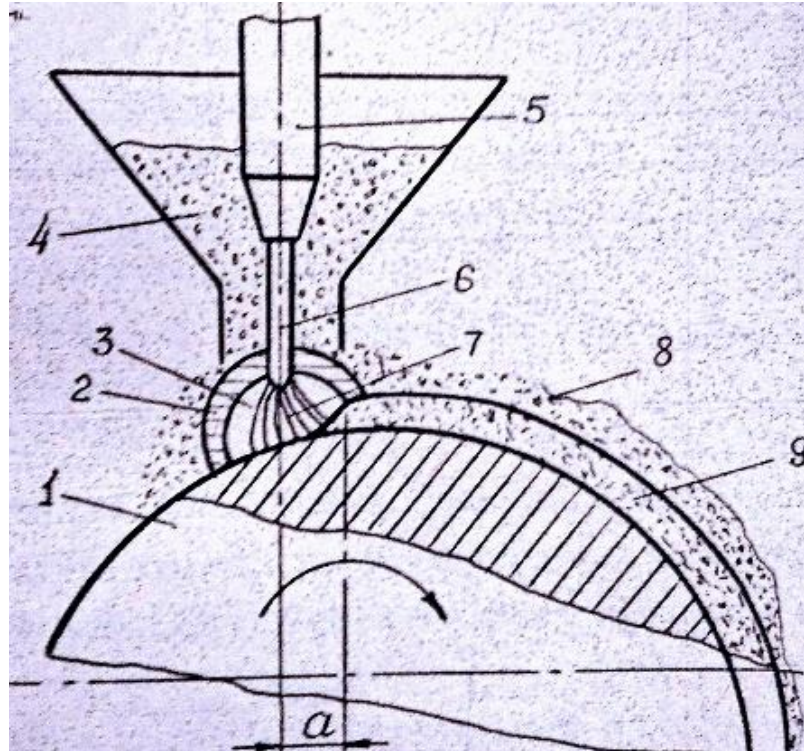


Рис. 12. Схема автоматичної наплавки: 1 – наплавлювана деталь; 2 – оболонка рідкого флюсу; 3 – еластична оболонка; 4 – бункер із флюсом; 5 – мундштук; 6 – електрод; 7 – електродуга; 8 – шлакова кірка; 9 – наплавлений метал

Якість наплавленого металу і його зносостійкість залежать від марки електродного дроту, флюсу та режимів наплавки.

Для наплавки низьковуглецевих і низьколегованих сталей використовують дріт із низьковуглецевих (Св-08, Св-08А), марганцевих (Св-08Г, Св-08ГА) і кремніймарганцевій (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС) сталей.

Сталі з великим вмістом вуглецю наплавляють дротом Нп-65Г, Нп-80, Нп-30ХГСА, Нп-40Х13 (ДСТУ 3671-97 (ГОСТ 10543-98)).

Наплавка порошковим дротом. Добрі результати при наплавці дає застосування порошкових дротів, до складу яких входять ферохром, феротитан, феромарганець, графітний та залізний порошки. Наплавку виконують під шаром флюсу або у середовищі захисного газу, але при наявності у дроті відповідних компонентів можлива наплавка і без флюсового або газового захисту.

Порошковий дріт виготовляють на спеціальних верстатах методом волочіння. Вихідним матеріалом є стрічка з низьковуглецевої сталі і порошок із вмістом необхідних елементів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 50 / 76

Використовують два типи порошкового дроту: для наплавки під флюсом і для наплавки відкритою дугою.

Наплавка у середовищі вуглекислого газу. Цей спосіб значною мірою відрізняється від інших способів зміцнення та відновлення деталей – не потрібно ні флюсів, ні електродних покриттів. Дуга між електродом і наплавлюваним виробом горить у струмені газу, який витискує повітря з плавильного простору і захищає розплавлений метал від впливу кисню та азоту.

Твердість наплавленого металу в залежності від марки і типу електродного дроту 200...30 НВ.

Вібродугова наплавка. Різновид дугової наплавки металевим електродом. Процес реалізується при вібрації електрода з подачею охолоджувальної рідини на наплавлену поверхню.

До наплавлюваної поверхні деталі, що обертається в центрах, роликami механізму подачі з касети через вібруючий мундштук подається електродний дріт. Внаслідок коливань мундштука, викликаних ексцентриковим механізмом, дріт періодично доторкується до поверхні деталі і розплавляється під впливом імпульсних електричних розрядів, що поступають від генератора. Під впливом вібратора мундштук разом із дротом вібрують з частотою 110 Гц і амплітудою коливань до 4 мм (практично 1,8...3,2 мм).

Технологія вібродугової наплавки передбачає обробку деталей з циліндричними, конічними зовнішніми і внутрішніми, а також і з плоскими поверхнями.

Вібродугова наплавка під шаром флюсу має низку переваг:

- 1) дає можливість наплавляти покриття на обмежених площах, що зменшує трудомісткість наступної механічної обробки;
- 2) дозволяє отримувати наплавлений шар без пор і тріщин;
- 3) забезпечує мінімальну деформацію деталі, яка не перевершує полів допусків посадочних місць;
- 4) дозволяє мінімізувати зону термічного впливу.

Недоліком вібродугової наплавки є зменшення на 40 % опору втомі наплавлених деталей. Цей показник можна поліпшити термообробкою.

Дугова наплавка з газополуменевим захистом. Великі технологічні можливості при зміцненні деталей широкої номенклатури має дугова наплавка з газополуменевим захистом. Спосіб дозволяє наплавляти на поверхні щільні прошарки, застосовуючи доступні та відносно дешеві вуглецеві дроти. Метал, наплавлений високовуглецевими дротами на сталеві деталі, добре сприймає загартування. Можна також наплавляти покриття сталевим низьковуглецевим дротом на чавунні деталі. Наплавлений шар в цьому випадку відрізняється доброю оброблюваністю.

Особливістю способу є те, що захисні гази в зону наплавки подаються двома концентричними потоками: в зовнішньому потоці – природний газ

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 51 / 76

(ДСТУ ISO 13443:2015) або пропан-бутанову суміш (ДСТУ EN 27941:2010), у внутрішньому потоці – кисень (ДСТУ ISO 2046:2018). При цьому природний газ і продукти його згоряння захищають зону наплавки від проникнення азоту і повітря. Але, разом з тим, вуглекислий газ викликає при наплавленні (і при зварюванні) велику пористість. Шкідливий вплив газу на щільність наплавленого металу певною мірою нівелюється наявністю кисню, який подається вузьким внутрішнім потоком в зону дуги. З виходом із пальника газ згоряє, утворюючи полум'я. Таким чином, дуга горить у факелі газокисневого полум'я (рис. 13).

Електрошлакова наплавка. Для виготовлення біметалевих деталей із зносостійким шаром значної товщини (>10 мм) застосовують електрошлакову наплавку. В цьому процесі використовують теплоту, що виділяється при проходженні електроструму через розплавлений шлак.

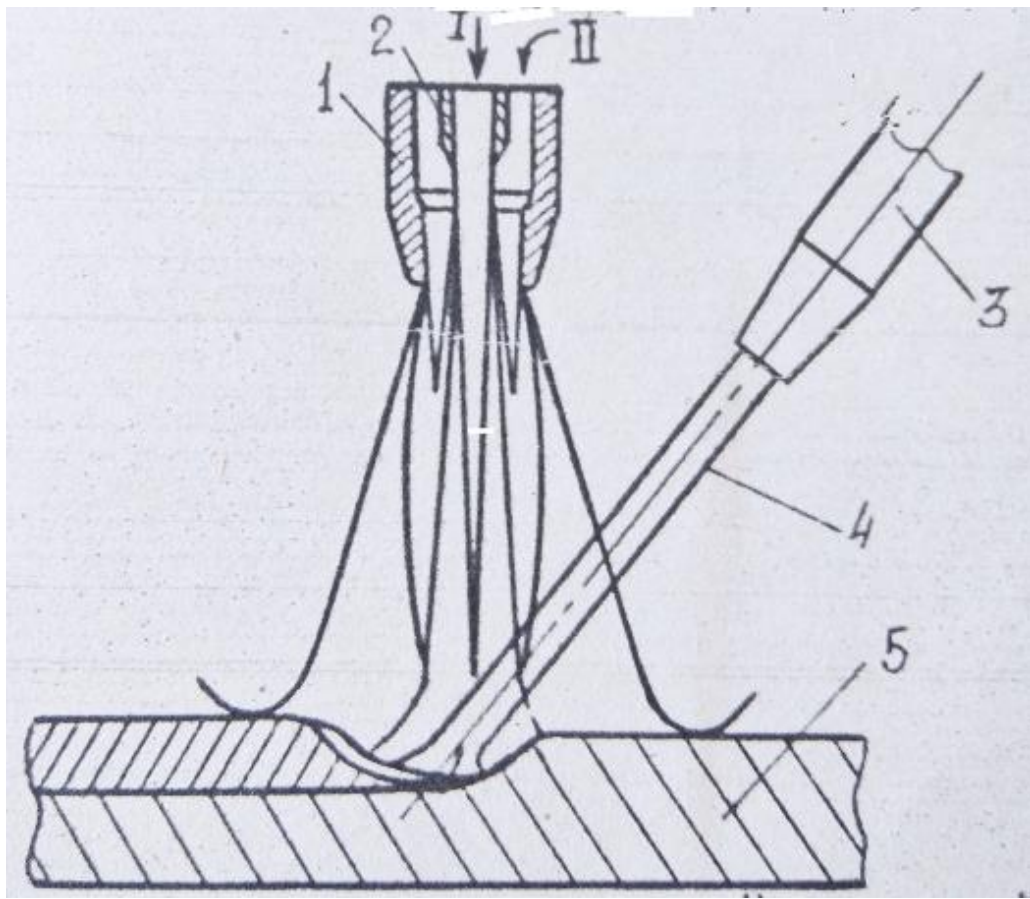


Рис. 13. Схема наплавки з газополумуневим захистом  
(1 – сопло для природного газу, 2 – сопло для кисню, 3 – мундштук,  
4 – дріт, 5 – виріб, I та II – подача відповідно кисню і природного газу  
(пропан-бутану)

Газотермічні напилені покриття.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 52 / 76

## Терміни та основні положення

*Газотермічні напилені покриття* – це покриття, отримані з використанням високотемпературного газового струменя шляхом прискорення часток напилюваного матеріалу, при зіткненні яких із основою або напиленим матеріалом виникає їх з'єднання за рахунок адгезії, механічного зчеплення та часткового зварювання.

При газотермічному напиленні (ГТН) на поверхню матеріалу переносяться частки диспергованого матеріалу розміром 10...150 мкм у рідинному і (або) пластичному стані. Сутність процесу полягає у тому, що при високих температурах відбуваються процеси плавлення, змочування, адгезії, зчеплення, спікання, які перетворюють механічну субстанцію у суцільну масу.

При використанні компактного матеріалу, наприклад, дроту, це роздрібнення на частки відбувається у процесі його плавлення і розпилення (перенесення) на основу.

ГТН класифікується за енергетичними ознаками або функціональним призначенням.

ГТН за енергетичними ознаками можна класифікувати за такими видами:

- газополуменеве напилення – ГТН, при якому для напилення використовується струмінь продуктів горіння суміші газів, що спалюються за допомогою пальника;

- електродугове напилення – ГТН, при якому нагрівання металу у вигляді дроту, стрижня або стрічки здійснюється електричною дугою, а диспергування – струменем стиснутого повітря;

- плазмове напилення – ГТН, при якому для напилення використовується плазмовий струмінь (може бути плазмово-дуговим (плазмовий струмінь утворюється за допомогою електричної дуги) і високочастотним, при якому плазмовий струмінь утворюється за допомогою високочастотного розряду);

- детонаційне напилення – ГТН з використанням для напилення струменя продуктів детонації;

- «холодне» газодинамічне напилення – формування покриття, для якого використовується кінетична енергія високошвидкісного (надзвукового) газового струменя, розігрітого до температури, значно меншої, ніж температура плавлення напилюваного матеріалу.

- *лазерне напилення* – напилення, коли для утворення покриття використовується лазерний промінь, що дозволяє точно контролювати теплове випромінювання носія енергії. Співвісно з променем подається захисний газ (аргон, гелій, їх суміші або азот) з витратами 1,2...3,0 м<sup>3</sup>/год. Порошок подається у зону фокуса лазерного променя. Найпоширенішими є газолазерні установки (СО<sub>2</sub>-лазери).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 53 / 76

Газотермічне напилення, при якому у об'ємі робочої камери підтримується заданий склад та тиск газового середовища, називається *напиленням у контрольованій атмосфері*.

Газотермічне напилення у контрольованій атмосфері, при реалізації якого безперервно підтримується задане розрідження газового середовища, називається *напиленням у динамічному вакуумі*.

Покриття, отримане газотермічним напиленням, називається газотермічним покриттям (ГТНП).

Залежно від виду використаної для напилення енергії розрізняють *тигельне, газополуменеве, електродугове, високочастотне, плазмове (плазмодугове) і детонаційне покриття*.

Останнім часом застосовуються так звані гібридні процеси, при яких для нагрівання напилюваного матеріалу використовують декілька джерел: наприклад, детонація та плазма, лазерний промінь і плазма тощо.

Також розвиваються процеси з використанням надзвукових плазмових струменів і струменю продуктів горіння при газополуменовому напиленні.

Залежно від функціонального призначення класифікація ГТНП наступна:

1. **Ущільнюючі**, які забезпечують необхідну стабільність зазорів у виробі або конструкції при їх експлуатації.

2. **Термостійкі**, що мають необхідну працездатність при багаторазових різких змінах температури.

3. **Коркові**, сформовані на основі створення заданої форми та зняті з основи для використання їх як окремого виробу.

4. **Терморегуляційні** – забезпечують регулювання поглинання та випромінювання поверхнею теплових потоків (терморегуляційне покриття, яке знижує дію теплових потоків на поверхню, називається *теплозахисним газотермічним покриттям*).

5. **Захисні** – захищають поверхню від зовнішніх негативних впливів.

Захисні ГТНП поділяться на:

1) **ерозійностійкі** – знижують вплив високошвидкісних струменів на поверхню;

2) **корозійностійкі** – збільшують опір поверхні корозійному руйнуванню (корозійностійкі покриття, що збільшують опір поверхні руйнуванню при високих температурах, називаються жаростійкими);

3) **зносостійкі** – збільшують опір поверхні різним видам спрацьовування (насамперед, зносу).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 54 / 76

Зносостійкі покриття, в свою чергу, поділяються на:

- а) антифрикційні – знижують коефіцієнт тертя у контактній зоні суміжних деталей пари тертя;
- б) фрикційні – збільшують коефіцієнт тертя.
- в) антиадгезійні – знижують схильність контактуючих поверхонь до адгезійної взаємодії або зчеплення.

6. **Функціональні** покриття зі специфічними вимогами – біосумісні, радіаційні, композиційні (з наперед заданим складом), з регульованою структурою (пористі, шарові, мікрокристалічні, аморфні, нанотекстуровані) та ін.

Газотермічне покриття з двох або більше послідовних шарів матеріалів, відмінних за складом, називається багатошаровим ГТП.

Багатошарове покриття, в якому кожний проміжний шар має декілька компонентів із градієнтом, спрямованим від основи до зовнішнього шару, називається градієнтним покриттям.

Частина ГТП, яка безпосередньо прилягає до основи та зв'язує між собою основну частину покриття і основу, називається підшаром або прошарком.

Частина покриття, яка розташована над прошарком і виконує робочу функцію, називається основною частиною.

Відрізняють також зовнішній шар ГТП, поверхня якого контактує із зовнішнім середовищем, та проміжні шари, розташовані між основою або прошарком і зовнішнім шаром.

### Переваги технологій ГТП.

1. Можливість нанесення покриттів на вироби, виготовлені практично з будь-якого матеріалу – не лише з металу, але й зі скла, фаянсу, фарфору, органічних (у т.ч., з дерева, тканин, паперу, картону) і багатьох інших матеріалів. Цієї переваги не має жоден із відомих способів поверхневої обробки, з яких одні придатні тільки для металів, а інші, хоча і мають багато цінних переваг, прийнятні не для всіх матеріалів.

2. Можливість напилення різних матеріалів за допомогою одного і того ж обладнання.

3. Відсутність обмежень розмірів оброблюваних виробів. Покриття можна напилювати як на велику площу, так і на обмежені ділянки виробів. При нанесенні ж покриттів електролітичним осадженням, зануренням в розплав або дифузійним насиченням (азотуванням, цементацією та ін.) можливості обробки виробу обмежені розмірами ванни або печі. Напилення забезпечує значний економічний ефект при неможливості застосування інших способів зміцнення, наприклад, при поверхневій обробці частини великого виробу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 55 / 76

4. Можливість застосування для збільшення розмірів деталі (відновлення і ремонт зношених деталей машин). Щоб уникнути вибраковування виробу, при механічній обробці якого зрізається зайвий матеріал, або при реставрації деталей з великим зносом, напилення (як і наплавлення) вигідно застосовувати як спосіб відновлення розмірів. Можна наносити шар товщиною декілька міліметрів, тоді як при електролітичному хромуванні, наприклад, товщина шару становить 6,3 мкм.

5. Відносна простота конструкції обладнання для напилення, його мала маса, простота експлуатації, здатність до швидкої зміни локації.

6. Широкий вибір матеріалів для напилення. Можна використовувати різні метали, сплави, з'єднання металів із оксидами, пластмаси, різні хімічні сполуки та їх суміші. Можливе нанесення багатшарових покриттів різнорідними матеріалами, що забезпечує отримання покриттів зі спеціальними властивостями.

7. Практично відсутня деформація виробів під впливом напилення (більшість інших способів поверхневої обробки із застосуванням тепла вимагають нагрівання до високих температур виробу або значної його частини, що призводить до його деформації).

8. Можливість використання напилення для поверхневої обробки та формування коркових деталей машин різної форми.

9. Простота технологічних операцій напилення, відносно невелика трудомісткість, висока продуктивність нанесення покриття.

10. Відсутність спеціальної дорогої обробки (очищення) продуктів впливу на екологію (на відміну від очищення і нейтралізації шкідливих відходів, наприклад, при гальванічній обробці виробів).

#### Недоліки технології напилення:

1. Низька ефективність напилення покриттів на **дрібні деталі** внаслідок низького коефіцієнта використання напилюваного матеріалу (відношення маси покриття до загальної маси витраченого матеріалу) (у таких випадках поверхневу обробку доцільно здійснювати гальванічним, хімічним, фізичним та іншими способами (наприклад, дифузійним насиченням, електролітичним нанесенням, занурюванням у розплавлений метал тощо).

2. Шкідливі умови праці операторів під час попередньої обробки поверхні виробів. Для попередньої підготовки поверхні перед напиленням застосовують піско- або дробоструменеву обробку за допомогою кварцевого піску, корунду, сталевого або чавунного дробу. Такі операції супроводжуються забрудненням робочого середовища та погіршують умови праці операторів, які обслуговують відповідне обладнання.

3. Виділення диму і аерозолів під час напилення. Процес напилення супроводжується утворенням хмари найдрібніших часток напилюваного матеріалу, взаємодія яких з повітрям супроводжується утворенням різних шкідли-

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 56 / 76

вих сполук і диму, що викликає необхідність застосування потужних витяжних пристроїв.

Структура ГТНЦ. Традиційно застосовується кілька типів структури покриттів. Досить поширеним є одношарове покриття. Його використання доцільне у випадку створення конструкції «покриття – основа» з матеріалів із близькими значеннями коефіцієнтів термічного розширення. Необхідною умовою є також забезпечення міцності зчеплення покриття з основою. Зокрема, такі умови на прийнятному рівні забезпечуються при нанесенні металевих покриттів на металеву основу.

Більш поширеними є покриття з підшарком. Підшарок має меншу, порівняно з основним шаром покриття, товщину, яка лежить у межах 0,025...0,100 мм. Призначення підшарку – в забезпеченні міцного зв'язку покриття з основою. Крім того, його часто використовують як перехідний шар між матеріалами основи та основного покриття для зменшення різниці між коефіцієнтами їх термічного розширення.

Найчастіше як підшарок використовуються нікель-алюмінієві матеріали у вигляді композиційних порошків або сплавів; при нанесенні оксидних покриттів для цього придатні також нікель-титанові сплави.

За рахунок поєднання властивостей матриці і наповнювачів можна отримати покриття з багатокомпонентною структурою. Покриття такого типу можуть бути отримані при нанесенні механічних сумішей або композиційних порошків.

У випадку експлуатації покриття в умовах механічних ударних навантажень і теплзмін використовуються багатошарові та градієнтні структури, причому, градієнтна структура може бути як шаруватою (утвореною кількома шарами з різним співвідношенням компонентів), так і безперервною (співвідношення компонентів по товщині покриття змінюється плавно, за рахунок їх окремого дозування у процесі напилення).

Газополуменеве напилення. Газополуменевий спосіб напилення покриття передбачає формування на поверхні виробу шару з часток напилюваного матеріалу, які мають достатній запас теплової та кінетичної енергії внаслідок взаємодії зі струменем газового полум'я. Його рекомендують для напилення покриттів із порошків металів, сплавів, композицій, оксидів тощо, дроту, а також гнучких шнурів, прутків (рис. 14, 15).



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 57 / 76

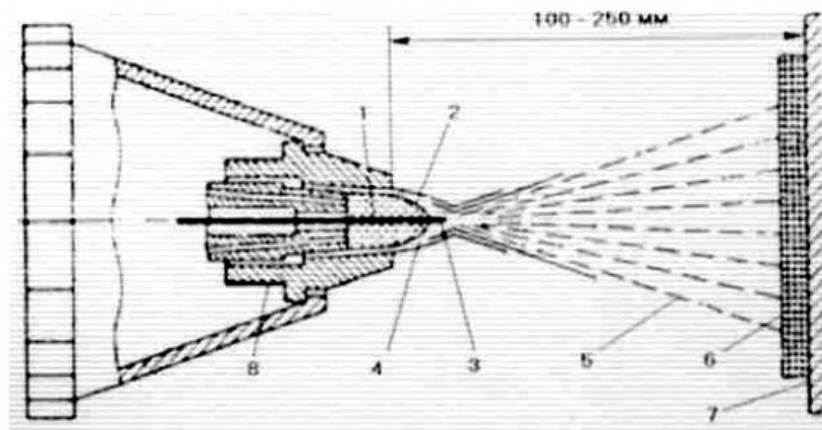


Рис. 14 . Газополуменеве наплення дротом: 1 – дріт (пруток або гнучкий шнур); 2 – полум’я; 3 – кінець дроту, що оплавляється; 4 – повітряний струмінь; 5 – частинки напилюваного матеріалу; 6 – покриття; 7 – основа; 8 – насадка

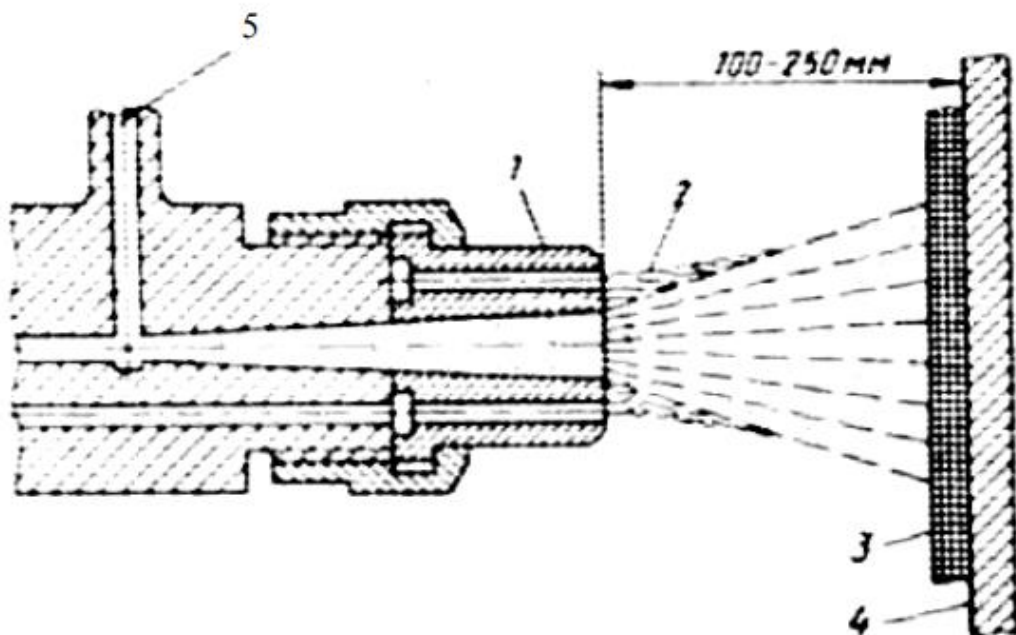


Рис. 15. Газополуменеве наплення порошкового матеріалу: 1 – сопло; 2 – факел полум’я; 3 – покриття; 4 – основа; 5 – порошок

Температура струменя продуктів згоряння залежить від складу газової суміші. Наприклад, температура струменя ацетилено-кисневого полум’я становить 3200 °С, пропан-бутан-кисневого – 2600...2700 °С.

Швидкість часток напилюваного матеріалу залежить від співвідношення кисню та пального газу в суміші, кількості газу, який обдуває полум’я, відстані від зрізу сопла, кількості порошку, який вдувається у полум’я, його щільності, гранулометричного складу та ін., і знаходиться у межах 20...80 м/с.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 58 / 76

При газополуменевому напиленні покриття в якості пального газу може використовуватись ацетилен і його замітники: пропан, водень, а також рідинне пальне, в якості окислювача – кисень або повітря.

Удосконалення способу газополуменевого напилення йде у напрямку підвищення швидкості струменя продуктів горіння.

Для підвищення швидкості часток при газополуменевому напиленні застосовують різні технічні рішення. Насамперед, це стосується розташування соплових отворів для витоку горючої суміші та конструкції передньої частини соплового накінецьника, яка дозволяє формувати необхідну геометрію високо-температурного струменя та здійснювати ефективно нагрівання і прискорення часток порошку.

Знизити витрати тепла і кінетичної енергії утвореного струменя можна шляхом ізолювання його від навколишнього середовища периферійним супутнім струменем газу або охоплюючими струмиськими насадками. Це дозволяє збільшити швидкості напилюваних часток матеріалу на 10...20 м/с.

Використання додаткових пристосувань з прискорюючими соплами, вісі яких розташовані під кутом до струменя продуктів горіння дозволяє збільшити швидкість до 120...130 м/с. Для додаткового нагрівання та прискорення напилюваних часток у струмені концентрично вісі пальника розташовують кільцеподібну вставку із соплами для подавання пального газу.

Таким чином, нагріті та прискорені у низькошвидкісному газополуменевому струмені частки напилюваного матеріалу за допомогою різних пристосувань набувають підвищеної, порівняно з напиленням звичайним газополуменевим пальником, швидкості перед оброблюваною поверхнею.

Новим шляхом розвитку газополуменевого напилення є створення установок високошвидкісного напилення.

Спосіб отримання газополуменевого покриття з використанням струменя надзвукової швидкості у світовій практиці отримав назву «Високошвидкісне киснево-паливне напилення» (*HVOF*).

Електродугове напилення. При електродуговому напиленні (металізації) утворення потоку напилюваних часток відбувається за рахунок плавлення напилюваного матеріалу багатоамперною дугою і диспергування та перенесення його на оброблювану поверхню швидкісним струменем газу (рис. 16).

Цей процес в основному використовується для напилення корозійно- та зносостійких покриттів виключно з металів (звідси історична назва процесу – металізація). Можливе отримання біметалічних покриттів псевдосплавів, а також покриттів зі спеціальними властивостями при використанні дротів із різних металів або порошкового дроту, який складається з металевої оболонки та порошкової серцевини різного складу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 59 / 76

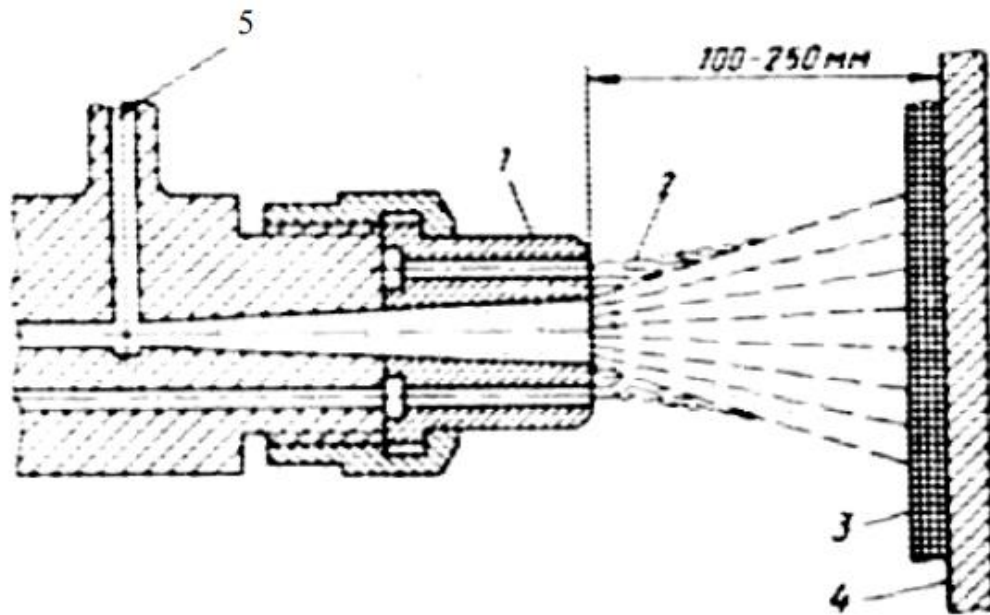


Рис. 16. Схема електродугового напилення:  
1 – дріт; 2 – драти від трансформатора; 3 – ролики;  
4 – напрямні; 5 – сопло; 6 – деталь

При електродуговому напиленні площа активних плям на електродах обмежена невеликим діаметром дроту, що використовується як матеріал покриття. Горіння відбувається в умовах дії потужного швидкісного струменя газів. Це обумовлює стиснення стовпа дуги. Особливістю горіння дуги у даному випадку є непостійність її довжини.

Теплота, що виділяється на катодній і анодній плямах, практично повністю витрачається на плавлення електродного дроту. Значна частина теплоти стовпа дуги витрачається на розігрівання струменя газу. При нагріванні дугою торців електродів фронт їх плавлення орієнтується під кутом до осі дроту.

Основними характеристиками електродугового напилення є висока продуктивність процесу, яка може досягати 50 кг/год і високий енергетичний ККД розпилення, який сягає 0,7...0,9.

Завдяки великим значенням ентальпії (ентальпія – функція стану, що за умов постійного тиску характеризує внутрішню енергію системи та її здатність до виконання роботи) напилюваних часток можна отримати покриття з достатньою адгезійною та когезійною міцністю.

При електродуговому напиленні необхідно враховувати інтенсивну взаємодію часток із активною газовою фазою, що призводить до насичення напилюваного металу киснем, азотом, великого вмісту оксидів у покритті. До недоліків можна також віднести необхідність використання для напилення тільки матеріалів у вигляді дроту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 60 / 76

### Плазмове напилення.

Плазмово-дуговий метод напилення покриттів полягає в формуванні на поверхні деталі покриття з нагрітих та прискорених високотемпературним плазмовим струменем часток матеріалу, при зіткненні яких з поверхнею основи або напиленим матеріалом відбувається їх з'єднання.

Плазмово-дуговий метод рекомендується для напилення захисних, зміцнювальних та інших видів покриттів із порошків металів, оксидів, карбідів, нітридів, боридів та інших тугоплавких матеріалів, із композиційних порошків та механічних сумішей різних порошків, а також із дротяних матеріалів.

Плазмовий струмінь утворюється у плазмотроні за рахунок нагрівання плазмоутворювального газу при проходженні його через дугу (рис. 17) або завдяки високочастотному індукційному нагріванню (рис. 18).

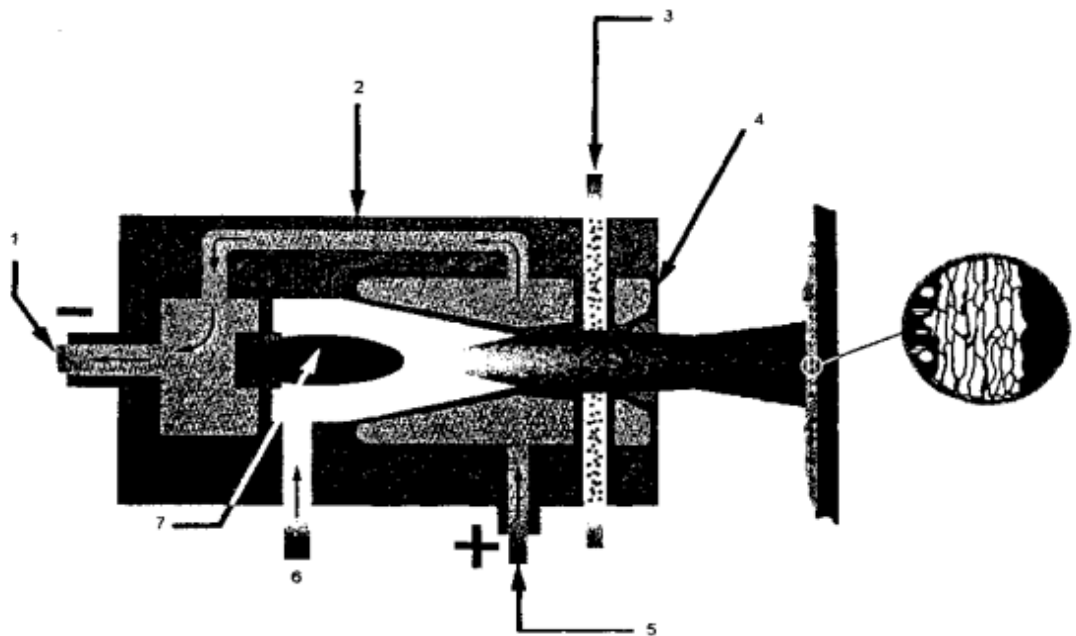


Рис. 17. Узагальнена схема плазмового напилення:

- 1 – вихід води для охолодження та підведення від’ємного потенціалу;
- 2 – ізолюючий кожух; 3 – транспортуючий газ із порошком;
- 4 – водоохолоджуваний анод; 5 – вхід води для охолодження та підведення позитивного потенціалу; 6 – подача плазмоутворюючого газу; 7 – катод

У звичайних умовах при напиленні у відкритому середовищі та атмосферному тиску температура плазмового струменя може складати від  $5 \times 10^3$  до  $55 \times 10^3$  °C, а швидкість витікання досягати 1000...1500 м/с.

Потрапляючи у плазмовий струмінь, частки порошку нагріваються до плавлення і прискорюються у середньому до 50...200 м/с.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 61 / 76

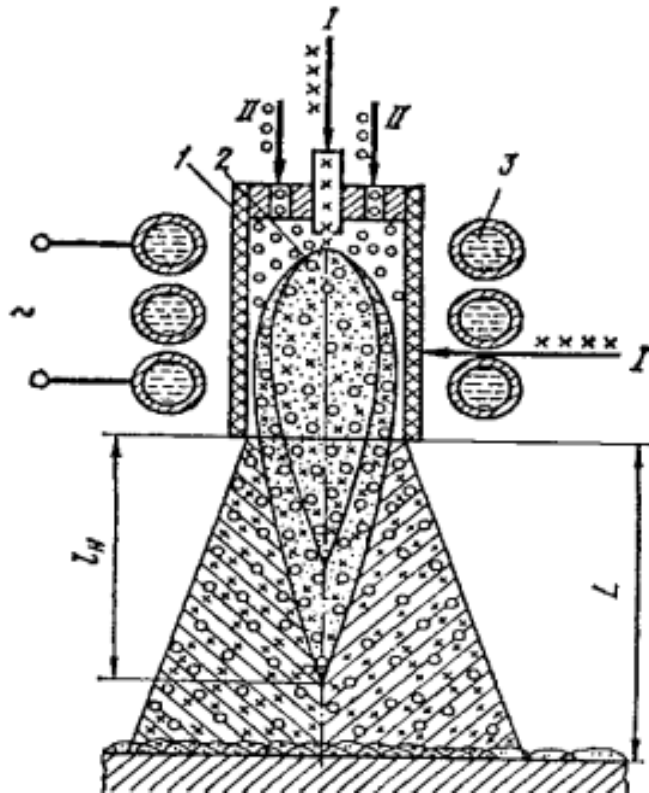


Рис. 18. Схема плазмового наплення з високочастотним індукційним нагріванням газу: 1 – сопло плазмотрона; 2 – плазмовий струмінь; 3 – індуктор; I – подача напильованого матеріалу; II – подача плазмоутворюючого газу

При використанні спеціальних плазмотронів з профільованими каналами сопел або при плазмовому напленні у динамічному вакуумі (способи *VPS-Vacuum Plasma Spray* та *LPPS-Low Pressure Plasma Spray*) можна отримати надзвукові швидкості плазмового струменю.

При контакті прискорених часток матеріалу, що напильється з поверхнею, вони зачеплюються з нею за рахунок металургійної, механічної та інших видів взаємодії.

#### Детонаційне наплення.

Процес детонаційного наплення покриттів полягає у формуванні на поверхні виробу серією послідовних пострілів шару з часток напильованого порошку, які, внаслідок взаємодії з продуктами детонації вибухової суміші, мають достатній запас теплової та кінетичної енергії.

Цей процес рекомендується для наплення продуктів з порошоків металів, і сплавів, оксидів, тугоплавких з'єднань, різних композицій тощо, які не повинні розкладатися та випаровуватись у продуктах детонації і повинні мати різницю між температурами плавлення та кипіння не менше 200 °С.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 62 / 76

Суть процесу полягає в наступному. Ствол детонаційної гармати заповнюється сумішшю пального газ-кисень і відсікається від вибухової суміші, яка знаходиться у магістралях. Виважені транспортуючим газом частинки порошку подаються у ствол. суміш запалюється за допомогою свічки запалення. Її спалення відбувається в режимі детонації. Залежно від складу вибухової суміші швидкість детонаційної хвилі може досягти 3000 м/с, а температура продуктів детонації – 3200 °С.

У результаті взаємодії з високотемпературними продуктами детонації частки порошку, який напиллюється, нагріваються до пластичного або рідкого стану і, виходячи зі ствола, набувають швидкість 900...1500 м/с. При зустрічі часток із напиллюваною поверхнею на ній утворюється щільна пляма покриття. Потім цикл повторюється.

Дискретність процесу детонаційного наплення дозволяє систематизувати і згрупувати фактори, що є вирішальними на різних етапах наплення.

Можна виділити три основних етапи технології наплення детонаційних покриттів:

Перший етап – **підготовчий**. Він містить у собі операції по заповненню ствола вибуховою сумішшю та порошком напиллюваного матеріалу. Підготовчий етап завершується у момент ініціювання детонації газової суміші.

На другому етапі відбувається **передача** теплової кінетичної енергії продуктів детонації газової суміші часткам порошку напиллюваного матеріалу при їх русі у стволі на ділянці між напиллюваною поверхнею і дуловим зрізом ствола.

Третій етап – **формування** детонаційного покриття на основі.

Визначальними факторами першого етапу є:

склад детонаційної газової суміші,  
ступінь заповнення нею ствола, величина порції порошку,  
гранулометричний склад порошку,  
форма часток,  
місце знаходження і концентрація порошкової хмари в стволі у момент ініціювання детонації,  
відстань від зрізу ствола до основи.

Ця група факторів є технологічними параметрами процесу наплення.

Не менш важливі на першому етапі конструктивні особливості і параметри самої установки:

розміри і форма ствола,  
місце ініціювання вибуху суміші,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 63 / 76

спосіб транспортування та місце введення порошку у ствол, скорострільність установки.

Вирішальні фактори другого етапу: енергетичні характеристики продуктів детонації і часток порошку напилюваного матеріалу – їх температура, швидкість, тиск і щільність газу, час перебування порошку у високотемпературному потоці.

На третьому етапі домінують фактори, від яких в остаточному підсумку залежить кількість зв'язків, що утворюються між взаємодіючими матеріалами у місці їхнього контакту на межі покриття і основи. Це, зокрема, такі характеристики, як температура і тиск у зоні проходження фізико-хімічних процесів між контактуючими матеріалами, тривалість цих процесів.

Крім наведених факторів, велике значення на всіх етапах детонаційного напилення мають фізичні характеристики матеріалу покриття, а на третьому етапі – характеристики матеріалу основи.

Швидкість і температура часток покриття залежить від виду пального газу, співвідношення кисню та пального газу в суміші, кількості у суміші технологічного газу (азоту або повітря), їх витрат, кількості введеного у ствол порошку, його щільності та гранулометричного складу, конструкційних особливостей установки тощо.

До основних характеристик детонаційного нанесення покриттів можна віднести:

- можливість отримання покриття з малою пористістю (0,5...1,5 %) та високою (до 100 МПа) міцністю зчеплення покриття з основою з більшості порошків, які плавляться при температурі до 2800 °С без розкладання;

- нанесення покриття на різні матеріали – метали (з твердістю поверхні до 60 HRC<sub>e</sub>), кераміку, скло, пластмаси та інші, при відсутності деформації напилюваної поверхні;

- можливість керувати хімічним складом продуктів детонації (відновлювальний, нейтральний, окислювальний) та енергетичними характеристиками процесу за рахунок регулювання складу газової суміші;

- наявність таких негативних явищ як високий рівень шуму в приміщенні, де відбувається детонаційне напилення покриттів, який досягає до 140 дБ;

- наявність продуктів спалення суміші паливний газ-кисень з утворенням шкідливих компонентів (СО, вуглеводні сполуки, оксиди азоту тощо); наявність великої концентрації виважених у повітрі часток напилюваного порошку.

До технологічних параметрів детонаційного напилення відносяться:

- витрати кисню,  $m^3 / год$ ;

- витрати пального газу (ацетилену, пропану, водню),  $m^3 / год$ ;

- витрати технологічного газу (азоту, повітря),  $m^3 / год$ ;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 76

- тиск газів,  $МПа$ ;
- співвідношення між киснем та паливим газом у суміші,  $\beta$ ;
- час циклу процесу  $t c$  або швидкострільність,  $Гц$ ;
- витрати порошку,  $кг / год$  та його грануляція  $C$ ,  $мкм$ ;
- дистанція напилення,  $мм$ ;
- швидкість відносного переміщення гармати та виробу,  $мм/хв$  або  $мм/об$ ;
- число обертів циліндричної деталі,  $об/хв$ .

Звичайні витрати кисню й ацетилену становлять від 0,2 до 6,0  $м^3 / год$  залежно від конструкції установки. Тиск газів становить 0,05...0,15  $МПа$ .

Найбільш вагомими параметрами є вид та витрати газів, які входять у детонуючу суміш, співвідношення між горючим газом і киснем. Теплова потужність детонаційних газових струменів становить  $10^5 \dots 10^7 Вт$ .

Порівняно з іншими паливими газами найбільш високу ефективність дає використання для детонаційного напилення суміші ацетилену з киснем і меншу – пропан-бутану з киснем.

Втрати детонаційної суміші впливають прямо пропорційно на продуктивність процесу.

Детонаційне напилення належить до циклічних процесів. Час циклу становить 0,2...0,5  $c$  і містить 3 складові:

$$T_{ц} = t_3 + t_b + t_{п},$$

де  $t_3$  – час, необхідний для заповнення камери та стволу газовою сумішшю;  $t_b$  – час, необхідний для підготовки вибуху та викиду продуктів детонації та порошку;  $t_{п}$  – час продувки камери і ствола.

Необхідно забезпечувати мінімальні значення  $T_{ц}$ , тому що ним визначається кількість циклів установки у часі, отже, і продуктивність.

Протягом одного циклу на поверхню напилення переноситься від 0,02 до 0,15  $г$  розпилюваного матеріалу.

Частіше за все для детонаційного напилення використовують порошки діаметром 10...50  $мкм$ . Порошки з більш крупними частками підігріваються і прискорюються недостатньо для утворення міцних зв'язків у мить удару. Порошки малої щільності мають найбільш високі швидкості. Витрати порошку при напиленні знаходяться у великих межах.

Залежно від потужності установок продуктивність процесу знаходиться у межах 0,5...4,0  $кг/год$ . При завантаженості порошком детонаційної суміші 0,2...0,6  $кг / м^3$  за один цикл вистрілюється 100...300  $мг$ .

Температура та швидкість часток значною мірою залежить від умов їх введення у ствол гармати. Найбільш високі швидкості часток отримуються при



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 65 / 76

введенні порошку на відстані 200...400 мм від зрізу детонаційного ствола гармати.

Дистанція напилення вибирається залежно від матеріалу виробу, його розмірів, форми, розпилюваного матеріалу, товщини покриття у межах від 50 до 200 мм.

Необхідну товщину покриття отримують багаторазовим повторенням циклів процесу, шляхом переміщення виробу перед зрізом ствола гармати.

Крок переміщення не повинен перевищувати половини діаметра плями напилення.

До особливостей детонаційного способу нанесення покриттів належать вимоги до твердості поверхні: напилення, яка не повинна перевищувати 60 HRC<sub>e</sub>. Поверхня виробу, яка підлягає напиленню, може бути оброблена з метою отримання на ній шорсткості і не повинна мати гострих кромки. Вони повинні бути закруглені радіусом не менше 1 мм.

Чорнова (технологічна) товщина покриття призначається з врахуванням припуску на механічну обробку, який частіше за все становить 0,1...0,3 мм на сторону.

Закономірності формування структури і властивостей детонаційного покриття із різного класу матеріалів залежить від технології одержання порошку, його властивостей і від технологічних умов напилення.

Матеріали для детонаційного напилення, що вимагають різних умов напилення і відрізняються способом керування властивостями покриттів, можна умовно поділити на три групи.

До першої групи відносяться матеріали, що володіють пластичністю при температурах, нижчих за температуру їх плавлення.

Представниками цієї групи є метали (*Al*, *Ti*, *Fe*) сплави (*Al-Cu-Fe*, *Ni-Al*), а також механічні суміші або композиційні порошки, що мають у своєму складі пластичну складову (*WC-Co*, *TiC-Ni*, *WC-Ni*, *Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni* та ін.).

Керування властивостями покриттів з таких матеріалів полягає у забезпеченні умов напилення, при яких частки порошку легкоплавкої складової нагріваються до 0,8...0,9  $T_{пл}$ , прискорюються до максимально можливої для детонаційного процесу швидкості руху. Критерієм якості покриття є міцність зчеплення з основою, щільність шару, його твердість і збереження хімічного та фазового складу вихідного матеріалу.

З погляду досягнення максимальної міцності зчеплення покриття з основою для покриття, що містить тугоплавку складову (карбіди, бориди і т. п.) і металеву зв'язку (*Ni*, *Co*, *Fe*) з низькою температурою плавлення основним є склад робочої суміші із співвідношенням кисню до ацетилену 1,2 : 1,0, а при

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 66 / 76

використанні пропан-бутану – 3,5 : 1,0. Додавання до 30 % азоту приводить до збільшення характеристик міцності самого шару, поліпшення якості покриття.

До другої групи відносяться матеріали, що володіють пластичністю, але вимагають нагрівання до температури плавлення  $T_{пл}$ , через необхідність формування у них загартованих структур. До цієї групи відносяться сплави, що аморфізуються, охолодження розплавів яких зі швидкостями не менше  $10^5$  К / с призводить до утворення аморфної фази або дрібнокристалічної структури.

Керування властивостями таких покриттів можна вести через зміну товщини шару, що формується за цикл. За критерій якості напиленого шару може служити кількість аморфної фази, що утворилась у ньому.

Зниження ступеня хімічної активності детонаційної суміші з підвищенням швидкості продуктів детонації, збільшується частка аморфної фази і зменшується вміст газів у покритті.

Підвищення об'єму детонаційної суміші при фіксованій витраті матеріалу, що напилюється, також веде до зменшення пористості і підвищення твердості. При пропорційному зниженні кількості ацетилену та кисню в детонаційній суміші зменшується швидкість продуктів детонації, підвищується час взаємодії продуктів детонації з напилюваним матеріалом, що погіршує якість покриття.

Підвищення швидкості продуктів детонації сприяє загальному поліпшенню якості покриттів, зокрема, зниженню пористості, збільшенню мікротвердості, росту кількості аморфної фази.

До третьої групи відносяться непластичні матеріали, формування покриттів з яких можливе лише з розплавленого стану. До матеріалів цієї групи, в основному, відносять оксиди. Для оксиду алюмінію, при напиленні якого відбуваються поліморфні перетворення, керування властивостями можливо також здійснювати зміною товщини шару за цикл.

Критерієм якості шару є кількість фази ( $\alpha - Al_2O_3$ ) з найбільшою твердістю, збільшення якої забезпечується зниженням швидкості охолодження розплаву за рахунок підвищення товщини напилюваного шару, за цикл. До особливостей технології напилення оксиду алюмінію, варто віднести суттєві відмінності в умовах формування початкового шару покриття на межі з основою і наступних його шарів.

Аналіз залежностей величини міцності від технологічних параметрів напилення, однозначно вказує на перевагу температурного фактору стану часток над швидкісним. Максимальна міцність зчеплення (40...50 МПа) відповідає режимові, при якому нагрівання часток відповідає температурі їх плавлення.

Експериментально встановлено, що при детонаційному напиленні температура часток поблизу поверхні напилення може досягти 1400...1600 °С і більше.

Тиск, який діє на розплавлену частку при ударі об основу, підвищує температуру кристалізації на величину до 300 °С.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 67 / 76

Відповідне збільшення росту контактної температури досягає 500 °С і більше в зоні дії ударного тиску і 200...300 °С у зоні дії тиску напору.

Для отримання процесів окислення напилюваних матеріалів рекомендується зменшення часу перебування часток у детонаційно-газовому потоці, збільшити об'ємну концентрацію порошку в детонаційно-газовому потоці, використовувати детонаційно-газові потоки з відновлювальним або нейтральним середовищем, використовувати добавки інертних газів, забезпечити змінний вміст пальної суміші по довжині стволу, вилучати або зменшувати взаємодію імпульсного потоку з навколишнім повітряним середовищем, утворенням високошвидкісних супутніх потоків захисних газів тощо.

Газодинамічне напилення покриття. Формування металічного покриття газодинамічним способом ґрунтується на закріпленні твердих металевих часток, які мають велику кінетичну енергію, на поверхні, що напилюється, у процесі високошвидкісного удару.

Для нанесення покриття цим способом використовується обладнання, конструкція якого забезпечує створення надзвукового газового струменю та введення у цей струмінь часток порошкового матеріалу і їх прискорення до швидкості, необхідної для формування покриття.

Відсутність високих температур, характерних для наведених вище газотермічних методів нанесення покриття, дала підставу назвати метод «холодне газодинамічне напилення» (ХГН). Термін «холодний» введений для того, щоб підкреслити, що температура часток істотно менша їхньої температури плавлення, а термін «газодинамічне» вказує на першорядну роль високої швидкості частинок при формуванні покриттів.

На рис. 19. наведено схему установки для ХГН.

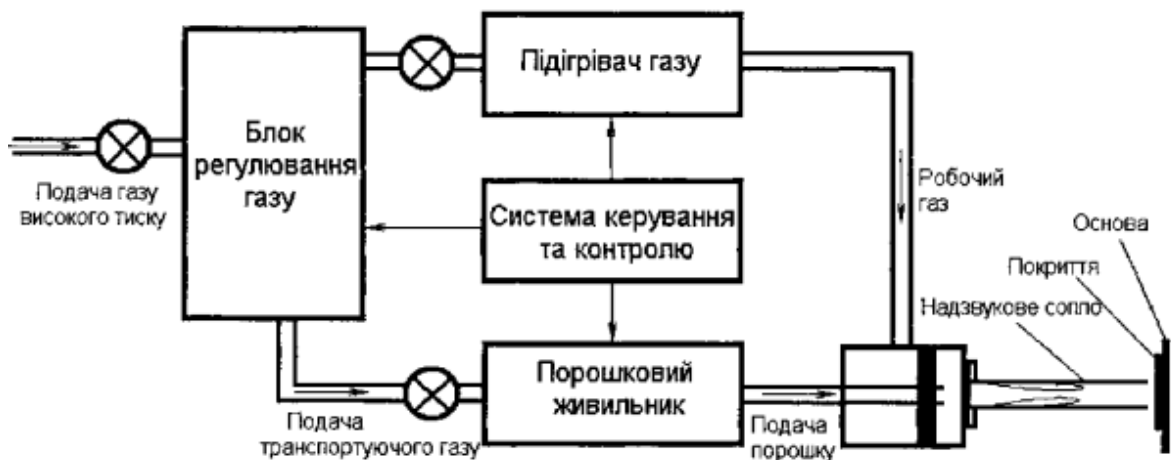


Рис. 19. Схема установки для холодного газодинамічного напилення  
Метод ХГН реалізують з допомогою надзвукового сопла (сопла Лавалю), яке дозволяє отримати швидкість струменю з числом Маха  $M = 2-4$ . В якості

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 68 / 76

прискорювального газу використовується суміш повітря з гелієм (при загальному тиску у камері  $P_0 = 2 \text{ МПа}$ ). Змінюючи склад суміші від чистого повітря до чистого гелію, можна змінювати швидкість часток від 200 до 1200 м/с.

Процес взаємодії часток з основою може бути умовно поділений на 3 етапи, в залежності від швидкості часток.

На **першому** етапі при швидкості часток нижче деякої критичної (для порошків міді, цинку, заліза, нікелю, алюмінію грануляцією  $d_2 < 50 \times 10^{-6} \text{ м}$ ,  $V_{\text{кр}} = 500 \dots 600 \text{ м/с}$ ) струмінь високошвидкісних часток за рахунок ерозійної дії ефективно очищує поверхню основи від оксидів, мастила, іржі, абсорбованих речовин та інших забруднень. Поверхня активізується, оголюються ювенільні ділянки, формується розвинений мікрорельєф поверхні основи.

На **другому** етапі при швидкості вище критичної формуються зони контакту покриття з основою, які відповідають за міцність зчеплення. При співударі металевих часток з поверхнею основи відбувається їх пластична деформація та утворення у контактній плямі металічних зв'язків без плавлення або мікрозварювання на окремих ділянках плавлення.

На **третьому** етапі, відбувається формування наступних шарів покриття. При цьому частки, що напилюються контактують не з основою, а з раніше напиленими частками.

Вакуумно-конденсаційне напилення. Серед методів надання поверхневим шарам деталей машин і конструкцій спеціальних функціональних властивостей в останні роки все ширше застосовуються процеси вакуумно-конденсаційного нанесення покриття (ВКНП).

Вакуумно-конденсаційне напилення – це одержання покриттів за рахунок конденсації на поверхні атомів та іонів вихідного матеріалу, що випаровуються або розпилюються у вакуумі при нагріванні.

В англійській літературі процеси, які використовують такі фізичні явища, як випаровування металів, фізичне осадження корпускулярного потоку речовини або сполуки металу з газом (нітридів, карбідів, боридів, силіцидів, оксидів), отриманих з використанням електричних явищ на поверхню холодної або незначно підігрітої основи, називаються *PVD*-процесами (*Physical Vapour Deposition Processes*).

Наслідком взаємодії корпускулярного потоку речовини на рівні атомів, молекул, іонів з поверхнею твердого тіла може бути або конденсація – осадження речовини на поверхню – нанесення покриття у вакуумі, або хімічна взаємодія й осадження з парової (газової) фази, в ході якого стійкі тверді продукти реакції утворюються і ростуть на поверхні основи в середовищі, де відбуваються хімічні реакції (дисоціація, відновлення і таке інше).

Останні процеси відносяться до *CVD*-процесів (*Chemical Vapour Deposition Processes*).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 69 / 76

Техніка ВКНП передбачає використання корпускулярного потоку речовини на рівні атомів, молекул, іонів і взаємодії цього потоку з поверхнею твердого тіла. Наслідком цієї взаємодії є або конденсація – осадження речовини на поверхню, нанесення покриття, або насичення речовиною поверхневого шару – модифікування поверхневого шару легуванням, імплан-тацією.

Всі ці процеси відбуваються у вакуумі. Імплантація іонів металів і неметалів полягає в іонізації парів металів або газів та прискоренні позитивних іонів за допомогою електричних полів до швидкості, при якій кінетична енергія іонів достатня для того, щоб зануритись у метал або неметал на глибину декількох атомних шарів (імплантація первинних іонів) і виділити вторинні іони в основу оброблюваного матеріалу.

Імплантовані іони змінюють структуру та хімічний склад поверхневого шару оброблюваного матеріалу. Імплантацію іонів іноді називають іонним легуванням.

Процеси ВКНП (*PVD*) класифікуються за такими ознаками:

1. За *способами отримання корпускулярного потоку* металів та сполук, що напилуються на поверхню виробу:

- термічним випаровуванням металу або сполуки безперервною або імпульсною дією джерела нагрівання;
- іонним розпиленням металів і сполук.

2. За *способами нанесення парів металу*:

- конденсації з пари – нанесення неіонізованих або незначно іонізованих (долі відсотку) парів металу або сполуки, які отримуються термічними методами шляхом випаровування. Іонізація парів відбувається не у тій зоні, де отримують пару;
- іонно-плазмове напилення – нанесення парів металу або сполук шляхом випаровування та термічної сублимації, значно іонізованих вакуумною дугою або іншим джерелом іонізації порівняно з конденсацією з пари;
- розпилення — нанесення іонізованих парів металів, отриманих шляхом розпилення металу іонами інертного газу, які отримуються внаслідок іонного розряду.

3. За *способами активації* процесів нанесення покриття:

- без активації процесу нанесення покриття;
- реактивний метод, який дозволяє внаслідок реакції реактивних газів (азоту, кисню, аміаку, вуглеводневих газів) з паром металів отримати сполуки (нітриди, оксиди, карбіди тощо) на поверхні, що покривається;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 70 / 76

– активування процесу іонізації газів та парів металу шляхом використання додаткових фізичних процесів: тліючого розряду, постійних або змінних електричних або магнітних полів тощо.

### **Контрольні запитання**

1. Дорнування глибоких отворів – точність розміру, шорсткість поверхні.
2. Зміцнення та перезміцнення, режими дорнування, натяг, змащування.
3. Вигладжувальні інструменти для обробки зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь.
4. Режими вигладжування.
5. Що таке газотермічне напилення.
6. Переваги і недоліки технології напилення.
7. Структура газотермічного напилення.
8. Вакуумно-конденсаційне напилення.
9. Матеріали для нанесення покриття.
10. Технологічні процеси підготовки поверхонь.
11. Детонаційне напилення.
12. Електродугове напилення.

**Тема 8. Поліпшення експлуатаційних властивостей наплавлених і напилених газотермічними покриттями деталей машин, обробкою різанням алмазними та надтвердими інструментальними матеріалами**

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 71 / 76

1. Обробка різанням алмазним інструментом та інструментом із надтвердих матеріалів (НТМ). Інструмент і режими різання.
2. Якість обробленої поверхні, зносостійкість поверхневого шару.

**1. Обробка різанням алмазним інструментом та інструментом та інструментом із надтвердих матеріалів (НТМ). Інструмент і режими різання.** Надтвердими прийнято називати інструментальні матеріали, що мають твердість за Віккерсом при кімнатній температурі  $> 35$  ГПа.

Обробка різанням інструментом із НТМ отримала широке розповсюдження у промисловості і застосовується при обробці заготовок із чавунів, нетермооброблених і загартованих сталей, твердих і важкооброблюваних сплавів, наплавлених і газотермічних напилених покриттів замість традиційних твердосплавних інструментів, а також шліфувальних кругів.

Обробка інструментом із НТМ дозволяє, одночасно з іншими позитивними моментами, поліпшувати якість оброблених поверхонь за рахунок більш високої різальної здатності алмазу та надтвердих матеріалів.

Надтверді матеріали бувають двох видів: природні та синтетичні.

До природних відноситься **алмаз**.

Алмаз – одна з алотропних модифікацій вуглецю. Найтвердіша з відомих речовин. Інша алотропна модифікація вуглецю – графіт – одна з м'яких речовин. Густина алмазу –  $3,01...3,56$  г/см<sup>3</sup>, твердість за Моосом – 10, мікротвердість  $8600...10000$  кГ/мм<sup>2</sup>. Алмаз складається з вуглецю (96,0...99,8 %).

Фізико-механічні властивості алмазу:

$\sigma$  на згин – 210...490 МПа;

$\sigma$  стиску – 2000 МПа;

Модуль пружності 900 ГПа;

Температуростійкість 900 °С;

Коефіцієнт тертя по сталі 0,15...0,20.

Маса алмазу вимірюється у **каратах** (1 карат = 0,2 г).

Синтетичні НТМ поділяють на **3** групи:

- 1) матеріали на основі вуглецю;
- 2) матеріали на основі нітриду бору;
- 3) композиційні матеріали, що містять як синтетичний алмаз, так і нітрид бору, карбіди, тверді окисли тощо.

Лезовий різальний інструмент виготовляють з природніх і синтетичних НТМ.

В якості сировини використовують високоякісні алмази III категорії. З цією метою налагоджено виготовлення полікристалічних матеріалів на основі природнього та синтетичного алмазу (карбонадо, баллас, дісміт, АРС) і

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 72 / 76

кубічного нітриду бору (КНБ) (ельбор, гексаніт, ісміт, гексаніт). Найширше застосування отримали інструментальні матеріали на основі КНБ (ельбор-Р [композит 01], композит 05, гексаніт-Р [композит 10], белбор [композит 02], киборит.

Для виготовлення різців використовують кристали алмазу масою 0,2...5,0 карат.

Для токарних робіт випускаються прямі прохідні, підрізні, відігнуті розточувальні та різеві різці. Базовою для них є конструкція прямого прохідного різця (рис. 20).

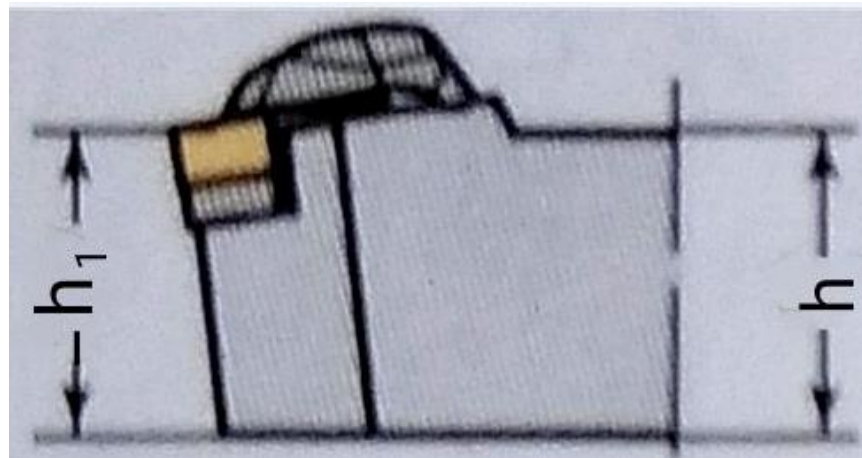


Рис. 20. Базова конструкція різця, оснащеного пластиною з НТМ ( $h$  – висота державки різця;  $h_1$  – висота робочої (різальної) частини різця)

Більшість інструменту з синтетичних НТМ виготовляють у вигляді циліндричних вставок  $\varnothing 6, 7, 8, 9, 10, 12$  мм і кутами у плані  $\varphi = 15; 30; 45^\circ$ . Вставки до збірних розточувальних різців випускаються  $\varnothing 6, 8, 10$  і  $12$  мм і встановлюються під кутами  $30$  і  $90^\circ$  до вісі розточування.

Різці з різальною частиною з природньої сировини бувають **3** видів:

- з напаяною різальною частиною;
- із зачеканеною різальною частиною;
- з механічним кріпленням різальної частини.

Корпус циліндричних вставок виготовляють зі сплаву, що містить  $80\%$  міді та  $20\%$  олова.

Для зміцнення різального клина на кристалах природнього алмазу формують невеликі задні кути  $\alpha$  ( $4^\circ \dots 8^\circ$ ). Щоб уникнути викришування (адже міцність алмазу на згин невелика –  $210 \dots 490$  МПа (можна порівняти: для твердих сплавів –  $0,75 \dots 1,3$  ГПа)), передні кути приймаються або  $0^\circ$ , або від’ємними.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 73 / 76

Для обробки покриттів із м'яких матеріалів (мідь, латунь) рекомендуються кути  $\gamma = 0^\circ \dots (-3)^\circ$ ; для більш твердих –  $\gamma = -(3^\circ \dots 5^\circ)$ .

Головний кут у плані найчастіше  $30^\circ \dots 90^\circ$ ,  $\phi_1 = 0^\circ \dots 10^\circ$ , радіус заокруглення різальної кромки  $r = 0,2 \dots 0,5$  мм.

Алмазні лезові інструменти ефективні при обробці алюмінієвих і твердих сплавів (у т. ч., і покриттів із них), кераміки та інших неметалевих матеріалів.

Різці з КНБ також поділяються на 2 типи:

**збірні** та **суцільні** (заготованка композиту кріпиться безпосередньо у корпусі обтиском, чеканкою, паянням).

Передній кут  $\gamma$  вибирають у межах  $-(10 \dots 15)^\circ$  (для точіння загартованих сталей і твердих газотермічних напилених покриттів).

Головний кут у плані  $\phi = 30^\circ \dots 60^\circ$ . При куті  $\phi > 60^\circ$  ослаблюється кріплення полікристала у вставці або корпусі, при  $\phi < 30^\circ$  зростає радіальна складова сили різання, що призводить до сколів різальної кромки та появи вібрацій.

Матеріали на основі КНБ раціонально застосовувати у наступних областях:

ельбор-Р, белбор – чистова і тонка обробка сирих і загартованих сталей при безударному навантаженні;

композит 05 – чистова і тонка обробка сталей середньої твердості при безударному навантаженні;

ПТНБ – чистова і тонка обробка загартованих сталей при роботі з ударами і без ударів;

гексаніт-Р – напівчистова і чистова обробка загартованих сталей і газотермічних напилених покриттів твердістю  $HRC_e 40 \dots 60$  як при роботі з ударними навантаження, так і при безударному точінні.

Велика динамічна міцність НТМ дозволяє застосовувати їх для оснащення торцевих фрез. Фрезу заточують в зібраному стані з таким розрахунком, щоб торцеве і радіальне биття різальних кромки не перевершувало 0,02 мм.

Випускають фрези  $\varnothing 80 \dots 125$  мм з 1...25 ножами. Геометричні параметри різальної частини фрез аналогічні різцевим.

При обробці НТМ не потрібно застосовувати ЗОТС, тому що це призводить до утворення мікро- і макротріщин у полікристалах, їх викришування і руйнування.

Рекомендовані режими різання при алмазному точінні (природний і синтетичний алмаз).

Оброблювані матеріали ( у т. ч., і покриття):

пластмаси –

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 74 / 76

$V = 150 \dots 350 \text{ м / хв}; S = 0,05 \dots 0,40 \text{ мм / об}; t = 0,2 \dots 2,5 \text{ мм}.$

кольорові метали –

$V = 300 \dots 700 \text{ м / хв}; S = 0,02 \dots 0,08 \text{ мм / об}; t = 0,1 \dots 0,5 \text{ мм}.$

кераміка –

$V = 200 \dots 300 \text{ м / хв}; S = 0,04 \dots 0,07 \text{ мм / об}; t = 0,3 \dots 0,5 \text{ мм}.$

тверді сплави –

$V = 10 \dots 30 \text{ м / хв}; S = 0,02 \dots 0,07 \text{ мм / об}; t = 0,10 \dots 0,75 \text{ мм}.$

титанові сплави –

$V = 80 \dots 100 \text{ м / хв}; S = 0,02 \dots 0,07 \text{ мм / об}; t = 0,1 \dots 0,2 \text{ мм}.$

Рекомендовані режими різання при точінні різцями з КНБ.

Оброблювані матеріали ( у т. ч., і покриття):

сталі інструментальні, леговані та конструкційні, 40...60 HRC<sub>e</sub> (композити 05, 10; обробка напівчистова) –

$V = 40 \dots 100 \text{ м / хв}; S = 0,1 \dots 0,2 \text{ мм / об}; t = 0,8 \dots 2,0 \text{ мм}.$

сталі інструментальні, леговані та конструкційні, 40...60 HRC<sub>e</sub> (композити 01, 02, 05, 09, 10; обробка чистова) –

$V = 50 \dots 120 \text{ м / хв}; S = 0,05 \dots 0,08 \text{ мм / об}; t = 0,4 \dots 1,0 \text{ мм}.$

сталі швидкорізальні, високолеговані, підшипникові, 58...70 HRC<sub>e</sub> (композити 01, 02, 09, 10; обробка чистова) –

$V = 30 \dots 120 \text{ м / хв}; S = 0,04 \dots 0,07 \text{ мм / об}; t = 0,2 \dots 0,8 \text{ мм}.$

чавуни міцні та високоміцні, HB 160...270 (композити 05, 10; обробка напівчистова) –

$V = 200 \dots 300 \text{ м / хв}; S = 0,1 \dots 0,2 \text{ мм / об}; t = 0,8 \dots 2,0 \text{ мм}.$

чавуни міцні та високоміцні, HB 160...270 (композити 01, 02, 05, 09, 10; обробка чистова) –

$V = 300 \dots 600 \text{ м / хв}; S = 0,02 \dots 0,07 \text{ мм / об}; t = 0,2 \dots 0,8 \text{ мм}.$

чавуни відбілені, HB 400...600 (композити 05, 10; обробка напівчистова) –

$V = 100 \dots 200 \text{ м / хв}; S = 0,1 \dots 0,2 \text{ мм / об}; t = 1,0 \dots 2,0 \text{ мм}.$

чавуни відбілені, HB 400...600 (композити 01, 02, 05, 09, 10; обробка чистова) –

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 75 / 76

$V = 100 \dots 200 \text{ м / хв}; S = 0,02 \dots 0,07 \text{ мм / об}; t = 0,2 \dots 0,8 \text{ мм}.$

тверді сплави (композити 09, 10; обробка чистова) –

$V = 5 \dots 10 \text{ м / хв}; S = 0,04 \dots 0,09 \text{ мм / об}; t = 0,5 \dots 0,8 \text{ мм}.$

## **2. Якість обробленої поверхні, зносостійкість поверхневого шару.**

Якість поверхонь, оброблених алмазним інструментами, знаходиться у межах:

пластмаси –  $Ra = 0,4 \dots 2,5 \text{ мкм};$

кольорові метали –  $Ra = 0,10 \dots 0,63 \text{ мкм};$

кераміка –  $Ra = 0,63 \dots 1,25 \text{ мкм};$

тверді сплави –  $Ra = 0,40 \dots 1,25 \text{ мкм};$

титанові сплави –  $Ra = 0,40 \dots 1,25 \text{ мкм}.$

Якість поверхонь, оброблених інструментами на основі КНБ, знаходиться у межах:

сталі  $HRC_e$  40...60 (напівчистова і чистова обробка) –  $Ra = 0,40 \dots 1,25 \text{ мкм};$

сталі  $HRC_e$  40...60 (тонка обробка) –  $Ra = 0,40 \dots 1,25 \text{ мкм};$

сталі  $HRC_e$  58...70 (чистова обробка) –  $Ra = 0,63 \dots 1,25 \text{ мкм};$

сталі  $HRC_e$  58...70 (тонка обробка) –  $Ra = 0,16 \dots 0,63 \text{ мкм};$

чавуни сірі (напівчистова обробка) –  $Ra = 1,25 \dots 2,50 \text{ мкм};$

чавуни сірі (чистова обробка) –  $Ra = 0,32 \dots 2,50 \text{ мкм};$

чавуни відбілені (напівчистова обробка) –  $Ra = 1,25 \dots 2,50 \text{ мкм};$

чавуни відбілені (чистова обробка) –  $Ra = 0,32 \dots 2,50 \text{ мкм};$

тверді сплави (чистова обробка) –  $Ra = 0,63 \dots 2,50 \text{ мкм};$

тверді сплави (тонка обробка) –  $Ra = 0,32 \dots 1,25 \text{ мкм}.$

Точність обробки – 5–6 квалітети.

При обробці інструментами з НТМ відсутні припали і структурні зміни обробленої поверхні та поверхневого шару виробу.

У поверхневому шарі мають місце напруги стиску.

Комплекс властивостей поверхневого шару – висока точність геометричних параметрів; низька шорсткість; відсутність структурних перетворень; наявність напруг стиску – дозволяють збільшити зносостійкість виробів на 20...25 % порівняно з обробкою твердосплавними і абразивними інструментами.

## **Контрольним запитання**

1. Основні фізико-механічні властивості алмазу і надтвердих матеріалів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.05- 05.02/1/131.00.1/М/ОК11- 2024
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 76 / 76</i>

2. Режими різання основних матеріалів, що застосовуються для нанесення покриттів.

3. Якість оброблених поверхонь виробів із покриттями.

4. Поліпшення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин із покриттями, оброблених інструментами з НТМ.

5. Характеристика інструментальних надтвердих матеріалів – синтетичний алмаз, гексаніт-Р і киборит.