

**Міністерство освіти і науки України
Національний університет біоресурсів
і природокористування України**

Сухенко Ю.Г., Паламарчук І.П., Сивак Р.І., Жеплінська М.М.

**Надійність обладнання галузі: переробні та харчові
виробництва**

Навчальний підручник

**За редакцією доктора технічних наук, професора
Ю.Г. Сухенка**

**Київ
ЦП «КОМПРИНТ» 2018**

УДК 664(075.8) Рекомендовано вченою радою НУБіП України як
ББК навчальний посібник для студентів вищих навчальних
36.81 я73 закладів (протокол № від .. 2018 р.)
П84

доктор технічних наук, професор Мальцев О.В.
Рецензенти: (Одеський державний аграрний університет)
доктор технічних наук, професор Ялпичак Ф.Ю.
(Таврійський державний агротехнічний університет)
доктор технічних наук, професор Іскович-Лотоцький Р.Д.
(Вінницький національний технічний університет)

П84 Сухенко Ю.Г., Паламарчук І.П., Сивак Р.І., Жеплінська М.М.

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові виробництва:
[Навчальний підручник] /За ред. проф. Ю.Г. Сухенка. – К.: ЦП
«КОМПРИНТ», 2018. – 485 с.

ISBN

Навчальний підручник містить основні положення надійності технічних систем в умовах переробних і харчових виробництв; механізм та принципи виникнення відмов; методи оцінки, випробування та прогнозування технічного стану, машина та їх складових, аналіз організаційних та технологічних методів підвищення надійності та відновлення робото здатності елементів технічних систем. Розроблені варіанти завдань для самостійної роботи спонукають студентів застосувати сучасні комп'ютерні технології до їх розв'язання, забезпечують якісне сприйняття ними навчального матеріалу.

Підручник призначений для студентів спеціальності 181 «Харчові технології». Може бути використаний для підготовки студентів за спеціальностями: 162 «Біотехнологія та біоінженерія», 208 «Агроінженерія» та 133 «Галузеве машинобудування», а також може бути корисним спеціалістам підприємств харчових і переробних галузей АПК, аспірантам і науковим співробітникам.

ББК 36.81 я73

ISBN

© Ю.Г. Сухенко,
І.П. Паламарчук, Р.І. Сивак, М.М. Жеплінська

ВСТУП

На відміну від багатьох інших галузей переробні та харчові виробництва відзначаються не тільки різноманіттям процесів та обладнання для їх реалізації, але й об'єктами обробки, які різняться за своїми фізико-механічними, біохімічними, морфологічними, структурними та іншими характеристиками. Важливими є також специфічні умови реалізації даних процесів, що накладають свої вимоги до работоздатності обладнання за технічної та технологічної його експлуатації, формуючи умови та вимоги до надійності таких машин.

Незважаючи на різноманіття машин та умов їх роботи, показники надійності формуються за загальними законами, й розкриття їх є основою для оцінки, розрахунку та прогнозування работоздатності обладнання, а також для побудови раціональних систем виробництва, дослідження та експлуатації машин.

На теперешній час промисловість навіть передових держав зазнає великих втрат через недостатню надійність та довговічність машин. Так, за весь період експлуатації витрати на ремонт та технічне обслуговування машин через їх зношування у декілька разів перевищують вартість нових виробів, наприклад, для автомобілів – до 2 разів, для літаків – до 3, для верстатів – до 4, для радіотехнічної апаратури – до 3 разів; через корозію щорічно втрачають до 10% металу, що виплавляється.

На етапі проектування та розрахунків закладається надійність вибором оптимальної конструкції машини та її вузлів, застосовуваних матеріалів, методів захисту від шкідливих впливів, систем змащування тощо. При виготовленні машини забезпечують її надійність якістю нових деталей та складання вузлів з подальшим контролем відповідності

нормативним характеристикам та необхідними випробуваннями.

Показники надійності виявляються тільки під час експлуатації машини й залежать від її методів та умов, прийнятої системи ремонтів, методів технічного обслуговування, режимів роботи та інших експлуатаційних чинників, що зумовлює комплексний підхід до проблеми надійності. Оцінка надійності передбачає аналіз закономірностей зміни показників якості технічних пристроїв та систем та розроблення методів, що гарантують із найменшими затратами часу і засобів необхідну тривалість й безвідмовність їх роботи. Дані методи ґрунтуються на основі прогнозу поведінки системи, теорії прийняття оптимальних рішень для забезпечення необхідного рівня надійності. Специфічними особливостями питань надійності є такі фактори, як чинник часу, оскільки оцінюється зміна початкових параметрів у процесі експлуатації машини; прогнозування поведінки виробу з погляду збереження його вихідних параметрів або показників якості.

Необхідно також враховувати те, що зміна показників якості машини в часі може бути абсолютною і відносною. Абсолютна зміна показників якості пов'язана із різноманітними процесами, що впливають на машину та змінюють властивості або стан матеріалів, із яких вона виготовлена, за рахунок чого і погіршуються показники її роботи та відбувається її фізичне старіння. Відносна зміна показників якості машини пов'язана із появою нових машин з досконалішими характеристиками, коли її показники стають гіршими порівняно із середнім рівнем, хоча в абсолютних значеннях вони можуть не змінюватися. Так відбувається моральне старіння машини. При оцінці надійності розглядають тільки абсолютну зміну показників якості машини.

В сучасних виробництвах проблеми підвищення надійності і довговічності машин і обладнання є особливо актуальними. Витрати на

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

підтримку працездатності різноманітних технічних об'єктів і систем постійно збільшуються. Існують галузі промисловості, в яких на ремонт і технічне обслуговування машин і обладнання витрачаються кошти, що перевищують вартість нових виробів на порядок. Аналіз даних стосовно ремонту обладнання у харчовій і переробній промисловості показує, що на ліквідацію наслідків корозії технологічних апаратів потрібно близько 80% всіх затрат на ремонт, а затрати, пов'язані з корозією, складають близько 2% від вартості основних виробничих фондів. Наприклад, річні втрати матеріалів від корозії лише на виноробних підприємствах у світі приблизно дорівнюють 15 млн. т. Основні причини відмов технічних об'єктів - зношування, втомлювальне руйнування, корозія тощо - повинні бути ретельно вивчені і по можливості усунуті.

Втрати працездатності виробів внаслідок відмов призводять до простоїв, значних витрат на ремонт та запасні частини. За 10 років на ремонт обладнання харчових підприємств України витрачаються кошти, співрозмірні з вартістю основних виробничих фондів.

Значним чинником ресурсопоглинання є якраз зношування і корозія робочих органів машин і обладнання. В більшості випадків довговічність технічних об'єктів пов'язана з проблемою спрацювання їх окремих деталей і вузлів. Тому підвищення зносостійкості вузлів тертя машин і захист від корозії елементів конструкції апаратів є основним з головних напрямків підвищення надійності та довговічності устаткування галузі.

Надійність і якість у застосуванні до технічних об'єктів і систем - поняття надзвичайно близькі: створити ненадійну, але якісну машину чи апарат - немислимо. Надійність технічної системи або об'єкта можна визначити, як їх властивість виконувати задані функції і зберігати з часом значення встановлених параметрів у заздалегідь обумовлених межах, що відповідають заданим режимам роботи і умовам використання, ремонтів, технічного обслуговування, збереження і транспортування.

Таким чином, окрім комплексності надійність характеризується системністю.

Ступінь надійності кожної машини чи одиниці технологічного обладнання визначається імовірністю появи в ній несправностей та відмов, що ведуть до втрати здатності нормального функціонування. За певних умов експлуатації іноді виникає така ситуація, при якій виникнення несправності не приводить до негайного виходу технічного об'єкту з ладу. Однак, якщо вчасно не прийняти належних заходів, дрібні несправності викличуть великі, які приведуть до повної або часткової втрати працездатності технічного засобу.

Отже, боротьба за підвищення надійності це, насамперед, боротьба з несправностями. Але, нажаль, поки ще дуже часто стратегія такої боротьби виявляється недостатньо обміркованою, оскільки найчастіше усувають наслідки відмов об'єктів, а головну увагу потрібно приділяти причинам. Суттєвий результат можуть дати тільки нові принципи проектування машин, розроблення науково обгрунтованих методів контролю їхнього технічного стану, діагностики і прогнозування можливих несправностей.

Для вирішення проблем надійності і довговічності технічних об'єктів застосовують різні галузі знань та поєднують різноманітні методи. Тут застосовується і теорія імовірності, і фізико-хімічна механіка матеріалів, і розділи динаміки і міцності машин, ідеї автоматичного регулювання і кібернетики, положення теорії технологічних процесів і дефектоскопії. Таким чином, ця наука багатогранна і потребує застосування багатьох знань і навичок.

Наука про надійність і довговічність вивчає зміну показників працездатності технічних об'єктів у часі і на цій основі розробляє методи, забезпечуючи з найменшою втратою часу і засобів їх необхідний строк служби і рівень безвідмовності. Таким чином, ця дисципліна побудована

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

на підґрунті наукового прогнозу поведінки об'єкта чи системи об'єктів в часі.

Принципи конструювання і створення надійних машин і технологічного обладнання різних галузей харчової і переробної промисловості повинні ґрунтуватись на досягненнях сучасного машинобудування, максимально використовувати арсенал наукових досліджень. Простота технічного пристрою передбачає ліквідацію надлишкових ланок і підсистем, надійність яких впливає на загальну надійність конструкції, раціональні схеми керування, звільнення технічних об'єктів від надмірних навантажень і динамічних процесів, можливість з найбільшою вірогідністю проводити технічну діагностику, полегшити обслуговування і ремонтно-профілактичні роботи.

Динамічна оптимальність конструктивних схем є також важливим фактором підвищення надійності машин, що має поєднуватися з боротьбою з будь-якими видами зносу деталей і підсистем практично всіх технічних засобів, для чого застосовують засоби, які базуються на досягненнях сучасного матеріалознавства.

Зношування в умовах харчових і переробних виробництв є маловивченою специфічною проблемою триботехніки. Робочі вузли машин і апаратів, речовини і технологічні рідини утворюють складні динамічні системи, в яких закономірності тертя, корозії та інтенсивність спрацювання залежать від багаточисельних чинників: умов переробки сировини, хімічних і реологічних характеристик робочих середовищ, застосованих конструкційних матеріалів і захисних покриттів, геометрії робочих органів тощо. Враховуючи, що більшість технологічних процесів харчової промисловості відбувається в рідинних середовищах, багато з яких є корозійно- та поверхнево активними, значна частина деталей обладнання піддається дії швидкопливних потоків рідини, що спричиняє їх інтенсивне кавітаційно-ерозійне та корозійно-механічне спрацювання.

В практиці конструювання обладнання харчових і переробних виробництв ресурс робочих органів призначається часто емпірично з урахуванням досвіду експлуатації аналогів, що може призвести до помилок стосовно нових зразків створюваної техніки. Це викликає необхідність розробки розрахункового методу оцінки надійності і довговічності робочих органів, що базується на глибоких теоретичних та експериментальних дослідженнях, розкритті природи, механізму спрацювання, одержанні фізичних моделей процесів, що протікають при руйнуванні матеріалів.

Підвищення надійності техніки тісно пов'язане також з умінням правильно організувати технічне обслуговування, що повинне визначатися не загальним розумінням про необхідність періодичної заміни деталей, вузлів і агрегатів виробів, виходячи з термінів, що зазначені підприємствами-виробниками; а умінням проводити своєчасну, науково обґрунтовану діагностику технічного стану машин і обладнання, прогнозування і завчасне виявлення їхніх можливих відмов. Такі принципи вимагають збирання, оброблення і аналіз інформації про технічний стан машини; застосування відповідних методик, що використовують сучасні контрольно-вимірювальні прилади й обчислювальну техніку для технічної діагностики .

Експлуатаційна надійність і довговічність обладнання є важливою його характеристикою і має велике економічне значення в будь-якій галузі промисловості. З їх збільшенням покращується робота обладнання, якість продукції, зменшуються витрати на ремонт, заощаджуються матеріальні ресурси, підвищується продуктивність праці.

Згідно з аналізом, опублікованим Британським комітетом трибоніки, в цій країні на заміну спрацьованих деталей витрачається щорічно близько 500 мільйонів фунтів стерлінгів. Як це не парадоксально, але трудомісткість ремонтних робіт значно перевищує

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

трудомісткість виготовлення нових машин, тому що ремонт обладнання за рівнем оснащення значно відстає від основного виробництва. До 70 % ремонтних робіт виконується вручну, а деталі, які виготовлені в ремонтних цехах на заміну зношених, в 5 -10 разів дорожчі за деталі, які вироблені на заводах, що виготовляють технологічне обладнання. Наприклад, середня трудомісткість виготовлення металорізального верстата 1K62 — 216 нормогодин, а його капітального ремонту — 700. Ресурс роботи більшості тракторів та їх двигунів — 3000...5000 годин, а після капітального ремонту не перевищує 1500 годин.

Статистичний аналіз показує, що 85 % виходів з ладу більшості машин відбувається через зношування рухомих спряжень. Зносостійкість деталей також визначає стабільність роботи машин. По мірі спрацювання деталей у спряженнях збільшуються зазори, виникають ударні взаємодії поверхонь, що може привести до їх руйнування, особливо якщо машини експлуатуються за безперервним циклом, що характерно для багатьох харчових виробництв. А безперебійність роботи важлива і для збереження вихідних якостей продуктів.

Підраховано, що попередження позапланових простоїв цукрових заводів, наприклад, у країнах СНД рівноцінне вводу в експлуатацію 14 середніх за потужністю заводів, а 60 % часу їх простоїв обумовлені недостатньою надійністю і довговічністю обладнання.

Корозійна стійкість матеріалів, які використовуються у харчовому обладнанні має велике значення для забезпечення санітарно-гігієнічних вимог, які виключають забруднення харчових продуктів іонами металів. Підсилити опір металів корозії можна за допомогою інгібіторів. Без перебільшення можна стверджувати, що за останні роки інгібітори корозії не лише стали самостійним видом захисту, але й істотно змінили склад багатьох класичних засобів захисту (олив, мастил, полімерних, хімічних та електрохімічних покриттів). Ряд технологічних середовищ взагалі не

можна застосовувати без інгібіторів. Наприклад, використання в технологічних процесах сильних окислювачів стало можливим лише завдяки використанню інгібіторів корозії. Багато холодоносіїв для теплообмінної апаратури не можна використовувати без інгібіторів корозії, а перероблення окремих видів сировини також без них неможливе.

Особливого значення загальнодоступні і дешеві інгібітори корозії набувають при застосуванні їх в галузях харчової в переробної промисловості, де використовуються підвищені температури з стрибкоподібними перепадами, агресивні середовища, а обладнання піддається значним механічним навантаженням. У зв'язку з цим виникає необхідність забезпечення експлуатаційної надійності і довговічності обладнання, технологічних трубопроводів і металоконструкцій, які глибоко пов'язані з його корозійною стійкістю.

Таким чином, підвищити надійність і довговічність обладнання у харчовій промисловості можна, окрім загальноприйнятих, двома шляхами: підвищенням зносостійкості деталей, які працюють в умовах тертя; забезпеченням достатньої корозійної стійкості деталей, які працюють в контакті з агресивними технологічними середовищами.

Біля витоків напрямку досліджень теорії надійності стояли професори Прейс Г.О., Сологуб М.А. Їх роботу продовжили учні – професори Некоз О.І. і Сухенко Ю.Г., Берник П.С., Литвиненко О.А. Паламарчук І.П. і Сухенко В.Ю.; доценти Жеплінська М.М., Зімко Б.М., Іпатов К.О., Слинько О.І., Сивак Р.І., Іпатов І.К., Безикорнов О.І., Білий В.І., Новицький О.Є. та інші. Тому питання зношування і підвищення стійкості деталей машин і обладнання харчових виробництв на основі досліджень зазначених науковців покладені в основу даного навчального підручника. Проблеми захисту від корозії представлені у роботах Крючека В.Г., що виконувались разом з Інститутом Титану,

праці Краснопольського М.І. стосовно підвищення корозійної стійкості устаткування спиртових заводів, Сухенка В.Ю. щодо досліджень протикорозійного інгібіторного захисту обладнання галузі.

Навчальний підручник, який пропонується читачеві, складається з двох взаємопов'язаних частин. У першій частині розглянуті методи оцінки показників надійності з використанням математичної статистики і способи забезпечення їх належного рівня на стадіях проектування, виробництва і експлуатації технічних об'єктів. У другій частині розглянуті технологічні методи забезпечення їх довговічності, а також способи прогнозування ресурсу і безвідмовності використання на підґрунті математичного моделювання процесів спрацювання обладнання.

Розділ 1. ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Поняття та структура технічної системи

Технічна система (ТС) – це сукупність спільно взаємодіючих об'єктів, призначених для виконання заданих функцій. Система може включати різні сукупності об'єктів. Як система може розглядатися автоматична система керування технологічним процесом (АСК ТП), двигун, гомогенізатор, компресор, холодильник, дифузійний апарат, комп'ютер або один з його периферійних пристроїв тощо.

В техніці широко застосовується також поняття **технологічної системи**, що являє собою сукупність функціонально взаємопов'язаних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва та виконавців для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів або операцій.

Систему, що виділяється за функціональною або структурною ознакою з технологічної системи більш високого рівня, називають **підсистемою** технологічної системи.

Теорія надійності розглядає послідовні, паралельні і комбіновані ТС. Існують системи з жорстким зв'язком підсистем, в яких вихід з ладу хоча б однієї ланки призводить до припинення функціонування ТС в цілому. Альтернативою такій системі є ТС з нежорстким зв'язком підсистем. У комп'ютері, наприклад, відома одного з дисководів не викликає припинення функціонування його в цілому (система з нежорстким зв'язком підсистем).

Об'єкти, що утворюють системи, є елементами систем. У теорії надійності під **елементом** розуміють частину системи, що має

самостійну характеристику надійності, що використовується у розрахунках, та виконує певну часткову функцію для забезпечення роботи системи. Елементами системи можуть бути, наприклад, виконавчий механізм, запам'ятовуючий пристрій ЕОМ, деталь агрегата тощо.

Система і елементи є поняття умовні. Те, що вважається системою в одній задачі надійності, може сприйматися елементом в іншій. Навіть така складна система, як АСК ТП, може розглядатися як складовий елемент системи автоматизованого технологічного комплексу, до складу якого окрім АСК ТП входить технологічний об'єкт керування (сукупність технологічного обладнання та реалізованого на ньому технологічного процесу виробництва).

Характеристики надійності елементів визначаються в результаті аналізу фізичних процесів, при проведенні випробувань, або з досвіду експлуатації. Характеристики надійності системи в цілому визначають з характеристик надійності елементів, що утворюють цю систему.

1.2 Аналіз параметрів надійності у контексті станів технічної системи

1.2.1 Основні параметри надійності

Згідно із ДСТУ 2860-94 "Надійність техніки. Терміни та визначення": **надійність** - це властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування. У цьому визначенні під об'єктом розуміють систему, споруду, машину, підсистему, апаратуру, функціональну одиницю, одиницю обладнання, пристрій, елемент, чи будь-яку їх частину, що розглядається з сторони надійності, як самостійна

одиниця. Об'єктами можуть бути й інші технічні засоби, технічний персонал, або їх поєднання. Отже, властивість «надійність» стосується не лише рукотворних об'єктів, але й, очевидно, виконавців – операторів, слюсарів-ремонтників, інженерно-технічного персоналу тощо.

Поняття «надійний», «ненадійний» лише словесно (якісно) характеризує цю властивість технічного об'єкта. З тим, щоб мати можливість кількісно оцінити та порівняти її з надійністю іншого, обґрунтовано розробляти відповідні інженерно-технічні заходи щодо її підвищення, розглядають окремі властивості у надійності.

Цей же стандарт регламентує таких п'ять властивостей, рівень яких можна оцінювати кількісно: **безвідмовність, довговічність, збережуваність, ремонтпридатність, готовність** (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Властивості і показники надійності

№ п/п	Властивості надійності	Вид показників	Назва показника	Позначення
1	2	3	4	5
1.	Безвідмовність	Одиничні	Імовірність безвідмовної роботи	$P(t)$
			Середній наробіток до відмови	T_o або T_{cp}
			Інтенсивність відмов	$\lambda(t)$
			Гамма - відсотковий наробіток до відмови	T_γ
			Наробіток на відмову	T
			Параметр потоку відмов	$\omega(t)$
2.	Довговічність	Одиничні	Середній ресурс	T_p або T
			Середній термін служби	T_{cl}
			Гамма - відсотковий ресурс	$T_{p\gamma}$
			Гамма - відсотковий термін служби	$T_{cl\gamma}$
			Призначений ресурс	T_{pnp} або
			Призначений термін служби	T_{clnp}

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
3.	Ремонтопридатність	Одиничні	Імовірність відновлення	$P_v(t)$
			Середня тривалість відновлення	T_B
			Гамма - відсоткова тривалість відновлення	$T_{B\gamma}$
			Інтенсивність відновлення	$\mu(t)$
			Середня інтенсивність відновлення	$\mu(t)$
			Середня трудомісткість ТО (ремонту)	S_p або T_{II}
4.	Збережуваність	Одиничні	Середній термін збережуваності	$T_{зб}$ або T_c
			Гамма - відсотковий термін збережуваності	$T_{зб\gamma}$ або $T_{c\gamma}$
5.	Готовність	Комплексні	Коефіцієнт готовності	K_{Γ}
			Коефіцієнт неготовності	$K_{H\Gamma}$
			Середній коефіцієнт	K_{Γ}
			Стаціонарний коефіцієнт готовності	$K_{\Gamma CT}$
			Коефіцієнт оперативної готовності	K_{Op}
			Коефіцієнт технічного використання	K_{mv}
			Коефіцієнт збереження ефективності	$K_{e.v.}$ або K_{ef}

Розглянемо визначення кожної з них.

Безвідмовність об'єкта - це властивість його виконувати задані функції у певних умовах експлуатації впродовж заданого інтервалу часу чи наробітку.

Довговічність об'єкта - це властивість його виконувати задані функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування (ТО) і ремонту.

Збережуваність об'єкта - це властивість його зберігати у заданих межах значення параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції під час і після зберігання його та транспортування.

Ремонтопридатність об'єкта - це властивість його бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, у якому він здатний виконувати задані функції після застосування ТО і ремонту.

Характеризувати ремонтпридатність можна часом вимушеного простоювання машин та обладнання, який дорівнює сумарному часові, потрібному для профілактики, пошуку місця відмови та її усунення. Чим надійнішою є технічна система, чим вища її ремонтпридатність, тим менше вона відмовляє і менше простоює, тобто тим вища імовірність застати систему в будь-який момент у часу працездатному стані.

Ремонтопридатність разом з надійністю визначають ефективність дії любого технічного об'єкта чи технічної системи. Якщо система достатньо надійна і рідко відмовляє, але має низьку ремонтпридатність, потребує великих витрат часу на профілактику та відновлення, то вона не завжди може конкурувати з менш надійною системою, у якої час простоювання, потрібний для профілактики та відновлення, малий. Для виконання поставленої задачі перша система може потребувати більшого резерву часу, ніж друга. Крім того, ремонтпридатність разом з надійністю визначають вартість експлуатації, необхідну кількість резервних вузлів, обсяг ремонтних засобів тощо.

Поняття ремонтпридатності стосується об'єктів і систем тривалого використання та виробів з довгим терміном зберігання. Це поняття не застосовується для об'єктів і систем разового використання, які не відновлюються ні протягом зберігання, ні в період експлуатації.

Готовність об'єкта - це властивість його бути здатним виконувати задані функції в обумовлених експлуатаційних умовах у будь-який час чи впродовж заданого інтервалу часу або наробітку за умови забезпечення необхідними ресурсами, які впливають на його працездатність.

Властивість «готовність об'єкта» залежить від поєднання властивостей безвідмовності, ремонтпридатності і від матеріально-технічного забезпечення його ТО і ремонту.

Перш, ніж перейти до розгляду інших понять і визначень, які входять у властивість надійність, зазначимо, що вона формується на етапах проектування і виготовлення виробів, а проявляється і забезпечується на етапі їх експлуатації. Оскільки технічна якість виробів проявляється на етапі експлуатації виробів, тому оперують поняттям експлуатаційна надійність.

Безвідмовність об'єкта оцінюється 6-ма показниками: 1 - імовірність безвідмовної роботи (ІБР); 2 - середнє напрацювання (наробіток) до відмови; 3 - інтенсивність відмов; 4 - середній наробіток на відмову; 5 - гамма-відсотковий наробіток на відмову; 6 - параметр потоку відмов.

Імовірність безвідмовної роботи об'єкта (його вузлів і агрегатів) - це імовірність того, що у межах заданого напрацювання (наробітку) відмова не виникне.

Середнє напрацювання до відмови - це математичне сподівання наробітку об'єкта до першої відмови.

Інтенсивність відмов - кількість відмов за одиницю наробітку об'єкта, що виражається умовною густиною імовірності виникнення відмови.

Гамма-відсотковий наробіток до відмови - це наробіток, упродовж якого відмова об'єкта не виникне з імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Напрацювання на відмову - це відношення напрацювання ремонтпридатного об'єкта до математичного сподівання кількості його відмов упродовж цього напрацювання.

Параметр потоку відмов - це відношення середньої кількості відмов ремонтпридатного об'єкта за деякий наробіток до цього напрацювання.

Довговічність об'єкта оцінюють 6-ма показниками:

1 - середній ресурс; 2 - середній термін служби; 3 - гамма-відсотковий ресурс; 4 - гамма-відсотковий термін служби; 5 - призначений ресурс; 6 - призначений термін служби.

Середній ресурс - це математичне сподівання технічного ресурсу об'єкта від початку його експлуатації, або від моменту капітального ремонту до настання його граничного стану.

Середній термін служби - це математичне сподівання календарної тривалості від початку експлуатації нового або відремонтованого об'єкта до настання його граничного стану.

Гамма-відсотковий ресурс - це напрацювання, упродовж якого технічний об'єкт не досягне граничного стану із заданою імовірністю вираженою у відсотках.

Гамма-відсотковий термін служби - це календарна тривалість від початку експлуатації об'єкта, упродовж якої він не досягне граничного стану із заданою імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Призначений ресурс - це сумарне напрацювання об'єкта, при досягненні якого застосування за призначенням повинно бути припинене.

Призначений термін служби - це тривалість експлуатації об'єкта, при досягненні якої застосування за призначенням повинно бути припинене.

Ремонтопридатність об'єкта оцінюють 5-ма показниками:

1 - імовірність відновлення; 2 - середня тривалість відновлення, 3 - інтенсивність відновлення, 4 - середня інтенсивність відновлення, 5 - середня трудомісткість ТО (ремонту).

"Відновлення" означає подію, яка полягає в тому, що після виявлення несправності об'єкта він знову відновлює здатність виконувати потрібну функцію.

Імовірність відновлення - це імовірність того, що тривалість відновлення працездатного стану об'єкта не перевищить заданого значення.

Середня тривалість відновлення - це математичне сподівання тривалості відновлення працездатного стану об'єкта після цього відмови.

Гамма-відсоткова тривалість відновлення - це інтервал часу, впродовж якого відновлення працездатності об'єкта здійснюється з імовірністю γ , %.

Інтенсивність відновлення - це умовна густина імовірності відновлення працездатності об'єкта, визначена для одного моменту часу за умови, що до цього моменту, відновлення не завершилося.

Середня інтенсивність відновлення - це її середнє значення в заданому інтервалі часу.

Середня трудомісткість ТО (ремонту) - це математичне сподівання трудомісткості ТО (ремонту), виражене у людино-годинах.

Збережуваність об'єкта оцінюють двома показниками: середній термін зберігання; гамма-відсотковий термін зберігання.

Середній термін зберігання - це математичне сподівання терміну зберігання.

Гамма-відсотковий термін зберігання - це термін зберігання, що його досягає об'єкт із заданою імовірністю γ , %.

Готовність, як комплексна властивість (з урахуванням інших властивостей), що характеризує надійність об'єкта, оцінюється 7-ма показниками: 1 - коефіцієнт готовності, 2 - коефіцієнт неготовності, 3 - середній коефіцієнт готовності, 4 - стаціонарний коефіцієнт готовності, 5 - коефіцієнт оперативної готовності, 6 - коефіцієнт технічного використання, 7 - коефіцієнт збереження ефективності.

Коефіцієнт готовності - імовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, впродовж яких використання його за призначенням не передбачене.

Коефіцієнт неготовності (коефіцієнт простою) - імовірність того, що об'єкт виявиться непрацездатним у довільний момент часу, крім

запланованих періодів, впродовж яких використання його за призначенням не передбачене.

Середній коефіцієнт готовності - середнє значення нестационарного коефіцієнту готовності в заданому інтервалі часу.

Стаціонарний коефіцієнт готовності - значення коефіцієнта готовності, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середня тривалість відновлення є сталими.

Коефіцієнт оперативної готовності - імовірність того, що, за винятком тих запланованих періодів, коли використання об'єкта за призначенням не передбачене, він у довільний момент часу виявиться у працездатному стані і надалі виконуватиме потрібну функцію впродовж заданого інтервалу часу.

Коефіцієнт технічного використання - це відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта у працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування його у працездатному стані та у простоях, зумовлених ТО і ремонтом за цей же період.

Коефіцієнт збереження ефективності - це відношення значення показника ефективності використання об'єкта за призначенням за певну тривалість експлуатації до номінального значення цього показника, розрахованого за умови, що відмови цього об'єкта упродовж того ж періоду не виникають.

Кожен із відповідних показників, які характеризують ту чи іншу властивість об'єкта щодо його надійності, розраховують за результатами попередньо проведених експериментальних досліджень чи спостережень з використанням відповідних формул.

1.2.2 Стани технічної системи

Серед основних станів технічної системи можна відзначити такі, які виконують основні (головні) та другорядні функції. Серед основних можна виділити такі:

- справний стан;
- роботоздатний стан;
- критичний стан;
- граничний стан.

У визначеннях окремих властивостей виробів зустрічаються терміни "стан", "граничний стан". Стандарт регламентує 25 різновидів станів об'єктів. Розглянемо лише тих шість різновидів станів, які характерні для машин та обладнання харчової, мікробіологічної і фармацевтичної промисловості.

Справний стан (справність) - стан об'єкта, за яким він здатний виконувати усі покладені на нього функції.

Несправний стан (несправність) - стан об'єкта, за яким він не здатний виконувати хоча б одну із покладених на нього функцій.

Працездатний стан (працездатність) - стан об'єкта, який характеризується його здатністю виконувати усі основні функції.

Непрацездатний стан (непрацездатність) - стан об'єкта, за яким він не здатний виконувати хоча б одну з основних функцій.

Критичний стан - це стан об'єкта, що може призвести до травмування людей, значних матеріальних збитків чи інших небажаних наслідків. Критичний стан об'єкта характеризується несправностями вузлів і агрегатів об'єкта, які впливають на безпеку його експлуатації (гальмова система, система запобіжних клапанів, система світлової сигналізації тощо).

Граничний стан - це стан об'єкта, за яким його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його працездатності неможливе, чи недоцільне (гранично зношені усі базові вузли і деталі); характеризується настанням відмови елементів технічної системи.

Кожну із перелічених п'яти властивостей об'єкта, які характеризують його надійність, оцінюють відповідними показниками.

Різновидами роботи системи є технологічна експлуатація, технічна експлуатація, зберігання і транспортування та підготовка до використання.

1.3 Причини втрати системою роботоздатності

1.3.1 Причини змін початкових параметрів машини

Ті зміни, що відбуваються протягом певного часу в будь-якій машині і спричиняють втрату нею працездатності, пов'язані із зовнішніми та внутрішніми впливами, яких вона зазнає. В процесі експлуатації на машину діють три основні види енергії, які можуть призвести до погіршення параметрів окремих елементів, механізмів і виробу в цілому:

- дія енергії оточення, тобто людини, яка виконує функції оператора або ремонтника;
- внутрішні джерела енергії, пов'язані як із робочими процесами, що відбуваються в машині, так і з роботою її окремих механізмів;
- потенціальна енергія, що нагромадилась в матеріалах і деталях машини під час їх виготовлення (внутрішні напруження у виливку, монтажні напруження тощо).

Під час роботи машини на її працездатність впливають основні види енергії.

Механічна енергія, яка не тільки передається по всіх ланках машини в процесі роботи, але й впливає на неї у вигляді статичних або динамічних навантажень від взаємодії із довкіллям.

Теплова енергія впливає на машину та її частини під час коливань температури довкілля, під час робочого процесу (особливо сильний

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

тепловий вплив спостерігається під час роботи двигунів і деяких технологічних машин, роботи приводних механізмів, електротехнічних та гідравлічних пристроїв).

Хімічна енергія також впливає на роботу машини. Навіть повітря, що містить вологу і агресивні складові, може спричинити корозію окремих вузлів виробу.

Ядерна (атомна) енергія може впливати на матеріали (особливо у космосі), змінюючи їх властивості.

Електромагнітна енергія у вигляді радіохвиль (електромагнітних коливань) пронизує весь простір навколо машини і може впливати на роботу електронної апаратури.

Біологічні чинники також можуть впливати на працездатність машини. Наприклад, у тропічних країнах є мікроорганізми, які не тільки руйнують деякі види пластмас, але й можуть впливати на метал.

1.3.2 Процеси, що знижують працездатність виробу

Різні види енергії, діючи на машину, спричиняють в її вузлах і деталях процеси, що погіршують початкові параметри виробу. Ці процеси пов'язані, як правило, із складними фізико-хімічними явищами і призводять до деформації, зношення, руйнування, корозії та до інших видів пошкоджень.

Це, в свою чергу, призводить до зміни вихідних параметрів виробу, що може спричинити відмову.

Ці взаємозв'язки спрощено можна виразити такою схемою (рис.1.1).

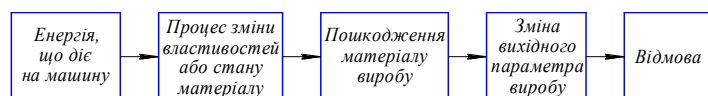


Рис.1.1 Спрощена схема впливів на зміну початкових параметрів виробу

Необхідно зважити на те, що деякі процеси, які відбуваються в

машині і впливають на її технічні характеристики, є оборотними. *Оборотні процеси* тимчасово змінюють параметри деталей, вузлів і всієї системи в деяких межах, без тенденції прогресивного погіршення. Найхарактерніший приклад - пружна деформація вузлів і деталей машин.

Необоротні процеси призводять до прогресивного погіршення технічних характеристик машини із часом. Найхарактернішими з них є зношування, корозія, втома, перерозподіл внутрішніх напружень і короблення деталей із часом.

1.3.3 Класифікація впливів, що діють на машину, за їх швидкістю

Щоб охарактеризувати надійність виробу, потрібно оцінити швидкість перебігу процесів, що знижують його працездатність.

Швидкодійні процеси мають періодичність зміни, що вимірюється, як правило, частками секунди. Вони закінчуються в межах одного циклу роботи машини і виникають знову під час наступного. До них належать вібрації вузлів, зміна сил тертя в рухомих з'єднаннях, коливання робочих навантажень та інші процеси, що впливають на взаємне розташування вузлів машини в кожен момент часу і спотворюють її роботу.

Процеси середньої швидкості пов'язані із періодом неперервної роботи машини. Їх тривалість вимірюється у хвилинах і годинах. Вони призводять до монотонної зміни початкових параметрів машини. До цієї категорії належать як оборотні процеси (зміна температури самої машини і довкілля, зміна вологості середовища), так і необоротні (спрацювання різального інструменту, що відбувається набагато інтенсивніше ніж спрацювання деталей та вузлів машини).

Повільні процеси проходять за час роботи машини між періодичними оглядами і ремонтами. Вони тривають дні та місяці. До таких процесів належить спрацювання основних механізмів машини,

перерозподіл внутрішніх напружень у деталях, повзучість металів, забруднення поверхонь тертя, корозія.

1.3.4 Допустимі та недопустимі види пошкоджень деталей та спряжень

Види пошкоджень деталей машини, і відповідно, відмови можна розділити на дві групи: допустимі (за характером, а не за розміром пошкодження), що виникають за нормальних умов експлуатації, і недопустимі, які мають аварійний характер. Руйнуватись або деформуватись може як тіло деталі, так і її поверхня, що взаємодіє (контактує) із поверхнею спряженої деталі.

До *допустимих пошкоджень* належить короблення (залишкові деформації) деталі, в деяких випадках руйнування внаслідок втоми, деякі види зношення, втома поверхневих шарів.

Як правило, недопустимі руйнування деталей виникають внаслідок недостатньої статичної, динамічної або втомної міцності, їх можуть викликати і теплові тріщини, і нагрівання деталі, іноді корозія.

Всі недопустимі пошкодження та причини їх виникнення повинні бути усунені. Допустимі пошкодження, як правило, не можуть бути повністю усунені; можна тільки сповільнити їх прояв, наприклад, зменшуючи швидкість зношування.

Старінням називають необоротну зміну властивостей або стану матеріалу виробу внаслідок дії різних чинників.

Наприклад, пружна або тепла деформація виробу, що можуть призвести до відмови, не є процесами старіння, оскільки при знятті зовнішніх навантажень (силових і температурних), що спричиняють їх, відбувається повернення до вихідних характеристик.

Необоротні процеси - зношування, корозія, втома, втрата магнітних властивостей матеріалу, структурні його зміни, зміна відбивної здатності

поверхні та інші, що призводять до пошкоджень та погіршують початкові параметри виробу, тобто відбувається його старіння.

Певні процеси в машині можуть призвести до відмов, які пов'язані не з виходом із ладу окремих деталей та спряжень, а із погіршенням характеристик машини та виходом їх за допустимі межі.

Параметри, що характеризують якісні показники, є специфічними для кожного типу машин і визначаються їх функціональним призначенням.

Наприклад, для металорізальних верстатів та іншого технологічного обладнання основними показниками є точність оброблювання та якість отримуваної продукції, а також продуктивність.

В сучасних машинах надійність їх роботи визначається, в першу чергу, зміною вихідних параметрів під дією різних процесів старіння, тобто параметричною надійністю виробів.

Параметрична надійність виробів - це основний об'єкт розгляду теорії, яка визначає стан окремих механізмів та машини в цілому.

1.3.5 Залишкові напруги у поверхневому шарі

Власними (внутрішніми) напруженнями називають напруження, що виникають у тілі при відсутності зовнішніх силових впливів. Вони утворюються внаслідок нерівномірності розподілу температури по об'єму тіла, різних умов його охолодження, утворення при нагріванні або охолодженні нових структур з іншою щільністю, при наявності сторонніх включень тощо.

Розрізняють три типи власних напружень: напруження першого типу (макронапруження), зрівноважені у великих об'ємах, порівняних з розмірами деталі; напруження другого типу (мікронапруження), зрівноважені в межах одного чи декількох кристалічних зерен; напруження третього типу (субмікронапруження), що діють між

елементами кристалічних ґраток.

Власні напруження можуть бути тимчасовими і залишковими. Залишковими називають напруження, що існують у тілі за відсутності зовнішніх силових впливів і при рівномірній по всьому об'єму тіла температурі.

При пластичному деформуванні поверхневого шару металу його щільність зменшується, а питомий об'єм збільшується. Через те, що вільному збільшенню об'єму в поверхневому шарі перешкоджає основний недеформований метал деталі, у зовнішньому шарі виникають напруги стиснення, а в прилеглому до основного металу – розтягуючі. Таке пояснення передбачає, що деформований шар не знаходиться в стані повзучості (повної пластичності), оскільки при повній пластичності сили пружності не проявляються, і деформація відбувається без прагнення матеріалу до відновлення початкової форми.

Температура переходу з пружного стану в пластичний (t_p) для вуглецевих сталей становить приблизно 450 °С, для легованих – близько 550 °С. При шліфуванні і швидкісному різанні температура приповерхневого шару може досягти 800...900 °С. Нагрівання поверхневого шару при обробленні деталі викликає в ньому температурні напруги. Розглянемо це докладніше.

Нехай в процесі оброблення циліндричної деталі шар 1 знаходиться в стані повзучості внаслідок нагрівання до високої температури (рис. 1.2). В ньому внутрішні напруження не виникають, а якщо були залишкові напруження, то вони знімаються.

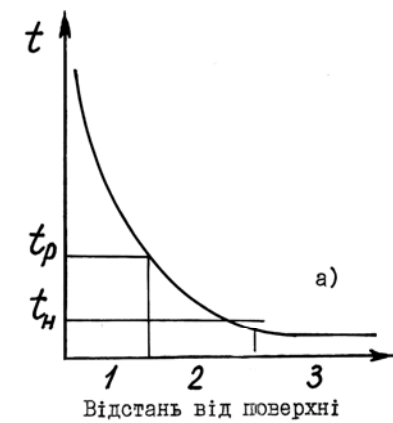
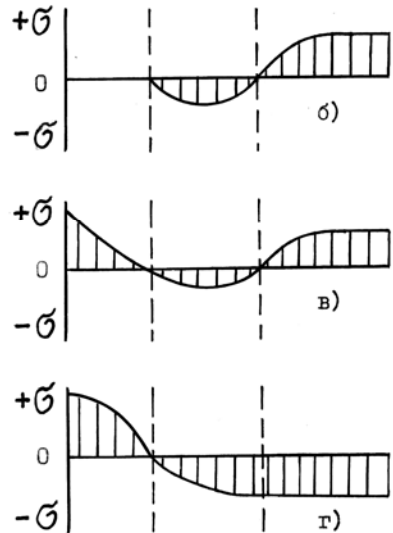


Рис. 1.2 Виникнення напружень у поверхневому шарі після механічної обробки сталі: а - залежність температури t від відстані до поверхні; б,в,г – варіанти напружень у приповерхневому шарі (пояснення в тексті)



У шарі 2 з температурою t_p , вищою від нормальної t_n , внаслідок нагрівання виникають напруження стиснення, а в шарі 3 – розтягування (рис. 1.2, а, б). Ці напруження тимчасові. Як тільки зовнішній шар охолоне до t_p , він стає пружним. Зустрічаючи опір скороченню при охолодженні, зовнішній шар стає розтягнутим в радіальному напрямку.

У шарі 2 стискаючі напруження зростають (рис. 1.2, в). При подальшому охолодженні до повного вирівнювання температури по перерізу деталі розтягуючі напруження в шарі 1 збільшуються, а одночасно в шарах 2 і 3 виникають стискаючі напруження (рис. 1.2, г). За своїм характером ці напруження, як і напруження, обумовлені пластичною деформацією, є напруженнями першого роду. Але, через неоднакове тепловиділення на суміжних ділянках оброблюваної поверхні і нерівномірності пластичної деформації, виникають також напруження другого роду.

Таким чином, у поверхневому шарі обробленої поверхні при пластичній деформації за відсутності повзучості (внаслідок сильного нагрівання) розвиваються залишкові стискаючі напруження.

Тепловий ефект від різання призводить до виникнення розтягуючих напружень. Оскільки обидва чинники діють спільно, то знак залишкового напруження в поверхневому шарі залежить від того, який з чинників переважає. Очевидно, якщо температура на оброблюваній поверхні нижча t_p , то температурні напруження є тільки тимчасовими і після

вирівнювання температури зникнуть. Залишкові напруження при механічному обробленні можуть досягати $6 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^3$ МПа та можуть бути як стискаючими, так і розтягуючими.

Під дією розтягуючих напружень можуть виникати так звані оброблювальні (шліфувальні) тріщини. Залишкові розтягуючі напруження знижують втомлювальну міцність деталей.

1.3.6 Фізико-хімічні властивості поверхонь деталей

Поверхня деталей має велику активність. Усередині твердого тіла кожний атом оточений іншими атомами і зв'язаний з ними в усіх напрямках, а у поверхневих атомів із зовнішнього боку “сусідів” немає, зв'язки одnobічні. Їх некомпенсована вільна енергія створює електростатичне силове поле поверхні. Тому будь-яка поверхня твердого тіла покрита найтоншою плівкою з речовин, що містяться в оточуючому його середовищі. Такими речовинами можуть бути гази і пара, а також речовини, розчинені в рідинах, які стикаються з поверхнею твердого тіла. Явище утворення на поверхні твердого тіла найтонших плівок газів, пари, розчинених речовин, або поглинання цих речовин поверхнею тіла називається *адсорбцією*.

Полярно-активні молекули газового або рідкого середовища, що зіштовхуються при своєму хаотичному русі з поверхнею твердого тіла, попадають в його електричне поле і приєднуються до активних центрів поверхні, утворюючи адсорбований шар орієнтованих молекул.

Розрізняють два види адсорбції: *фізичну*, яка виникає під дією сил Ван-дер-Ваальса та *хімічну (хемосорбція)*, що виникає під дією сил хімічного зв'язку між поверхнею твердого тіла і адсорбованими на ній під дією сил Ван-дер-Ваальса молекулами. Отже, при хемосорбції відбувається фізична адсорбція молекул із середовища, а потім їхня хімічна реакція з поверхнею.

Між двома видами адсорбції є принципова різниця, що відзначається у наступному.

1. Фізична адсорбція оборотна, за якої має місце зв'язок між адсорбуючою поверхнею та адсорбованою речовиною (рідиною, газом), який може бути порівняно легко порушений тепловим впливом, дією розчинника, внаслідок чого відбувається десорбція молекул і відновлюється вихідний (початковий) стан поверхні твердого тіла.

2. Хемосорбція необоротна, коли між поверхнею та адсорбованими молекулами виникає міцний хімічний зв'язок з утворенням нової сполуки на поверхні твердого тіла, що має стійкість до дії зовнішніх факторів набагато більшу, ніж фізично адсорбовані молекулярні шари.

Міцність зв'язку адсорбованих молекул з поверхнею тіла може бути різноманітною: в межах від найбільш слабких зв'язків при фізичній адсорбції до найбільш міцних хімічних зв'язків при хемосорбції.

1.3.7 Плівки на металевих поверхнях тертя

Практично всі метали піддаються окислюванню. Одразу після оброблення металеві поверхні миттєво покриваються оксидною плівкою. Незважаючи на малу товщину при нормальній температурі вона призупиняє подальше окислювання. Продуктами окислювання можуть бути тверді розчини кисню в металі і хімічні сполуки кисню з металом. Так, на залізі можуть утворюватися три оксиди: FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 .

На повітрі оксидні плівки утворюються дуже швидко. Плівка товщиною 15 ангстрем ($15 \cdot 10^{-4}$ мкм) виникає вже через 0,05с. Зі збільшенням товщини плівки її утворення уповільнюється. Багато металів менше, ніж через 5хв покриваються плівкою товщиною до 100 ангстрем ($100 \cdot 10^{-4}$ мкм), але при підвищенні температури цей час може скоротитись.

Оксидна плівка знаходиться у напруженому стані, сприймаючи

розтягнення або стиснення залежно від співвідношення питомих об'ємів основного металу і утворених на його основі оксидів. Зі збільшенням товщини плівки підвищуються сили пружності в самій плівці та на границі між плівкою і основним металом. При певній товщині плівки відбувається втрата стійкої форми рівноваги, настають миттєві зсуви, внаслідок чого і плівка стає пористою, рихлою.

Якщо плівка на м'якій підшаровій основі має високу твердість, то при терті вона швидко руйнується внаслідок своєї крихкості. Наприклад, співвідношення крихкості Al_2O_3 і Al дорівнює 2200:27 (80 разів), що дуже несприятливе для міцності плівки і може бути причиною підвищеного зношування деталей з алюмінієвих сплавів.

Велику міцність мають оксидні плівки, твердість яких наближається до твердості металу, наприклад, заліза, міді. При механічній дії на поверхню сплавів на основі заліза і міді плівка деформується разом з основою, що, при відносно невеликих навантаженнях, захищає її від руйнування.

Міцність оксидних плівок залежить також від співвідношення параметрів кристалічних ґраток плівки і металу. Чим більша різниця в параметрах, тим менша міцність зв'язку між плівкою і металом, а із збільшенням її товщини, міцність плівок зменшується.

Оксидний шар, що утворюється при механічному обробленні, має товщину $20 \cdot 10^{-4}$ мкм, на сталі 20, а на алюмінії – до $150 \cdot 10^{-4}$ мкм. На шарі оксидів утворюється ще й шар забруднень, що потрапили на поверхню з МОР, газів і пари, товщиною до $25 \cdot 10^{-4}$ мкм.

Через те, що на поверхні будь-якого твердого тіла практично завжди знаходяться різного походження плівки, склад і властивості яких залежать від зовнішніх умов, варто обережно відноситись до “універсальних” значень коефіцієнту тертя f в парах “сталь по сталі”, “бронза по чавуну” тощо, які наводяться в довідниках.

1.3.8 Площа контакту шорстких поверхонь

При контакті шорсткої поверхні з гладкою спочатку стикаються найбільш високі виступи поверхні, а по мірі їхнього зближення в контакт вступає всі більша кількість менш високих виступів. Зі збільшенням навантаження, що сприймається виступами, відбувається пружна деформація хвиль, на яких розташовані мікронерівності.

Якщо контактує менш тверда шорстка поверхня з більш твердою гладкою, то виступи шорсткої поверхні в процесі деформації розплющуються. Якщо ж гладка поверхня менш тверда, то виступи шорсткої поверхні впроваджуються в неї. Причому, розплющення і впровадження супроводжується пружним осаджуванням виступів.

Розглянемо більш докладно контактування двох тіл при статичному навантаженні. При контактуванні двох шорстких поверхонь першими вступають у контакт виступи, сума висот яких максимальна. По мірі збільшення навантаження в контакт вступають нові парі виступів, що мають меншу суму висот. Загальна площа контакту, що утворюється таким чином, складається з площ контакту окремих пар виступів сполучених поверхонь, визначає фактичну площу контакту твердих тіл. Площинки фактичного контакту, згруповані по вершинам деформованих хвиль в окремих зонах, утворюють контурну площу контакту (рис. 1.3).

Таким чином, розглядаючи контакт деталей, розрізняють номінальну площу контакту A_n , що відповідає номінальним розмірам сполучених поверхонь ($A_n = a + e$), фактичну (фізичну) площу контакту, що дорівнює сумі фактичних малих площадок сполучення A_f та контурну площу дотикання A_k , що являє собою суму площадок, обмежених контурами, у які вписані області з прилеглими площадками (обведено) фактичного контакту (рис. 1.3, б). Контурні площадки можуть бути виявлені при перевірці сполучень деталей “на фарбу” – це так звані

“плями торкання”, які ще називають фрикційними зв'язками.

Через те, що різні за висотою нерівності входять в контакт у різний час, то ступіні їх напруженості і деформації також будуть різними. Можливі такі випадки деформації нерівностей: пружна, пружно - пластична без зміцнення, пружно - пластична зі зміцненням. При початковому навантаженні контактуючих тіл суто *пружна* деформація шорсткостей можлива лише при контактуванні еластичних тіл, наприклад, гуми. Переважає вона і при контактуванні дуже гладких твердих металевих поверхонь.

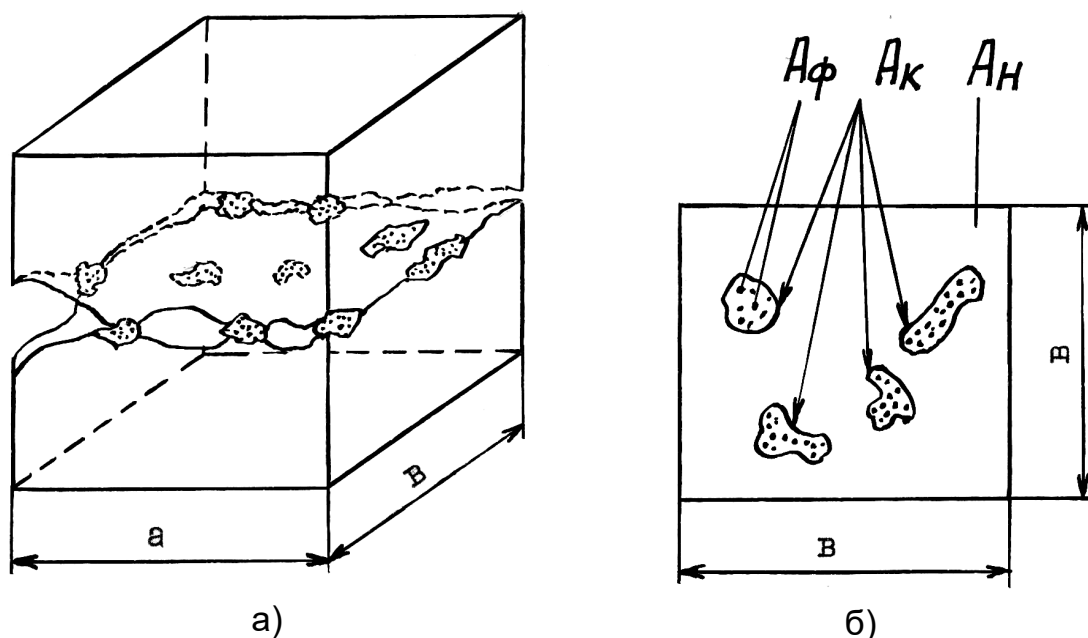


Рис. 1.3 Утворення площі контакту шорстких поверхонь: а – схема контактування тіл; б – утворення номінальної A_n , фактичної A_f та контурної A_k площ

У більшості випадків первинного навантаження провідна роль у деформуванні ділянок, прилеглих до фактичної площі дотикання, належить *пластичній деформації*. Виступи, що входять у контакт, пластично сплющуються, найчастіше з упровадженням більш твердого виступу, або виступу, геометрична форма якого додає йому більшого опору деформуванню. Фактична площа контакту складає десяті і соті частки відсотка від номінальної, а контурна - декілька відсотків. При

дотиканні двох різних матеріалів площа фактичного контакту визначається фізико-механічними властивостями більш м'якого і шорсткістю більш твердого з них.

Уявимо контактування під певним навантаженням гладких поверхонь двох тіл, з яких одне має полікристалічну структуру, а поверхня іншого однорідна. Внаслідок неоднорідності деформування різних ділянок полікристалічного тіла на його поверхні виникають шорсткості.

Отже, коли поверхня з гетерогенною структурою була б навіть ідеально гладкою, вона, як і сполучена з нею буває під дією навантаження певної шорсткості. Внаслідок неоднорідності різних структурних складових конструкційного матеріалу за твердістю, а також різного орієнтування кристалічних зерен (на поверхні), на окремих ділянках фактичного контакту, починаючи з малих навантажень, відбувається взаємне впровадження більш твердих структурних складових у менш тверді.

1.3.9 Аналіз причин втрати роботоздатності елементами технічної системи

Суб'єктивні фактори, що пов'язані з діями організаційними, оператора, ремонтника.

Джерела енергії, що пов'язані з робочими процесами у системі, зокрема у вигляді механічних статичних чи динамічних навантажень на елементи конструкції, термічних навантажень, хімічної взаємодії, діяльності біологічних чинників, дії електромагнітного опромінення.

Потенціальна енергія, що накопичується в елементах системи у вигляді напружень під час технологічної ібо технічної експлуатації, виготовлення виробів.

Процеси, що супроводжують представлені чинники можна класифікувати як:

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

- оборотні, які тимчасово змінюють параметри надійності без тенденції прогресивного погіршення та з можливістю їх відновлення (пружна деформація);

- необоротні призводять до прогресивного погіршення параметрів надійності із часом: зношування, корозія, втома, перерозподіл внутрішніх напруг, старіння;

- швидкодійні, що мають періодичність зміни в межах часток секунд та завершуються протягом одного циклу роботи машини: вібрації вузлів, імпульси навантажень, зміна сил тертя, які впливають на взаємне розташування вузлів машини;

- процеси середньої швидкості, що мають періодичність у хвилинах та годинах, призводять до монотонної зміни початкових параметрів машини: зміна температури машини, зміна вологості середовища, спрацювання інструмента;

- повільні процеси, що мають періодичність у днях та місяцях, проходять за час роботи машини між оглядами та ремонтами: спрацювання основних механізмів машини, перерозподіл внутрішніх напруг у деталях, повзучість металів, забруднення поверхонь тертя, корозія.

1.4 Відмови технічних систем

1.4.1 Характеристика відмов

Відмова – це подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати основні функції технічної системи, тобто у порушенні працездатного стану.

Відмови у відповідності з фізичною природою їх виникнення зв'язані з руйнуванням деталей або їх поверхонь (поломка, зношення, корозія), втратою елементами виробів певних властивостей або параметрів (теплопровідності в теплових апаратах, електричного опору

або електропровідності, магнітних властивостей та ін.) і викликаються різними процесами, що відбуваються в обладнанні під час експлуатації або збереження.

За швидкістю проходження процеси, які призводять до відмов виробів, поділяють на швидкобіжні, середньої швидкості і повільні.

Швидкобіжні процеси мають періодичність, що вимірюється долями секунди. Вони діють в межах циклу роботи технічного об'єкта (його елемента) і, при наступних циклах, виникають знову. До них відноситься вібрація вузлів, зміна навантаження і сил тертя в залежності від взаємного розташування деталей та вузлів машини чи апарата під час роботи.

Процеси середньої швидкості зв'язані з періодом безперервної роботи виробу (елемента). Їх тривалість вимірюється хвилинами, годинами. Вони приводять до поступової зміни параметрів або властивостей виробу. До цієї категорії відносяться оборотні процеси (нагрівання в період пуску і охолодження при зупинці) і необоротні (зношування інструменту, наприклад, ножів м'ясоподрібнюючих вовків чи ірисозаготувальних автоматів).

Повільні процеси проходять під час роботи виробу між періодичними оглядами або ремонтами за період повного зносу. Їх тривалість оцінюється днями, місяцями, роками. До таких процесів відносяться: зношування основних механізмів виробу, перерозподіл внутрішніх напружень, повзучість металів, корозія, сезонні зміни температури (зима, літо), старіння. Ці процеси також впливають на технічні параметри виробів, але приводять до дуже повільної їх зміни. Проявлення дії повільних процесів упереджують за рахунок ремонтів і профілактичних заходів, які виконуються через певні проміжки часу.

За впливом на стан виробу відмови діляться на функціональні і параметричні. Наприклад, для насоса відмови, що викликають його

зупинку, відносяться до *функціональних*, а зменшення продуктивності або тиску нижче граничного рівня — до *параметричних*. За наявності параметричних відмов технічний об'єкт може працювати з відхиленням від технічних вимог.

Процеси, що відбуваються в об'єктах при експлуатації і збереженні та їх відмови знаходяться в причинно-наслідковому зв'язку. Причини відмов носять систематичний і випадковий характер.

Причини *випадкового* характеру: непередбачені перевантаження, дефекти матеріалів або похибки виготовлення елементів об'єкта, не виявлені контролем, збої системи управління або помилки експлуатуючого персоналу.

Причини *систематичного* характеру проявляються від дії факторів з закономірними наслідками: зношування деталей, корозія і налипання поверхонь теплопровідних елементів апаратів, затуплення лез різальних інструментів, забруднення фільтрів тощо. Систематичні причини відмов краще піддаються прогнозуванню.

У відповідності з характером розвитку процесів і їх проявленням відмови можуть бути: *раптовими*, наприклад, поломки деталей і заїдання пар тертя від перевантаження або через відсутність змащування; *поступовими за розвитком і раптовими за проявленням*, наприклад, руйнування деталей або конструкцій від втоми матеріалу, коротке замикання внаслідок старіння ізоляції, *поступовими* (зношення, корозія, налипання, забруднення фільтрів, затуплення різальних інструментів та ін.).

В залежності від складності наслідків відмови можуть усуватись при технічному обслуговуванні, при середньому або капітальному ремонті. В залежності від місця усунення їх поділяють на відмови, що усуваються в експлуатаційних умовах і відмови, що усуваються в умовах спеціалізованих ремонтних підприємств. Але є відмови, проявлення яких

усуваються в експлуатаційних умовах (заміною несправних елементів справними), а наслідки — в спеціалізованих умовах (ремонт елементів, що вийшли з ладу). Така система усунення відмов вимагає наявності обмінного фонду швидкозношуваних елементів. Можна привести приклади відмов, які самоусовуються. Вони характерні для автоматичних саморегульованих систем.

В експлуатації майже всіх виробів виділяють 3 періоди, що характеризуються різною інтенсивністю відмов (рис. 1.4): 1 – період припрацювання елементів виробу; 2 – період нормальної експлуатації; 3 – період інтенсивного зношування.

У кожному з цих періодів переважаючи відмови мають свої особливості. В першому періоді експлуатації виникають відмови припрацювання, зв'язані з тим, що не всі елементи виробу припрацювались, або з проявленням дефектів, що не були виявлені при його виготовленні. В третьому періоді відбуваються зносіві відмови, зумовлені тим, що стан основних функціональних елементів досягає граничного рівня і створюються умови для інтенсивної генерації відмов. Відмови 2-го періоду називають відмовами періоду нормальної експлуатації. Вони зумовлені несприятливим сполученням різних причин, у тому числі частковим зносом елементів, серед яких немає таких, які б виділились у переважаючі.

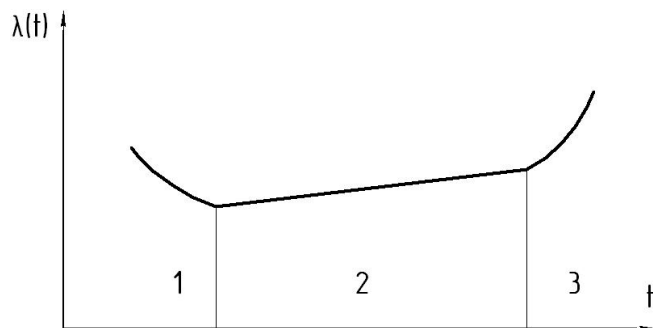


Рис. 1.4 Характерні періоди експлуатації технічного об'єкта

В експлуатації технічних об'єктів наслідки відмов супроводжуються прямими і побічними затратами. Прямі затрати пов'язані безпосередньо з відновленням працездатності виробу. Побічні втрати зумовлені вимушеним простоюванням обладнання, псуванням сировини та продукції, іноді людськими жертвами. На підприємствах харчових і переробних виробництв побічні втрати часто набагато перевищують прямі затрати.

Стандартом передбачено 22 різновиди відмов, які об'єднують у 7 груп за такими ознаками: впливом на працездатність; джерелом виникнення; зв'язком з відмовами інших елементів; характером (закономірністю) виникнення і можливістю прогнозування; частотою виникнення (напрацюванням); трудомісткістю усунення; впливом на втрати робочого часу на лінії.

За впливом на працездатність об'єкта – це наступні відмови: часткова відмова, яка приводить об'єкт до неспроможності його виконувати частину потрібних функцій; повна відмова, яка приводить до повної неспроможності технічного об'єкта виконувати будь-яку із потрібних функцій; ресурсна відмова, внаслідок якої об'єкт досягає граничного стану; критична відмова, яка може привести до травмування людей, значних матеріальних збитків чи інших неприйнятих наслідків.

За джерелом виникнення відмови поділяються так: конструктивні, що виникають внаслідок недосконалості конструкції; виробничі – внаслідок порушення або недосконалості технологічного процесу виготовлення чи ремонту; експлуатаційні – внаслідок порушення діючих правил експлуатації (перевантаження обладнання чи машин, застосування невідповідних палив, змащувальних матеріалів, несвоєчасне проведення ТО і Р). На цю групу експлуатаційних відмов технічних об'єктів харчової і переробної промисловості припадає близько 50% усіх відмов за джерелом виникнення.

За зв'язками з відмовами інших елементів: залежні, спричинені безпосередньо чи не безпосередньо відмовою іншого елемента технічної системи; незалежні, які не спричинені безпосередньо чи не безпосередньо відмовою чи несправністю іншого елемента.

За характером виникнення і можливістю прогнозування: через перевантаження, спричинені дією навантажень, які перевищують допустимі межі; через неправильне поводження з об'єктом; через неміцність складових елементів об'єкта; спричинені процесами деградації (старіння); раптові, які неможливо передбачити попереднім оглядом чи діагностуванням; поступові, спричинені поступовою зміною значень технічних параметрів об'єкта, настання яких можна прогнозувати; повторювана відмова як самоусувна відмова одного і того ж характеру, що виникає багатократно.

За трудомісткістю усунення відмови технічних об'єктів поділяють на 3 категорії складності:

1 категорія – це ті, які не потребують для їх усунення значного часу та спеціальних інструментів, пристроїв;

2 категорія – ті, які потребують для усунення відчутного проміжку часу, інструментів та пристроїв;

3 категорія – ті, які потребують для їх усунення значних затрат часу, інструментів та пристроїв і їх усунення здійснюється у стаціонарних умовах ремонтних майстерень.

Відмови **за впливом на втрати робочого часу** об'єкта поділяються на такі, що: усуваються без втрат робочого часу; усуваються з втратами робочого часу.

1.4.2 Аналіз типових відмов

1.4.2.1 Поступові (зношувальні) та несподівані відмови

Основною ознакою, яка визначає різні види відмов, є характер

виникнення та проходження процесів, що призводять до них.

Розрізняють такі основні види відмов (рис.1.5).

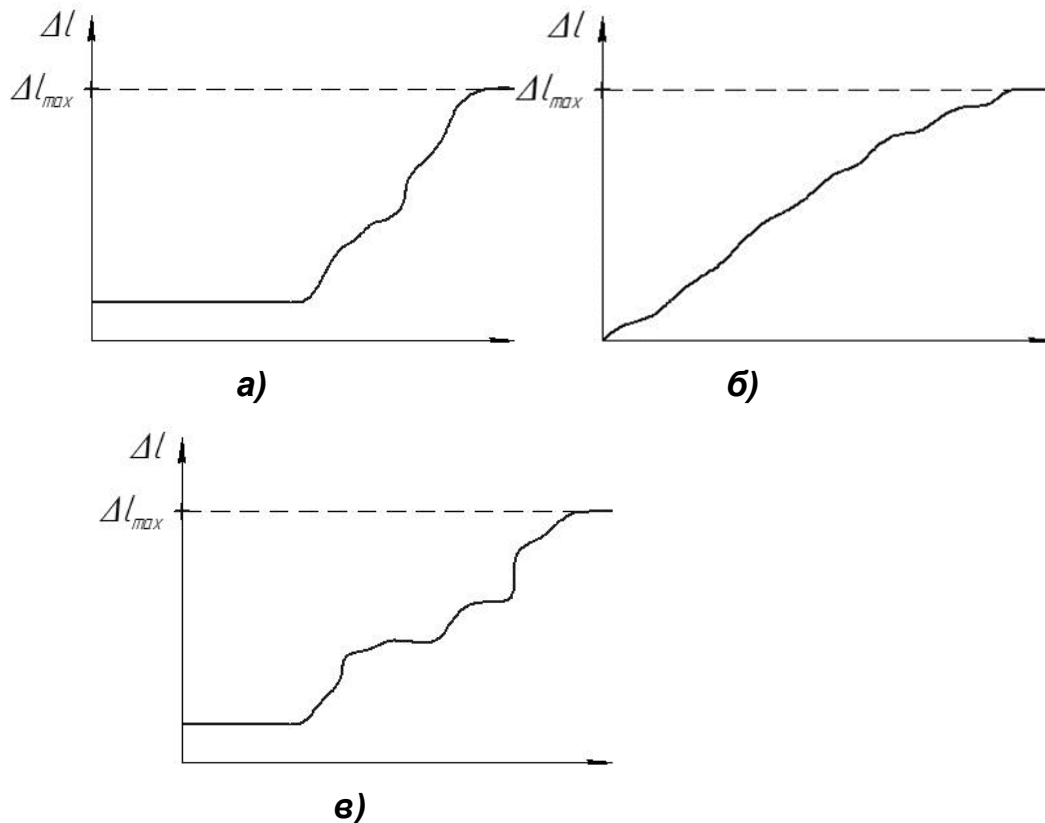


**Рис. 1.5 Основні види відмов: а – поступові (зношувальні),
б – раптові, в – складні**

Поступові (зношувальні) відмови виникають (рис.1.5,а) внаслідок процесів старіння, що погіршують початкові параметри виробу.

Основною ознакою поступової відмови є те, що імовірність її виникнення $F(t)$ протягом заданого періоду від t_1 до t_2 залежить від тривалості попередньої роботи виробу t_1 . Чим більше експлуатувався виріб, тим вищою є імовірність виникнення відмови, тобто $F_2(\Delta t) > F_1(\Delta t)$ якщо $t_2 > t_1$, де $F(\Delta t)$ – імовірність відмови за період від t до $(t + \Delta t)$.

До цього виду належать більшість відмов машин. Вони пов'язані з зношуванням, корозією, втомою та повзучістю матеріалів.

Раптові відмови (рис.1.5,б) виникають внаслідок поєднання несприятливих чинників та випадкових зовнішніх впливів, що

перевищують можливості сприйняття виробу.

Раптова відмова виникає через деякий проміжок часу T_B , що є випадковою величиною. Основною ознакою раптової відмови є незалежність імовірності її виникнення $F(t)$ протягом заданого періоду з t_1 до t_2 від тривалості попередньої роботи виробу t_1 . Прикладами таких відмов можуть бути теплові тріщини, що виникають в деталі внаслідок неподання мастила.

Початок будь-якої відмови залежить від швидкості накопичення пошкоджень $\gamma = \frac{dU}{dt}$, де U - ступінь пошкодження, та від часу початку його виникнення (рис.1.5).

Для поступової відмови $T_B=0$, тобто під час експлуатації виробу процес накопичення пошкоджень починається одразу, навіть коли він спочатку практично не проявляється, а його швидкість є функцією часу $\gamma=\gamma(t)$.

Для раптової відмови час виникнення T_B є випадковою величиною і підлягає деякому закону розподілу $f(T_B)$, незалежному від стану виробу. Процес відбувається досить швидко ($\gamma \rightarrow \infty$) і тому функція $f(T_B)$ визначає імовірність безвідмовної роботи.

Можливий і третій вид відмов, що поєднує особливості двох попередніх (рис. 1.5, в), і називається *складною відмовою*. Тут час виникнення відмови - випадкова величина, що не залежить від стану виробу, а швидкість процесу втрати працездатності виробу $\gamma=\gamma(t)$ залежить від його здатності чинити опір процесу накопичення пошкоджень.

1.4.2.2 Відмови функціонування та параметричні відмови, фактичні та потенційні відмови

Наслідки відмов дуже різноманітні. За наслідками відмови можна поділити на відмови функціонування та параметричні.

Відмова функціонування призводить до того, що виріб не може виконувати своїх функцій. Наприклад, внаслідок відмови редуктор не обертається і не передає рух, двигун внутрішнього згоряння не запускається, помпа не подає мастила тощо. Часто відмова функціонування пов'язана із руйнуванням або заклинюванням окремих елементів виробу.

Параметрична відмова призводить до виходу параметрів (характеристик) виробу за допустимі межі. Такі відмови, як порушення точності оброблювання на верстаті, зменшення ККД передачі, зменшення максимальної швидкості автомобіля нижче від норми та інші не обмежують можливість подальшого функціонування виробу. Однак він стає непрацездатним через недотримання вимог, встановлених технічними нормативами.

У складних машинах та системах параметричні відмови елементів можуть спричинити відмови функціонування. Наприклад, у багатоланковому механізмі, остання ланка якого здійснює недостатнє переміщення, внаслідок зношення кінематичних пар. Наявність зазорів може призвести до того, що ведена ланка взагалі не буде рухатися.

Якщо цим відмовам запобігають завчасним виконанням ремонту та регулюванням, то критерієм появи відмови є ступінь пошкодження виробу, а сама відмова сприймається як потенційно можлива подія. Такі відмови будемо називати *потенційними*.

1.4.2.3 Допустимі та недопустимі відмови

Допустимі відмови пов'язані із процесами старіння, що призводять до поступового погіршення вихідних параметрів виробу. До них зараховують раптові відмови, які викликані несприятливим поєднанням чинників, коли останні знаходяться в межах, що подані в ТУ на експлуатацію. Інколи конструктор свідомо допускає деяку (як правило,

невелику) імовірність виникнення відмови, щоб полегшити та здешевити конструкцію. Це, звичайно, допустимо тільки якщо відмова не спричинить катастрофічних наслідків. Наприклад, навіть в конструкціях літаків дозволяється розвиток втомних тріщин в деяких елементах і панелях крил.

Недопустимі відмови пов'язані із порушенням таких умов виробництва та експлуатації:

- технічних умов під час виготовлення та збирання виробів;
- правил і умов експлуатації та ремонту - перевищення режимів роботи машини над допустимими, порушення правил ремонту, помилки людей, що керують машиною тощо
- приховані причини, не уточнені в технічних умовах і нормативах параметри.

1.4.2.4 Допустима імовірність безвідмовної роботи як міра для оцінки наслідків відмови

Усі особливості відмови та її наслідків достатньо охарактеризувати допустимою імовірністю безвідмовної роботи, яка акумулює і чисельно оцінює небезпеку наслідків відмови. Так, якщо відмова існує нетривалий час, робота самовідновлюється, і за цей час не виникнуть необоротні порушення роботи машини, то буде допущена нижча імовірність безвідмовної роботи, ніж при "повній" відмові і небезпечніших наслідках. Під час оцінки надійності виробів не тільки машина в цілому, але й окремі її вузли та деталі повинні характеризуватися допустимою імовірністю безвідмовної роботи. До різних машин та виробів застосовують категорії відмов, що відображають їх специфіку і оцінюють небезпеку відмови.

Для кожної категорії встановлюють своє значення допустимої імовірності безвідмовної роботи $P(t)$.

Для виявлення небезпечних категорій відмов та їх врахування в деяких випадках застосовують певні методи їх аналізу і врахування відмов. Особливо важливою є оцінка параметричних відмов, оскільки тут можливий широкий діапазон наслідків - від незначного впливу відмови на працездатність виробу до катастрофічних наслідків.

1.4.3. Фізика відмов

1.4.3.1 Аналіз закономірностей, що описують зміни в матеріалах

Зміна початкових властивостей та стану матеріалу, із якого зроблено виріб, є першопричиною втрати ним працездатності, оскільки ці зміни можуть призвести до пошкоджень виробу і до небезпеки виникнення відмови.

Тому сучасна наука вивчає закономірності зміни властивостей і стану матеріалів на таких рівнях [6]:

Субмакроскопічний рівень, коли на основі аналізу будови атомів і молекул і утворених із них кристалічних ґраток твердих тіл або інших структур виявляються закономірності, які є базою для пояснення властивостей і поведінки матеріалів в різних умовах.

Макроскопічний рівень розглядає зміну початкових властивостей або стану матеріалу всього тіла (деталі). Так, теорія пружності на основі закону Гука вивчає деформації та напруження в системах і деталях різної конфігурації, що працюють на розтягування, кручення, згинання тощо.

Мікроскопічний рівень розгляду властивостей матеріалів полягає в аналізі процесів, що відбуваються в невеликих об'ємах. Одержані при цьому закономірності надалі поширюються на весь об'єм тіла.

1.4.3.2 Закони стану і старіння

Як фізичні закони, так і одержані на їх основі часткові залежності,

що описують зміну властивостей і стану матеріалів, можна поділити на дві основні групи (рис.1.6).

По-перше, це закономірності, що описують взаємозв'язок оборотних процесів, коли після припинення дії зовнішніх чинників матеріал (і, відповідно, деталь) повертається у вихідний стан. Ці залежності будемо називати *законами СТАНУ*.

По-друге, існують закономірності, що описують необоротні процеси і, відповідно, дають змогу оцінити ті зміни початкових властивостей матеріалів, які відбуваються або можуть відбуватися під час експлуатації виробу. Ці залежності будемо називати *законами СТАРІННЯ*.

Розглянемо, як різні закономірності можуть бути використані для оцінки втрати виробом працездатності. *Закони стану* можна розділити на статичні, коли до функціональної залежності, що описує зв'язок між вхідними і вихідними параметрами, чинник часу не входить, і на перехідні, де враховується зміна вихідних параметрів у часі.

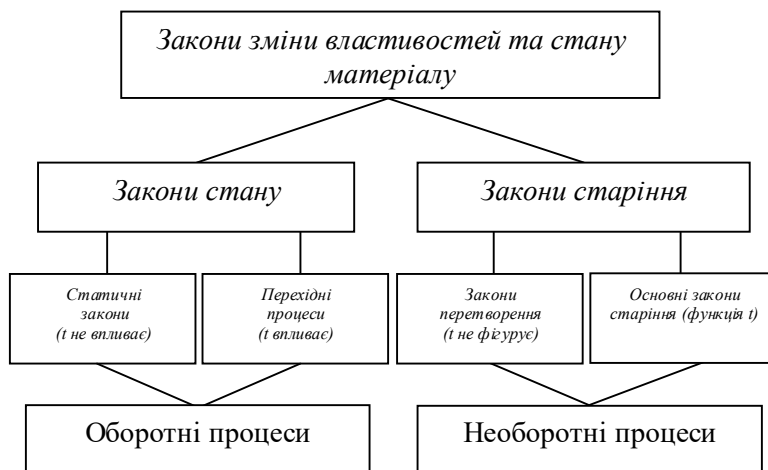


Рис. 1.6 Класифікація закономірностей, що оцінюють зміни властивостей і стану матеріалів

Основне значення для оцінки втрати виробом працездатності має вплив законів старіння, які розкривають фізичну суть необоротних змін, що відбуваються у матеріалах. Хоч закони старіння завжди пов'язані із чинником часу, в деяких із них час безпосередньо не фігурує, оскільки в

одержаних залежностях встановлюється зв'язок із іншими чинниками (наприклад, енергією), які, в свою чергу, проявляються у часі. Такі залежності будемо називати *законами перетворення* (див.рис.1.3).

На вихідні параметри впливають всі відомі процеси старіння, що характеризуються такими основними видами їх взаємодії.

1. Процеси, що відбуваються одночасно, не впливають один на одного і викликають зміну вихідних параметрів теж незалежно один від одного. Наприклад, пошкодження поверхні тертя через потрапляння абразиву і через дефекти литва (рис.1.7).

2. Процеси, що відбуваються одночасно, не впливають один на одного, але їх дія на вихідний параметр сумується. Наприклад, температурна і силова деформації системи додаються, якщо вони не супроводжуються необоротними явищами (наприклад, пластичною деформацією).

3. Процеси, що відбуваються одночасно, і утворюють новий складний процес (найхарактерніший).

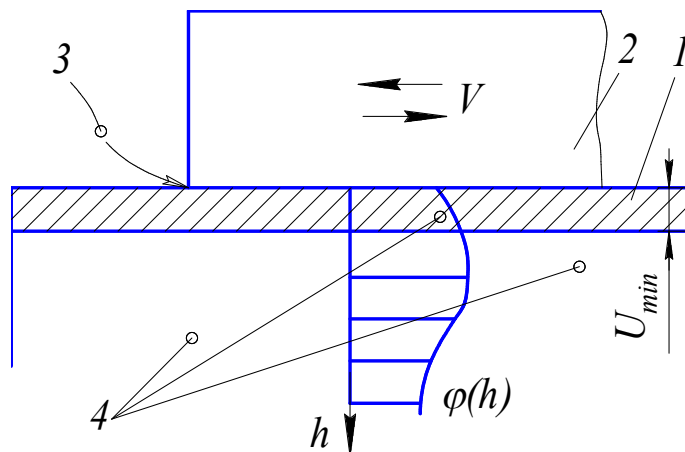


Рис. 1.7 Виникнення подряпин на поверхнях 1 і 2, що труться: через потрапляння абразиву 3 або через прояв дефектів литва 4

Типовим прикладом може бути корозійно-втомне руйнування металів і сплавів, коли результат не є простим додаванням корозії і механічного руйнування, а є складнішим фізико-хімічним процесом,

інтенсивність якого вища від суми інтенсивностей обумовлених дією кожного чинника окремо.

1.4.3.3 Явища, які виникають в поверхневих шарах під час руйнування і старіння матеріалів

Будова поверхневого шару твердих тіл і ті явища, що в ньому відбуваються, відіграють особливу роль у протіканні більшості процесів старіння та руйнування матеріалів. Стан поверхневого шару впливає на процеси, що виникають під час взаємодії із іншим тілом або із середовищем, наприклад, при зношуванні, контактній деформації, втомі, корозії тощо. Окрім того, багато видів руйнувань всього тіла деталі починаються із поверхні і залежать від її стану.

Особливий вплив поверхневого шару матеріалу на працездатність пов'язаний із такими причинами.

По-перше, поверхневі шари твердого тіла мають надлишок енергії, оскільки між молекулами і атомами, що знаходяться на поверхні, виникають вільні зв'язки, що сприяють виникненню таких явищ, як поглинання (адсорбція), зчеплення (когезія), прилипання (адгезія), змочування та інших видів взаємодії із речовинами довкілля, коли поверхневий шар набуває своєї будови.

По-друге, поверхневий шар формується внаслідок різних технологічних процесів, які не тільки утворюють необхідну форму поверхні і модифікують властивості матеріалу, але й викликають низку побічних явищ, що змінюють властивості твердого тіла біля його поверхні. Фізико-хімічні параметри поверхневого шару, його структура та напружений стан, як правило, значно відрізняються від властивостей всього об'єму матеріалу.

По-третє, під час експлуатації безперервно змінюються (трансформуються) параметри поверхневого шару, значно більшою

мірою, ніж параметри всього тіла.

Тому більшість відмов машин пов'язана із процесами, що відбуваються у поверхневих шарах, і їх природу не можна пояснити без аналізу тих змін, яких зазнають характеристики поверхневого шару під час експлуатації виробів.

Параметри поверхневого шару повинні характеризувати:

- геометрію поверхневого шару, зокрема мікрогеометрію та окремі дефекти поверхні;
- напруження, що виникають у поверхневих шарах як на ділянках поверхні, так і в мікрооб'ємах;
- структуру поверхневого шару як наслідок пластичної деформації, окислювальних процесів, температурних та інших впливів;
- структуру прилеглих до поверхні адсорбованих тонких шарів змащення із врахуванням орієнтованих молекул поверхнево-активних речовин.

Макрогеометрія поверхні, тобто характеристика її форми - овальність, огранювання, конусність для циліндричних поверхонь, випуклість або увігнутість площини тощо - є важливим чинником, що впливає на працездатність деталей. Для різних поверхонь певні відхилення форми допускаються відповідними стандартами. Мікрогеометрія, яка має не менше значення для оцінки властивостей поверхневого шару, характеризується шорсткістю (висотою нерівностей R_z або середнім арифметичним відхиленням профілю від середньої лінії R_a та багатьма іншими параметрами згідно з ГОСТом 2789-73) та хвилястістю (сукупність повторюваних виступів і впадин з кроком, що перевищує базову довжину, прийняту стандартом для визначення параметрів шорсткості).

На працездатність виробу впливають не тільки основні характеристики хвилястості (рис.1.8, б) (висота хвилі H та її крок L) і шорсткості (R_z , R_a , середній крок S і максимальна висота нерівностей

$R_{\max}$), але й форма мікронерівностей, їх напрям, форма хвилястості та інші характеристики мікрорельєфу.

Для оцінки шорсткості поверхні часто застосовують інтегральну характеристику – криву опорної поверхні (рис.1.8, в) і окремі показники, що оцінюють форму мікрорельєфу.

Для оцінки шорсткості часто застосовують інтегральну характеристику – криву опорної поверхні (рис. 1.8, в) і окремі показники, що оцінюють форму мікрорельєфу.

Напружений стан поверхневого шару має свою специфіку не тільки через те, що під час основних видів деформації, таких як згинання та кручення, максимальні напруження, що визначають міцність деталі, виникають на поверхні, але і через вплив певних чинників.

По-перше, під час контакту поверхонь виникають місцеві напруження, які при пружному дотику по лінії або в точці визначають за формулами Герца. При дотику по поверхні аналогічні явища спостерігаються під час контакту мікронерівностей.

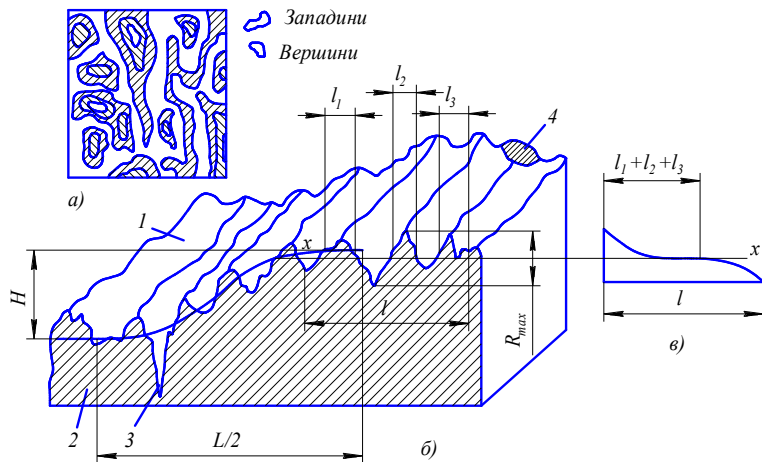


Рис. 1.8 Мікрорельєф поверхні:

а - топографія поверхні;

б - параметри поверхневого шару;

1 - повздовжня шорсткість; 2 - поперечна шорсткість;

3 - тріщина; 4 - скол; x-x – довільний переріз; в - крива опорної поверхні

По-друге, біля поверхні деталі виникають місцеві концентрації напружень, пов'язані із різкими змінами її форми.

Концентраторами напружень можуть бути не тільки конструктивні елементи (галтелі, отвори, канавки), але і мікрориски, тріщини, впадини мікронерівностей. Концентрація напружень часто є причиною початку втомного руйнування.

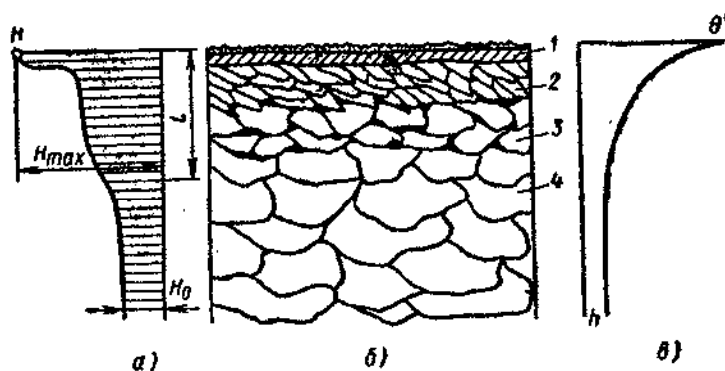


Рис. 1.9 Будова поверхневого шару:

а - зміна твердості H по глибині шару;

б - структура поверхневого шару;

в - зміна температури по глибині під час різання та тертя

Нарешті, специфічною особливістю поверхневого шару є виникнення внутрішніх залишкових напружень. В цілому поверхневий шар сплаву складається із таких ділянок (рис.1.9):

1-й шар підвищеної твердості, що містить окисні плівки, до яких прилягає аморфний адсорбований шар із плівок води, газів та забруднень;

2-й наклепаний шар із сильно деформованою кристалічною ґраткою, характеризується певною орієнтацією (текстурою) зерен, що виникла під впливом тангенціальних сил різання або тертя;

3-й наклепаний шар із спотвореною кристалічною ґраткою; має

збільшену кількість дислокацій та вакансій;

4-й шар - метал із вихідною структурою.

1.4.3.4 Класифікація процесів накопичення пошкоджень

В табл. 1.2 приведена класифікація процесів накопичення пошкоджень, які протікають в об'ємі матеріалу деталі та в його поверхневому шарі. Необхідно відмітити, що накопичення пошкоджень в матеріалі поверхневого шару приводить до зміни його механічних та геометричних характеристик.

Руйнування матеріалу деталі належить, як правило, до недопустимих видів пошкоджень. Це пов'язано з тим, що поломка деталей внаслідок руйнування часто має лавиноподібний характер і велику швидкість. Тому розрахунки, пов'язані із міцністю, оцінюють не швидкість руйнування, а ті умови, за яких воно не виникає.

Таблиця 1.2

Класифікація процесів накопичення пошкоджень

Об'єкт		Зовнішній прояв процесу (вид пошкодження)	Різновиди процесу
Тіло деталі (об'ємні явища)		Руйнування	Крихке руйнування, в'язке руйнування
		Деформація	Пластична деформація, повзучість, короблення
		Зміна властивостей матеріалу	Зміна: структури матеріалу, механічних властивостей (пластичність), хімічного складу, магнітних властивостей, газопроникності, забруднення рідин (мастила, палива).
Поверхня деталі (поверхневі явища)	Деталі	Роз'їдання	Корозія, ерозія, кавітація, прогар, тріщиноутворення
		Наріст	Налипання (адгезія, когезія, адсорбція, дифузія), нагар, облітерація (зарощення)

		Зміна властивостей поверхневого шару	Зміна: шорсткості, твердості, відбивної здатності, пружного стану
	Пари деталей	Зношування	Зношування (стирання), втома поверхневих шарів, зминання, перенесення матеріалу
		Зміна умов контактування	Зміна: площі контакту, глибини заглиблення мікровиступів, суцільного змащення

Розглянемо детально втоми руйнування матеріалу. Воно складається з трьох послідовних стадій.

1. Початкова стадія дії циклічних напружень, коли в металі нагромаджуються пружні спотворення кристалічної ґратки.

2. Після певної кількості циклів навантажень пружні напруження кристалічної ґратки досягають критичного значення і виникають субмікроскопічні тріщини.

3. Потім субмікроскопічні тріщини розвиваються в розмірі до мікротріщин і досліджуваний зразок остаточно руйнується. Узагальнена діаграма втоми, запропонована В.С. Івановою, наведена на рис.1.10, де ABC - крива витривалості (крива Велера). Якщо напруження, нижчі від тривалої межі витривалості σ_w мікротріщини не розвиваються. A'B'C' - лінія початку появи субмікроскопічних тріщин і A'C - лінія початку утворення мікротріщин, або лінія необоротної пошкодженості (лінія Френча). Якщо напруження втоми критичне $\sigma_k > \sigma_w$, руйнування відбувається через N_k циклів (критична кількість циклів).

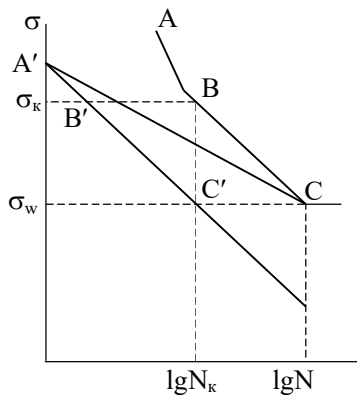


Рис. 1.10 Узагальнена діаграма втоми (за В.С. Івановою)

Під час взаємодії поверхні деталі із довкіллям у поверхневому шарі можуть відбуватися різноманітні процеси, для яких є характерними будь-які втрати вихідного матеріалу або приєднання нового матеріалу із середовища.

У першому випадку буде відбуватися роз'їдання поверхні (рис.1.11) внаслідок корозії або інших явищ.

Корозія металів і сплавів, тобто руйнування внаслідок хімічної або електрохімічної дії середовища, завжди починається із поверхні деталі.



Рис. 1.11 Приклади роз'їдання поверхонь:

а – щілинна корозія циліндра дизелів, яка виникає під гумовим ущільнювальним манжетом; б – ділянка корпусу паливофільтрувальної центрифуги з інтенсивним ерозійним зношуванням; в – кавітація золотника плунжерного керосинового насоса; г – прогоряння автомобільного глушника

Деякі поверхні деталей машин, що взаємодіють із оточенням, зазнають таких змін, внаслідок яких приєднується (наростає) матеріал, і поверхня змінює свою форму та властивості.

Налипання на поверхню сторонніх частинок відбувається внаслідок

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

адгезії, когезії, адсорбції, дифузії, внаслідок молекулярних взаємодій, прояву різних хімічних зв'язків та дії сил електричного походження. Типовим прикладом інтенсивних адгезійних процесів є наростоутворення на різальних поверхнях інструментів під час оброблювання металів.

Найхарактерніші для машин процеси накопичення пошкоджень виникають під час контакту поверхонь, особливо під час відносного переміщення. У цьому випадку, як правило відбувається зношування поверхонь.

Зношування (зношення) - це результат поступової зміни розмірів деталі до і під час тертя. Коли йдеться про руйнування поверхні, то застосовують термін „зношування”.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Назвіть головні завдання, які вирішує наука про надійність технічних об'єктів.
2. Охарактеризуйте зв'язок надійності і довговічності з працездатністю виробів.
3. Назвіть основні чинники, що впливають на надійність технічних об'єктів.
4. Які властивості і показники надійності стандартизовані?
5. Чим відрізняються одиничні і комплексні показники надійності?
6. Дайте визначення основним параметрам надійності.
7. Охарактеризуйте різновиди технічних станів технологічної системи.
8. Якими показниками характеризується довговічність елементів технічних систем?
9. Якими показниками характеризується безвідмовність елементів технічних систем?
10. Якими показниками характеризується ремонтпридатність елементів технічних систем?
11. Якими показниками характеризується збереженість елементів технічних систем?
12. Якими показниками характеризується готовність елементів технічних систем?

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

13. Дайте оцінку граничним станам елементів технічної системи.
14. Назвіть основні причини втрати технічною системою роботоздатності.
15. Дайте характеристику несправностям та відмовам.
16. Які ви знаєте типові відмови елементів технічних систем?
17. Які ви знаєте класи або групи відмов?
18. Який механізм настання відмови технічної системи?
19. Назвіть основні структурні елементи технічної системи.
20. Дайте поняття надійності технологічного обладнання.
21. У чому істотна різниця між довговічністю та безвідмовністю?
22. Що характеризує такий параметр надійності як готовність?
23. Дайте характеристику поступовим та несподіваним відмовам.
24. Дайте характеристику функціональним та параметричним відмовам.
25. Зробіть аналіз допустимих та недопустимих пошкоджень елементів технічної системи.
26. Дайте характеристику процесам стану при деградації технічних систем.
26. Дайте характеристику процесам старіння при деградації технічних систем.
27. Які основні процеси відбуваються у поверхневому шарі деталей при деградації елементів системи?
28. Які ви знаєте процеси накопичення пошкоджень?
29. Як характеризуються за швидкістю проходження процеси, які призводять до відмов виробів?
30. Як класифікуються відмови по впливу та стану технічного об'єкта?
31. У чому різниця між відмовами систематичними і випадковими?
32. Які визначальні періоди в експлуатації виробів за характером розвитку процесів їх проявлення та складністю наслідків?
33. Якими показниками можна охарактеризувати збережуваність технічного об'єкта?
34. Які прямі і побічні втрати від наслідків відмов, характерні для харчових і переробних підприємств?

Розділ 2 ОСНОВНІ ФАКТОРИ ЗНИЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Процеси зношування та руйнування

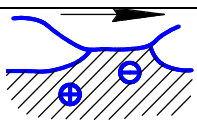
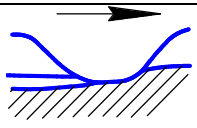
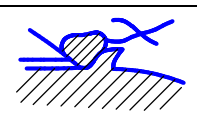
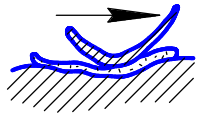
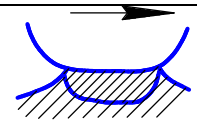
2.1.1 Зношування як наслідок взаємодії твердих тіл під час тертя

Зношування, що виникає внаслідок тертя спряжених поверхонь, є найхарактернішим видом пошкодження більшості машин та їх механізмів.

Зношування - це поступова зміна розмірів тіла внаслідок тертя, що проявляється у відокремленні із поверхні тертя матеріалу та (або) його залишкової деформації.

Таблиця 2.1

Види фрикційних зв'язків (за І.В. Крагельським)

Вид	Схема	Характер деформування	Кількість циклів до руйнування	Умова здійснення
I		Пружне відтиснення матеріалу	$n \geq n_{кр}$	$h/R < 0.01$ (а) $h/R < 0.001$ (б)
II		Пластичне відтиснення матеріалу	$1 < n \leq n_{кр}$	$h/R < 0.1$ (в) $h/R < 0.3$ (г)
III		Мікро різання матеріалу	$n = 1$	$h/R < 0.1$ (в) $h/R < 0.3$ (г)
IV		Руйнування плівок	$n \geq n_{кр}$	$\frac{d\tau}{dh} > 0$
V		Руйнування основного матеріалу	$n = 1$	$\frac{d\tau}{dh} < 0$

Вихідними положеннями теорії зношування є дискретний дотик

шорстких тіл і, як наслідок цього, порушення окремих фрикційних зв'язків. Ці уявлення, розвинені Крагельським, дають змогу пов'язати зношування поверхні з процесами у деформованому мікрооб'ємі матеріалу, напружений стан якого залежить від навантаження, виду тертя, геометричного обрису мікронерівностей та фізичних властивостей матеріалу.

Зношування пов'язане із багаторазовим порушенням фрикційних зв'язків (див. табл. 2.1) Отже, I-III види фрикційних зв'язків виникають внаслідок механічної взаємодії матеріалів мікровиступів: IV - під час механічного (пружно-пластичного контактування плівок) або молекулярного (схоплювання плівок) і V вид – через молекулярні взаємодії.

Основними показниками, що характеризують вид фрикційного зв'язку, є відношення глибини заглиблення (або значення стиснення) одиничної нерівності h до її радіуса R , а також градієнт механічних властивостей $\frac{d\tau}{dh}$, які визначають різницю між міцністю адгезійного зв'язку і міцністю шарів, що лежать нижче (τ - опір на зсув).

2.1.2 Природа і класифікація процесів зношування

Найхарактернішими процесами та явищами, що супроводжують зношування (взаємодія мікрорельєфів та виникнення фрикційних зв'язків) є наступні.

1. Високі локальні тиски, що можуть досягти значень, які відповідають фазовим перетворенням у поверхневих шарах, або призводять до розплавлення металу (виникнення "містків зварювання"). Поєднання повторних механічних і термічних напружень може спричинити появу мікротріщин, змикання яких на деякій глибині призведе до відділення матеріалу.

2. Проходження хіміко-термічних процесів, таких, як: утворення

плівок окису або інших хімічних сполук; розчинення одного із тіл, що труться під впливом механотермічних процесів в зоні контакту (наприклад, досліджуване акад. В.А. Білим розчинення металу полімером), окрихлювання поверхневого шару під дією атомарного водню, що виділяється із змащення або із одного із тіл тощо. Ці явища приводять до того, що властивості поверхневого шару, як правило, різко відрізняються від властивостей основного матеріалу, а саме цей шар і руйнується. Проф. Б.І. Костецький вважає, що „головною особливістю нормального зношування є відсутність будь-яких видів руйнування основного металу”.

3. Вплив на тертя і зношування змащення, що відіграє виняткову роль і в багатьох випадках визначає інтенсивність зношування. Окрім позитивної дії, змащення, потрапляючи в мікротріщини, може викликати розклинювання, що посилює руйнування поверхневих шарів.

4. Перенесення матеріалів з однієї поверхні на іншу. Це перенесення плівки пластичнішого тіла на тверде внаслідок молекулярного схоплення (намащування), перенесення сталі або чавуну через наводнення їх поверхневих шарів на м'яке контртіло (бронзу, пластмасу) і так зване вибірне атомарне перенесення, яке описане Д. Гаркуновим та І. Крагельським.

Останнє явище спостерігається під час тертя пари "сталь - сплав міді" полягає у виділенні міді внаслідок руйнування міжатомарних зв'язків з наступним перенесенням міді на поверхню сталі і утворенням тоненького шару міді, який не виноситься із зони контакту і переходить із однієї поверхні на іншу, що надає високої зносостійкості вузлові тертя,

Відповідно до стандарту (ГОСТ16429-70) всі види зношування можна поділити на три основні групи (рис. 2.1).

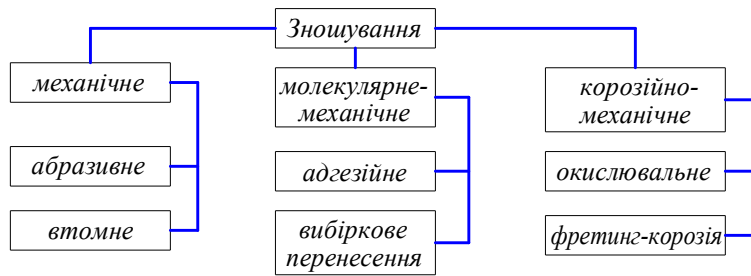


Рис. 2.1 Класифікація видів зношування

Механічне зношування - це зношування внаслідок тільки механічних взаємодій матеріалів виробу, *молекулярно-механічне* зношування супроводжується також впливом молекулярних або атомарних сил; *корозійно-механічне* зношування відбувається під час тертя матеріалу, що вступив у хімічну взаємодію із середовищем.

Абразивне зношування - це зношування, при якому на поверхнях, які труться, є абразивні частинки, що руйнують поверхню за рахунок різання та дряпання із відділенням стружки.

Втомне зношування є наслідком циклічного впливу змінних напружень на мікровиступи поверхонь, що труться. Відділятися частинки можуть також внаслідок наклепування поверхневого шару, який стає крихким і руйнується (інколи його називають зношуванням під час крихкого руйнування).

Адгезійне зношування пов'язане із виникненням у локальних зонах контакту поверхонь інтенсивної молекулярної (адгезійної) взаємодії, сили якої перевищують міцність зв'язків матеріалу поверхневих шарів із основним матеріалом.

Зношування в умовах вибіркового перенесення, навпаки, характеризується атомарними явищами в зоні контакту і призводить до виникнення практично беззношуваних пар. Утворений на поверхні внаслідок своєрідних механо-хімічних процесів м'який і тонкий шар збагачений, наприклад, міддю, забезпечує мінімальне тертя і сприяє рівномірному розподілу тисків по поверхні тертя.

Окислювальне зношування має місце при наявності на поверхні

тертя захисних плівок, що утворилися внаслідок взаємодії матеріалу із киснем,

Зношування під час фретинг-корозії відбувається при відносних коливальних переміщеннях металевих поверхонь, що контактують, внаслідок вібрації або періодичних деформацій елементів конструкції. На ділянках, пошкоджених фретинг-корозією, спостерігаються захоплювання, абразивне руйнування, втомно-корозійні явища.

Основними параметрами, що впливають на зношування, є:

- 1) значення питомого тиску та швидкість відносних переміщень;
- 2) механічні характеристики матеріалів пари тертя;
- 3) структура матеріалів пари тертя;
- 4) вид тертя - ковзання чи кочення та наявність змащування, властивості мастильних матеріалів.

Так, наприклад, для чистих металів і термічно необроблених сталей існує лінійна залежність між їх твердістю та зносостійкістю:

$$\varepsilon = bH,$$

де ε - відносна зносостійкість абразивного зношування; H - твердість за Брінелем; b - коефіцієнт пропорційності ($b=7,3$).

2.1.3 Фрикційні зв'язки та їх руйнування

Взаємодія контактуючих поверхонь проявляється у формуванні площ контакту, в утворенні яких беруть участь не тільки виступи, але і прилеглий до них матеріал. При виникненні і подальшому роз'єднанні контактів деформується поверхневий шар матеріалу. Площі контакту (плями дотикання), що утворюються при спільній дії нормальних і тангенційних сил та зникають при їхньому знятті, називають *фрикційними зв'язками*. Місток зварювання, що утворюється при терті, і продовжує існувати при усуненні нормального навантаження, не утворює фрикційний зв'язок. Аналогічний місток, що утворюється під дією

стискаючого навантаження і руйнується при припиненні його дії, є також фрикційним зв'язком.

Розрізняють механічну і молекулярну взаємодію поверхонь тертя. У першому випадку має місце механічне зчеплення поверхонь, в другому – сполучені поверхні знаходяться під дією атомарних (адгезійних) сил. І. Крагельський запропонував розрізняти п'ять видів руйнування фрикційних зв'язків, які виникають на поверхні двох тіл під дією нормальних і тангенційних сил та зникають у випадку припинення їхньої дії. Введемо наступні позначення:

h – глибина впровадження одиничної нерівності, що відраховується перпендикулярно площині плями контакту;

τ – опір зрізу адгезійного зв'язку утворених містків зварювання.

Залежно від величини адгезії і відносної глибини впровадження (h/R , де R – радіус одиничної впроваджуваної нерівності або індентора) мають місце такі порушення фрикційних зв'язків: пружне відтиснення матеріалу (рис. 2.2, а); пластичне відтиснення матеріалу (рис. 2.2, б); зріз впровадженого матеріалу (рис. 2.2, в); схоплювання плівок, які покривають поверхні твердих тіл та їхнє подальше руйнування (рис. 2.2, г); схоплювання поверхонь, яке супроводжується глибинним вириванням матеріалу (рис. 2.2, д).

Умови переходу від першого виду руйнувань до другого і третього залежать від глибини впровадження однієї деталі в іншу та величини сил адгезії. Здійснення четвертого і п'ятого видів руйнування фрикційних зв'язків визначається співвідношенням між міцністю плівок і основного металу. Якщо міцність плівки нижче міцності основного металу, має місце четвертий вид порушення фрикційних зв'язків, а якщо міцність плівки або поверхневих шарів, позбавлених плівки, більше міцності основного металу - здійснюється п'ятий вид руйнування. Перехід від четвертого до п'ятого виду порушення фрикційних зв'язків залежить від

градієнта механічних властивостей. Так, якщо $d\tau/dh > 0$ забезпечується четвертий вид, а якщо $d\tau/dh < 0$ - має місце п'ятий вид.

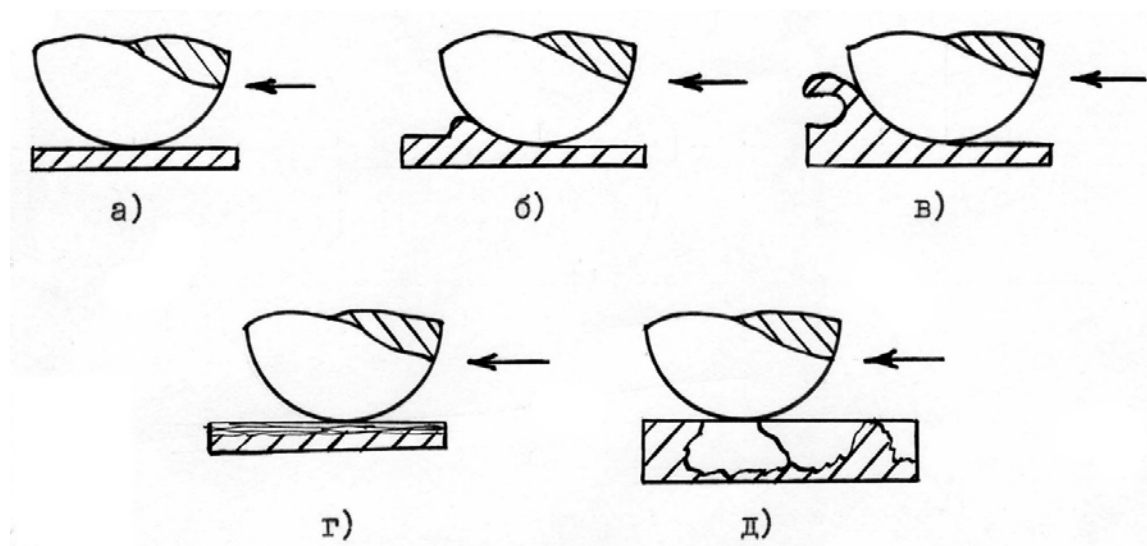


Рис. 2.2 Види руйнувань фрикційних зв'язків (пояснення в тексті)

Для запобігання прискореному руйнуванню (зношуванню) І. Крагельским запропоновано забезпечити наявність позитивного перепаду механічних властивостей по глибині, тобто застосування правила позитивного градієнта механічних властивостей.

2.1.4 Сучасні уявлення про природу зношування твердих тіл

Відповідно до поширених гіпотез процес зношування твердих конструкційних матеріалів поділяється на три послідовні явища: безпосередня взаємодія поверхонь; зміни, що відбуваються в поверхневому шарі; руйнування поверхонь.

Ці явища не потрібно розглядати як послідовні етапи. Вони постійно пересікаються і взаємно впливають один на інший, внаслідок чого при відносному переміщенні поверхонь відбуваються зміни в поверхневому шарі поверхонь.

Руйнування є завершальним етапом зношування, але через те, що руйнуванням охоплюється не вся поверхня тертя одночасно, інші

ділянки зазнають лише певних фізико-хімічних змін. Причому, часткове руйнування і зміна властивостей поверхонь впливають на їхню подальшу взаємодію.

2.1.5 Зміни у поверхневому шарі

Зміни в структурі поверхневого шару матеріалу виникають внаслідок деформацій, підвищення температури і хімічного впливу оточуючого середовища. Зміни, обумовлені деформацією, такі:

- багаторазові пружні деформації при терті коченні призводять до втомлювального викришування поверхонь, а при терті ковзанні пружні деформації шорсткостей розпушують їх структуру;
- пластичне деформування кристалічної ґратки твердих тіл (у даному випадку - поверхневого шару), яке може спричинити руйнування структури, що є заключним етапом пластичної деформації;
- пластична деформація при температурі поверхні нижче температури рекристалізації приводить до наклепування і подальшого зміцнення поверхневого шару; але безпосередньо біля самої поверхні структура матеріалу дещо ослаблена, її мікротвердість знижена.

Варто зазначити, що крихкість і пластичність твердого тіла незалежно від напруженого стану, не є його властивостями. При одному навантаженні тіло може бути пластичним, при іншому – крихким. Так, всебічне рівномірне розтягування створює напружений стан, внаслідок чого пластичні деформації не розвиваються, а матеріал знаходиться в крихкому стані. При рівномірному всебічному стисненні більшість твердих тіл може сприймати великі навантаження без руйнування.

У випадку нерівномірного всебічного стиснення, залежно від величини головних напружень, тіла можуть знаходитись в пластичному крихкому або перехідному станах. Б. Грозін показав, що за певних умов

всебічного стиснення навіть такі крихкі матеріали, як чавуни або загартовані до високої твердості сталі, мають значну пластичність.

Якщо виділити елемент, у якого одна з граней буде площиною фактичного контакту, то всі грані цього елемента будуть знаходитися під дією стискаючого напруження, оскільки під впливом прикладеного навантаження елемент намагається збільшити свої розміри в поперечних напрямках, а цьому перешкоджають оточуючі елементи матеріалу. На площі контакту діє сила тертя T і елемент знаходиться під дією не тільки нормальних, але і дотичних напружень. Саме такий напружений стан сприяє пластичній деформації матеріалу (рис. 2.3).

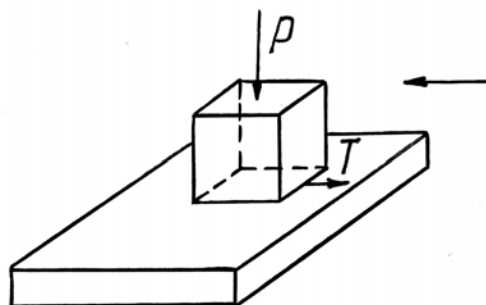


Рис. 2.3 До пояснення пластичного деформованих матеріалів при терті

Дослідження показують, що всі метали при терті в межах активного шару, в якому відбуваються різноманітні фізико-хімічні зміни, пов'язані з процесом тертя, піддаються пластичному деформуванню. Так, хром затікає у канали пористого хромового покриття і, як показують дослідження Г. Прейса, пластично деформуються навіть поверхневі шари емалевих покриттів.

Підвищення температури має наступний вплив на зміни в поверхневому шарі.

Якщо температура поверхневих шарів вища від температури рекристалізації, то поверхневий шар не наклепується, а знаходиться в

стані підвищеної пластичності, внаслідок чого відбувається вигладжування поверхонь.

Висока температура і пластична деформація сприяють дифузійним процесам (науглецюванню, окислюванню, взаємному дифузійному проникненню матеріалів пари при терті).

При раптовому локальному підвищенні температури можливе утворення загартованих структур. Цьому сприяють високі тиски, які знижують критичні точки структурних перетворень.

Хімічна дія середовища впливає на зміни в поверхневому шарі деталей наступним чином.

На оголених внаслідок зношування чистих ювенільних металевих поверхонь утворюються оксидні плівки під дією кисню повітря або кисню, який міститься в технологічному середовищі чи в мастилі. Ці плівки захищають поверхні від захоплювання. Дослідження тертя тіл у вакуумі, азоті, аргоні, гелії показали достатньо високу інтенсивність зношування, а на повітрі – набагато меншу. Це відбувається внаслідок утворення захисних плівок.

При взаємодії металевих поверхонь з хімічно-активними присадками до мастил утворюються аналогічні плівки. Плівки ефективно захищають поверхні від зношування, якщо швидкість їхнього утворення перевищує швидкість їх руйнування. Проте, агресивні рідини і гази інтенсифікують процес зношування.

Внаслідок розкладання мастила або технологічного змащувального середовища при високій температурі можливе насичення поверхні вуглецем.

2.1.6 Вибірковий перенос при терті

Явище вибіркового (атомарного) переносу було відкрито Д. Гаркуновим та І. Крагельським у 1956 році.

Встановлено, що при терті мідних сплавів по сталі у середовищі гліцерину, спиртогліцериновій суміші та в деяких мастилах (при певних режимах тертя) сталева поверхня покривається міддю, а іноді відбувається зворотний перенос цього шару на поверхню кольорового сплаву. При терті по сталі олов'янистих бронз механізм вибіркового (атомарного) переносу пов'язаний з відновлюваними властивостями гліцерину та деяких інших речовин у процесі тертя. Плівка окису міді, що покриває бронзу, відновлюється до чистої міді, яка потім переноситься на сталь і схоплюється з нею.

Сталь відносно бронзи є катодом, а бронза – анодом. Як тільки на сталевій поверхні утвориться шар міді достатньої товщини, полярність змінюється, сталевий зразок стає анодом і починається зворотний перенос. Тертя при такому ході процесу майже не супроводжується зношуванням поверхонь, що дало підставу стверджувати, що відбувається взаємний перенос міді (рис. 2.4).

При взаємному атомарному переносі шар міді заповнює нерівності на сталевій і бронзовій поверхнях, що раптово зменшує шорсткість поверхонь тертя, внаслідок чого коефіцієнт тертя зменшується до показників, що відповідають рідинному тертю.

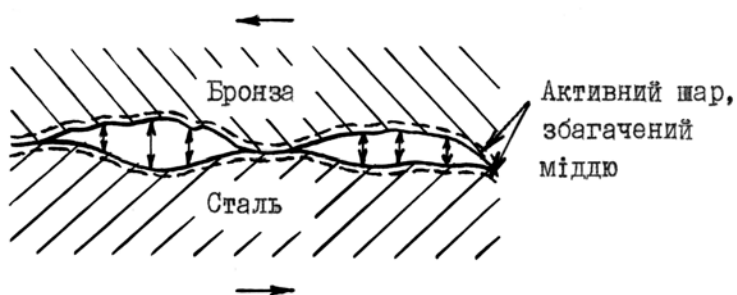


Рис. 2.4 Утворення захисного сервовитного шару міді на поверхнях тертя

Явище вибіркового (атомарного) переносу ґрунтується на гіпотезі Джона Бернала, за якою кристалічні ґрати втрачають свою стійкість у тому випадку, якщо з них достатньо рівномірно вилучити 7-12% атомів. Це вилучення було здійснене шляхом вибіркового (корозійного)

розчинення з твердого розчину мідного сплаву атомів менш корозійностійких, ніж мідь, елементів (олово, свинець, цинк тощо). На поверхні мідного сплаву залишаються слабо зв'язані з металом іони міді, що обволікаються (електролітом). Якщо таку поверхню мідного сплаву поєднати з іншою поверхнею, наприклад сталевую, і розділити їх шаром мастила, то при відносному переміщенні за рахунок явища трибоелектрики виникає електростатичне поле. У цьому полі окремі колоїдні, слабо зв'язані з кристалічними ґратками частки будуть відокремлюватися і переміщуватись у напрямку поверхні, що має протилежний знак (при терті міді по сталі мідь заряджена позитивно, а сталь - негативно). Після того, як обидві поверхні будуть складатися з однакових іонів міді, іонний рух припиниться.

Таким чином, явище вибіркового переносу складається приблизно з таких етапів: вибірконе розчинення атомів, ослаблення зв'язків у ґратках; виникнення електростатичного поля; переніс у цьому полі іонів нерозчиненого металу і утворення сконденсованої плівки; припинення процесу (пасивація) при рівномірному однаковому покритті поверхонь.

Очевидно, що вибірковий перенос забезпечує умови для створення беззношуваних пар. Принцип дії такої пари (сталь-бронза) полягає в тому, що кожна частка, що відірвалася при терті, захоплюється з однією з поверхонь тертя, а потім переходить на іншу чим і забезпечується беззношувальність такої пари.

Використовувати це явище можна і при терті сталі по сталі, але в з'єднання необхідно ввести бронзовий компонент, який створює на нижньому зразку шар міді, що забезпечує взаємний атомарний (вибірковий) перенос (рис. 2.5). У цьому випадку навантаження до зчеплення поверхонь зростає в 3...4 рази, а інші зразки практично не зношуються. Мастилом може служити спиртогліцерінова суміш. Дослідження показали, що взаємний атомарний перенос може бути

також забезпечений, якщо в гліцеринове мастило додати порошок міді. При цьому працездатність вузла підвищується в 3...4 рази. В даний час встановлені такі гіпотетичні уявлення про вибіркового перенос. І.Крагельський зауважує, що всі зусилля в боротьбі зі зношуванням спрямовані на захист поверхні від ушкоджень шаром мастила, захист поверхонь плівками, хімічними сполуками (окислами тощо), збільшенні поверхні і міцності самого металу.

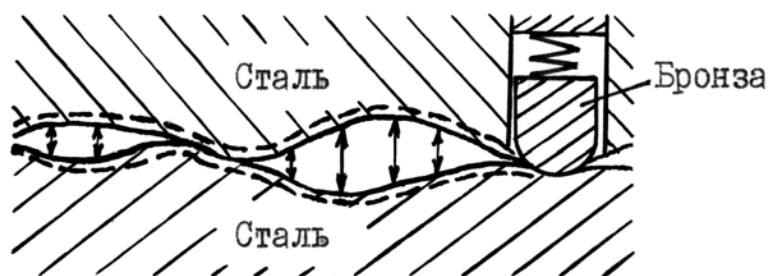


Рис. 2.5 Атомарний перенос міді на сталеві деталі пари тертя при використанні натирання бронзою

Але при великих тисках, що виникають на контакті навіть при малих навантаженнях, останній пункт далеко не завжди ефективний, тому що з підвищенням твердості росте фактичний тиск, а зносостійкість не зростає.

У процесі тертя однакових металевих покриттів по проміжному середовищу виникають однакові заряди, які при зближенні поверхонь приводять до їх взаємного відштовхування, збільшуючи цим несучу здатність контакту. На процес вибіркового розчинення накладається також процес адсорбційного зниження міцності поверхонь тертя.

На думку Д. Гаркунова дослідження фізичної картини процесу вибіркового переносу привело до перегляду традиційних поглядів на деякі питання тертя, зношування і змащування машин. Раніше змащування розглядали як захисний «чохол» твердого тіла, а тепер же вважають, що воно повинне руйнувати поверхневий шар матеріалу, перетворюючи його в квазірідке тіло. Найкращим режимом тертя з

огляду на зносостійкість вважався окислювальний з утворенням оксидних плівок, але тепер встановлено, що безокислювальне тертя інколи перевершує окислювальне за багатьма цінними показниками.

2.1.7 Водневе зношування

У вузлах тертя в деяких випадках спостерігаються такі дивні явища, як перенос тонкого шару сталі на бабіт чи бронзу, чавуну - на пластмасу, перетирання сталі м'якою бавовняною ниткою в (ткацькому верстаті), підвищений знос загартованої сталі при терті по гумі, пластмасі, дереві, тобто знос твердих матеріалів, що працюють у парі з досить м'якими.

Проведені дослідження спонукали Д. Гаркунова і А. Полякова до висновків про існування нового виду зношування за рахунок наводнювання й окрихчування сталевोї поверхні. Наводнювання відбувається внаслідок розкладання вуглеводневих матеріалів одного з елементів вузла тертя. Так було встановлене виділення водню при терті пластмас.

На відміну від давно описаного явища водневої крихкості в деталях машин, водневий знос має такі особливості:

- тертя є першопричиною розвитку трибохімічних реакцій на поверхнях тертя і виділення водню;
- тертя сприяє розвитку процесу поглинання водню поверхневим шаром деталей через різке збільшення швидкості дифузії при деформуванні їхніх поверхонь;
- тертя є причиною підвищеної крихкості і повного руйнування поверхневих шарів сталевих деталей.

Таким чином, в основі водневого зношування лежать такі, не цілком вивчені, явища: виділення водню в процесі тертя; проникнення водню у поверхневі шари деталей у зв'язку з активуванням дифузії при їх деформуванні; диспергування шарів сталі, насиченої воднем.

Подібно до проявлення водневої крихкості поверхні нарівні з об'ємною міцністю деталей, водневе зношування виникає при визначеному сполученні чинників, обумовлених матеріалами пари тертя, середовищем і навантаженням. Хоча водневе зношування, за деяких умов, відбувається тільки на глибину в три сотих міліметра (глибина дифузійного шару), але, при підвищених вимогах до точності трибосполучень і надійності, руйнування навіть тонкого поверхневого шару може привести трибо сполучення деталей або машину в повну непридатність до використання.

Згодом, в процесі вивчення водневого зношування, були виявлені такі його характерні риси:

- це явище зв'язане з присутністю водню майже у всіх органічних речовинах, застосовуваних у вузлах тертя. Він може або виділятися з тіл, що входять у вузол тертя (поліетилен, поліаміди) або з мастила активізованого тертям чи корозійно-механічним зношуванням;
- хімічна реакція виділення водню прискорюється механо-хімічними і тепловими факторами, тиском при досить жорстких режимах тертя;
- руйнування поверхневого шару деталей відбувається в результаті його окрихчування, або в результаті хімічного відновлення воднем оксидних плівок, що утворилися при терті.

2.1.8 Класифікація видів зношування

Для спрощення підходів до вибору металів для пар тертя, необхідно мати чітку класифікацію видів зношування. Найбільш об'єктивного треба визнати класифікацію видів зношування, запропоновану І. Крагельським, М. Хрущовим, і Б. Костецьким.

І. Крагельський, на базі даних багатьох дослідників та своїх спостережень за деталями машин і внаслідок власних досліджень тертя

тіл без змащування, запропонував класифікацію, в основу якої покладена така схема процесу зношування. При зближенні, а потім ковзанні поверхні тертя можуть взаємодіяти по-різному: шляхом механічного впровадження та молекулярного притягнення, схоплювання. При цьому розрізняються такі види руйнування поверхонь. При механічній взаємодії відбувається вишкрябування (мікрорізання, відрив частинок матеріалів деталей пари тертя), відшаровування (у результаті багаторазового вигладжування), викришування (у результаті неоднорідного стану поверхневих шарів), мікроруйнування (відшаровування, викрашування, оплавлення) поверхонь тертя.

При молекулярній взаємодії виникає глибинне виривання, якщо сили зчеплення великі (схоплювання), а також другий, третій і четвертий види руйнування, як і при механічній взаємодії, якщо сили зчеплення малі і порушуються при ковзанні поверхонь деталей.

Для того, щоб керувати зношуванням вузла тертя, необхідно визначити вид взаємодії поверхонь, вид руйнування, який вона викликає, фізико-хімічні зміни, що відбуваються у поверхневих шарах контактуючих деталей.

М. Хрущов запропонував класифікацію видів зношування за умовами експлуатації деталей. За ознаки для класифікації умов експлуатації матеріалів деталей, що впливають на зношування, були прийняті такі: тип тіла сполученої деталі, при терті по якому відбувається зношування: тверде тіло, яке не є сполученою деталлю; тверді частинки – окремі або з'єднані в неміцну масу; тверді частки в рідинному потоці; вид тертя (ковзання, кочення); наявність змащування.

Для тертя ковзання сполучених деталей М. Хрущовим запропоновано ввести додаткову класифікацію та поділ на групи видів зношування: механічне зношування, молекулярно-механічне, корозійно-механічне.

До групи механічного зношування були віднесені абразивне внаслідок пластичного деформування, при крихкому руйнуванні; до молекулярно-механічного зношування віднесене схоплювання; до групи корозійно-механічного зношування віднесене корозійне зношування, що супроводжується утворенням продуктів хімічної взаємодії металу з агресивним середовищем та їхнім подальшим відділенням внаслідок механічної дії сил тертя. Окремо виділене окислювальне зношування, яке відбувається при взаємодії поверхонь деталей з киснем повітря або з іншими окислювачем.

Поглиблене вивчення явищ зношування деталей машин і обладнання, зокрема, харчової і переробної промисловості, розпочате порівняно недавно і не можна впевнено стверджувати, що всі види зношування, які їм притаманні, відомі. Очевидно, що запропонована класифікація буде надалі доповнюватись і вдосконалюватись.

За результатами металознавчих досліджень явищ, які відбуваються в поверхневих шарах металів при терті і зношуванні, Б. Костецьким була запропонована класифікація, за якою основними видами зношування є: схоплюванням першого роду; окислювальне; теплове або схоплюванням другого роду; абразивне; віспоподібне. Аналізуючи результати багаторічних досліджень і явищ, що відбуваються при терті в поверхневих шарах металів Б. Костецький зробив важливі висновки. Кожна деталь піддається переважному (провідному) виду зношування, яке визначає її стійкість при експлуатації. Одночасно можуть існувати і супутні види зношування, які мало впливають на його загальну інтенсивність і роботу пар тертя. Внаслідок нерівномірності навантаження різних ділянок деталі, вони можуть піддаватись різним видам зношування. Гіпотеза про визначальний вид зношування дозволяє звести задачу вивчення окремих складних явищ зношування деталей

машин до вивчення лише одного переважаючого виду, притаманного в кожному конкретному випадку тертя.

Процеси, що відбуваються при різних видах зношування, ґрунтуються на явищах, що підпорядковуються законам фізики твердого тіла, матеріалознавства фізико-хімічної механіки матеріалів.

Зношування *схоплюванням першого роду* виникає при терті з малими швидкостями ковзання (для сталі $V \leq 1 \text{ м/с}$) і тисках, що перевищують межу текучості металу на площадках фактичного контакту при відсутності змащування і захисних окисних плівок. Найбільше цей вид зношування проявляється при терті пластичних металів. Основні характеристики розвитку зношування схоплюванням першого роду визначаються процесами пластичної деформації, виникненням металічних зв'язків, зміцненням об'ємів металу, що схоплюються, і руйнуванням прилеглих до них ділянок поверхні тертя. Інтенсивність такого зношування досягає 10...15 мкм/год.

Окислювальне зношування, при якому характеристики роботи тертя залежать від дифузії кисню в метал деформованих при терті поверхневих шарів, утворення твердого розчину кисню в металі і його хімічних сполук (наприклад FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 тощо) віднесене до допустимих. Воно виникає при терті ковзання і кочення. В другому випадку воно супроводжує віспоподібне зношування, але при малих навантаженнях окислювальне зношування буде переважати при правильному сполучені і правильній експлуатації вузла тертя. При терті без змащування сталі по сталі воно виникає при швидкостях ковзання близьких до 1,5...4 м/с; при граничному змащуванні – від найменших швидкостей до 20 м/с. Інтенсивність окислювального зношування найменша і не перевищує 0,1...0,5 мкм/год.

Зношування *схоплюванням другого роду (теплове)* характеризується явищами, які відбуваються в тонких поверхневих

шарах під дією теплоти. Руйнування в цьому випадку є наслідком розм'якшення поверхневих шарів, контактного захоплення, зминання, налипання і оплавлення металу. Цей вид зношування розповсюджений у деталях важконавантажених і швидкохідних машин. Він виникає при великих швидкостях ковзання, великих тисках, при яких відбувається інтенсивне зростання температури в поверхневих шарах, що створює стан “термічної” пластичності металу. Інтенсивність цього виду зношування знаходиться в межах 1...5 мкм/год.

Абразивне зношування обумовлено ковзанням, впровадженням і зрізанням твердими абразивними частками мікрооб'ємів матеріалів пари тертя. В деталях машин його інтенсивність досягає 0,5...5 мкм/год.

Віспоподібне зношування відбувається при терті кочення. Циклічні навантаження, що перевищують межу текучості металу при терті кочення, приводять до втомлювальних явищ, що викликає руйнування поверхневих шарів. Внаслідок цього з'являються мікро- і макроскопічні тріщини, розташовані під невеликими кутами до поверхні тертя, які поступово розвиваються і перетворюються у віспоподібні заглиблення і впадини (піттинг).

Загальну закономірність розвитку процесу зношування для всіх його видів отримати неможливо, тому що кожний з них має свою схему і специфіку та підпорядковується певним конкретним закономірностям, які залежать від умов тертя і властивостей пари тертя, що проявляються індивідуально.

При визначенні залежності зносостійкості від різних факторів варто прийняти наступні основні положення:

1. Вид зношування і механізм руйнування поверхневих шарів при терті в основному визначаються зовнішніми факторами. Провідним фактором при цьому є швидкість переміщення, а величина нормального тиску впливає, в основному, на інтенсивність зношування.

2. При встановленому виді зношування максимальна зносостійкість деталей досягається при підсиленні тих властивостей їх матеріалів, що забезпечують найбільший опір даному виду зношування.

3. Значне збільшення зносостійкості трибосистеми досягається створенням таких умов її роботи, при яких замість одного визначального виду зношування виникає інший, менш руйнівний. Цього можна досягти зміною умов тертя або зміною властивостей матеріалів пари тертя.

Для підвищення зносостійкості матеріалів вузлів тертя можуть бути використані принцип запобігання зношуванню (конверсії), який полягає в запобіганні більш руйнівного виду зношування шляхом здійснення менш руйнівного і принцип переносу зношення (диверсії), що полягає в переносі зношування з більш трудомісткої у виробництві поверхні (деталі) на сполучену, заміна якої коштує дешевше.

При визначенні умов максимальної зносостійкості для окремих видів зношування, встановлено, що визначення зносостійкості має практичне значення тільки при окислювальному зношуванні. При інших видах зношування визначати умови максимальної зносостійкості недоцільно. Для них варто визначати граничні умови реалізації в зв'язку з механічним впливом, середовищем та матеріалом і уникати за рахунок переходу до окислювального зношування.

На базі запропонованих класифікацій видів зношування державний стандарт встановлює наступні види зношування:

1. **Механічне** – зношування внаслідок механічних впливів.

2. **Корозійно-механічне** – зношування в результаті механічного впливу, що супроводжується хімічною або електричною взаємодією матеріалу з середовищем.

3. **Абразивне-механічне** зношування матеріалу в результаті переважно ріжучої дії на матеріал твердих часток, що знаходяться у вільному чи закріпленому стані.

4. **Ерозійне-механічне** зношування внаслідок дії потоку рідини або газу.

5. **Гідроабразивне (газоабразивне)** зношування – абразивне зношування внаслідок дії твердих часток, завислих у рідині (газі), які переміщуються відносно зношуваного тіла.

6. **Втомлювальне** – механічне зношування в результаті втомлювального руйнування при циклічному деформуванні мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару, яке може відбуватись як при терті кочення, так і при терті ковзання.

7. **Кавітаційне** – гідроерозійне зношування при переміщенні твердого тіла відносно рідини, при якому бульбашки газу, розчиненого в ній, захоплюються поблизу поверхні, внаслідок чого створюється місцеве підвищення тиску і температури.

8. **Зношування при заїданні**, що відбувається внаслідок схоплювання, глибинного виривання матеріалу, переносу його з однієї поверхні тертя на іншу і дії утворених нерівностей на сполучену поверхню.

9. **Окислювальне зношування** – корозійно-механічне зношування, при якому основний вплив на його протікання й інтенсивність забезпечує хімічна реакція матеріалу з киснем або навколишнім середовищем.

10. **Зношування при фретингу** – механічне зношування сполучених тіл при малих коливальних відносних переміщеннях.

11. **Зношування при фретинг-корозії** – корозійно-механічне зношування сполучених тіл при малих коливальних відносних переміщеннях.

12. **Електроерозійне** – ерозійне зношування поверхні внаслідок дії на неї розрядів при проходженні електричного струму.

2.2 Тертя у рухомих з'єднаннях

2.2.1 Розвиток науки про тертя

Світ без сил тертя існувати не може. Якби тертя зникло хоча б на хвилину, ми змогли б стати свідками найбільших катастроф і навряд чи б пережили їх: важко уявити, що б трапилось, якби раптово усі поверхні стали абсолютно гладкими, а всі рідини втратили в'язкість. Тертя - одне з основ світобудови, однак воно обходиться усім нам надзвичайно недешево. Величезна частина світових енергетичних і матеріальних ресурсів через тертя витрачається марно і незворотно втрачається. Тертя є одним з визначальних факторів, що сприяють зношуванню деталей і вузлів машин; тертя знижує ефективність, точність і довговічність технічних засобів і є одним з головних "ворогів" надійності.

Десятки мільйонів тонн нафтопродуктів витрачаються щорічно на антифрикційні мастила, а збитки від тертя збільшуються. Традиційні засоби боротьби є недостатньо надійними та ефективними. Вихід із такої ситуації - пошук нових підходів, розробка нових антифрикційних матеріалів, що дозволяють у багатьох випадках взагалі обійтися без змащування.

Дослідження, спрямовані на вивчення і подолання негативних явищ тертя і зношування, вимагають консолідації зусиль машинознавців, хіміків, металургів і, звичайно, конструкторів і технологів. Для вивчення і вирішення всього комплексу проблем, пов'язаних з тертям, необхідно створити ефективні теорії, надійні розрахункові схеми, залучити оригінальні інженерні ідеї.

Поряд з пошуками нестандартних шляхів організації різноманітних пар тертя удосконалюються традиційні мастильні матеріали, розробляються нові принципи змащування. У вузлах тертя можна, наприклад, створити специфічний мікрорельєф деталей, що сполучаються, з попередньо розрахованими параметрами мікрозападин і

мікровисот. Внаслідок цього утворюються "масляні кишені", які добре утримують мастило і зменшують зношування.

Дуже перспективним передбаченням подальше вивчення і впровадження підшипників з газовим і водяним змащуванням. Водяне змащування особливо ефективне для високооберткових машин, швидкість обертання валів яких складає кілька десятків тисяч обертів за хвилину. Крім того, воно дозволяє заощаджувати дорогі оливи, зменшити втрати на тертя і поліпшити загальний температурний режим технічної системи.

Істотно збільшити надійність роботи технічних систем також можна за допомогою магнітоактивних порошкових мастильних матеріалів, що вводяться в зону змащування магнітними полями. Таке змащування добре виконує свої функції і при високій температурі, і у вакуумі. Використання магнітоактивних порошків дозволяє організувати адаптивні вузли. Підбираючи параметри магнітного поля, можна регулювати періодичність надходження в зону тертя мастила і, отже, регулювати роботу таких об'єктів, як пари тертя.

Систематичне вивчення тертя започаткував Леонардо да Вінчі (1452-1519), творчий доробок якого в цій галузі був належно оцінений лише у позаминулому столітті, коли у Національній бібліотеці Мадрида (Іспанія) випадково було знайдено його два невідомих рукописи. Один з них починається з висновку про безглуздість „вічного двигуна”: „Намагання створити вічне колесо – джерело вічного руху – можна назвати однією з нездійснених примар людини”. Так написав він за багато років до того, як Французька академія наук визнала проекти „вічного двигуна” антинауковими і відмовилась їх розглядати. Створивши для досліджень експериментальну установку, за 200 років до дослідів Г. Амонтона і майже за 300 років до Ш. Кулона, Леонардо да Вінчі визначив, що „сила тертя залежить від матеріалу контактуючих

поверхонь, а також від ступеня їх оброблення і не залежить від площі поверхонь: вона прямо пропорційна масі вантажу і може бути зменшена шляхом введення мастильних речовин між поверхнями тертя”.

Він увів в інженерну термінологію поняття „коефіцієнт тертя” і запропонував склад металевого мастила з трьох частин міді та семи частин олова, яке близьке до антифрикційного складу „бабіту”, запатентованого лише в 1839 р. А. Бабітом.

В 1699 р. Г. Амонтон за результатами власних досліджень сформулював емпіричний закон, відповідно до якого статичне тертя F (сила тертя) пропорційне силі тиску N між двома поверхнями, що контактують: $F = \mu \cdot N$, де μ - коефіцієнт тертя, який залежить від характеру і стану поверхні обох тіл на площинах контакту.

Вагомий внесок в розвиток науки про тертя належить Ш. Кулону (1736-1806). Вирішуючи практичні задачі для військово-морського флоту, пов’язані з вивченням сил, що виникають при спуску кораблів зі стапелів на воду, а також при визначенні опору стрілки компасу, він визначив коефіцієнти тертя для різних пар матеріалів (металів, мінералів, деревини) і сформулював двоякість природи тертя. За Кулоном сила тертя є сукупністю двох видів опору - зчеплення, що залежить від площі контакту, та зачеплення, яке пропорційне навантаженню і не залежить від площі контакту. Тобто сила тертя $F = A + \mu \cdot N$, де A - константа, яка характеризує здатність тіл до взаємного зчеплення.

Для грубо оброблених поверхонь величина зчеплення незначна і визначається силами міжмолекулярної взаємодії обох тіл в парі тертя, однак, таке пояснення зчеплення не було обґрунтовано Кулоном. Варто відмітити, що відомі закони електростатики (закони Кулона) були відкриті за допомогою крутильних вагів, виготовлених дослідником для вивчення тертя стрілки компасу на загостреній осі.

В 1734 р. Ж. Дезагюльє виявив, що поліровані металеві зразки сильно зчеплюються при терті і пояснив це явище їх здатністю до злипання (за сучасною термінологією - адгезії).

В 1804 р. Д. Леслі при вивченні закономірностей розсіювання тепла при терті висунув гіпотезу, що тепло при терті тіл розсіюється внаслідок неминучого деформування поверхонь. Майже через 150 років Д. Бриллюен довів, що енергія може розсіюватись при послідовному утворенні і розриві адгезійних зв'язків між атомами.

За Ф.Боуденом і Д. Тейбором сила сухого тертя пояснюється виникненням та руйнуванням адгезійних містків, які утворюються внаслідок своєрідного "холодного зварювання" на локальних ділянках контакту.

На думку І. Крагельського, крім адгезійного, важливе значення має ще один вид зв'язку - зачеплення і впровадження поверхонь. Ним запропонована молекулярно-механічна теорія тертя, за якою процес тертя являє собою деформування тонких поверхневих шарів контактуючих тіл, яке ускладнене руйнуванням адгезійних містків зварюванням між плівками, що покривають ці тіла. Через хвилястість та шорсткість поверхонь тверді тіла контактують на незначних за площею ділянках фактичного контакту на вершинах хвиль і нерівностей. В цих місцях діють сили міжмолекулярної взаємодії та виникають містки холодної зварювання. Крім адгезійної (молекулярної) взаємодії відбувається і механічна, оскільки в зоні фактичного контакту більш тверді виступи впроваджуються в сполучене тіло і відбувається зчеплення нерівностей, містки зварювання зрізуються і утворюються знову.

2.2.2 Види тертя

Тертя класифікують за різними ознаками: фізичними, кінематичними, за наявністю змащування поверхонь.

Відмінною особливістю тертя є його дисипативний характер, тобто тертя завжди супроводжується переходом механічної енергії в інші її види: теплову, хімічну тощо.

За фізичного природою розрізняють тертя внутрішнє і зовнішнє.

При внутрішньому терті перетворення механічної енергії в теплову відбувається в усіх локальних ділянках точках певного об'єму, навіть якщо він, подібно до змащувального шару, має дуже малу товщину. Отже доцільним є застосування терміну "внутрішнє тертя". При внутрішньому терті тепло поширюється тільки уздовж поверхні розділу двох тіл, де відбувається процес ковзання.

Найбільш цікавим для машинобудування є зовнішнє тертя, яке називають власне тертям і під яким розуміють опір, що виникає при відносному переміщенні двох тіл по поверхні їхнього контакту (сполучення).

Силу опору, або силу тертя залежно від довжини переміщення, розділяють на силу тертя руху, силу тертя спокою, найбільшу силу тертя спокою.

Сила тертя руху - сила опору відносному руху контактуючих тіл при відсутності інших опорів.

Сила тертя спокою - сила опору, спрямована протилежно зсувному зусиллю, при відсутності зсуву на межі контакту. Вона змінюється від нуля до максимуму, коли переходить у найбільшу силу тертя спокою.

Найбільшу силу тертя спокою складає граничний опір відносному переміщенню контактуючих тіл без порушення зв'язку між ними і при відсутності зсуву при контакті.

Деформація тіл, у першу чергу їхніх шорсткостей, під дією зсувного зусилля і протилежної йому сили тертя спокою, викликає попередній зсув

тіл, що передуває їх макропереміщенню (рис. 2.6). Попередній зсув частково оборотний, але визначити його візуально неможливо, тому що він вимірюється мікрометрами.

У той момент, коли під дією прикладеної сили, сила тертя досягає значення найбільшої сили тертя спокою F_n , попередній зсув переходить у поступальне переміщення S . Причому переміщення тіл згодом може відбуватися

яка менша за

під дією сили F_c ,
 F_n .

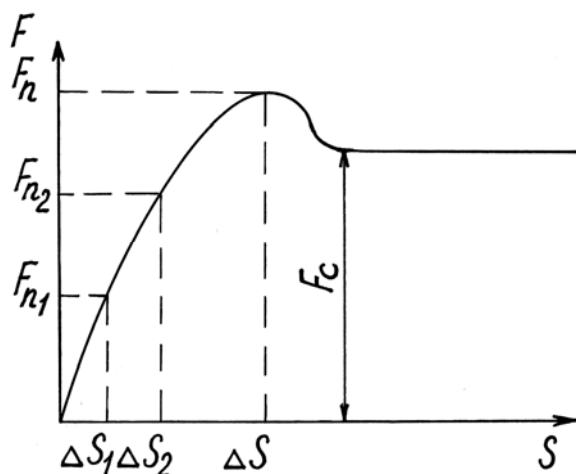


Рис. 2.6 Залежність величини зсуву S від сили тертя F : F_{ni} – неповна сила тертя спокою; ΔS_i – величина попереднього зсуву; F_n – найбільша сила тертя спокою; F_c – сила, необхідна для взаємного переміщення твердих тіл

За кінематичним значенням розрізняють тертя ковзання і тертя кочення.

Тертя ковзання, виникає тоді, коли одні і ті ж самі точки одного тіла приходять у зіткнення з все новими точками іншого тіла. Відносні швидкості руху різних точок взаємодіючих тіл при цьому однакові (рис. 2.7).

При *терті кочення* одне тіло перекочується по іншому і точки, що слідують одна за одною, стикаються з аналогічними точками іншого тіла. Різними в цьому випадку є відносні швидкості різних точок тіла кочення (рис. 2.8).

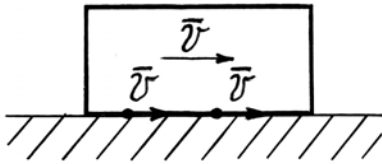


Рис. 2.7 До пояснення поняття «тертя ковзання»

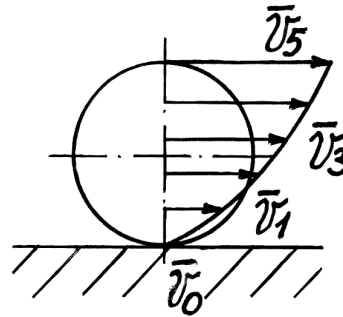


Рис. 2.8 До пояснення поняття «тертя кочення»

Часто один вид тертя супроводжується іншим, наприклад, тертя кочення з проковзуванням.

Залежно від наявності змащувального матеріалу в з'єднанні та його участі в процесі, стандарт розрізняє тертя без змащування, тертя з граничним змащуванням, тертя з рідинним змащуванням, тертя з напіврідинним змащуванням.

О. Старосельським і Д. Гаркуновим запропонована більш детальна класифікація видів тертя залежно від наявності змащувального матеріалу, а саме: чисте тертя, сухе тертя (без змащування), напівсухе тертя, граничне тертя, напіврідинне тертя, рідинне тертя.

Чисте тертя - тертя абсолютно чистих поверхонь, вільних навіть від абсорбованих молекул рідин і газів, плівок хімічних сполук і різних сторонніх речовин. Воно може виникнути при різних видах тертя на окремих ділянках контакту, коли оголюються новоутворені ювенільні поверхні. Чисте тертя може виникати у вакуумі після спеціальної підготовки поверхонь тертя.

Сухе тертя (тертя без змащування) спостерігається при відсутності змащування і забруднень поверхонь тертя. Воно зустрічається в гальмах, фрикційних передачах, у вузлах тертя машин харчової, переробної, іноді хімічної, енергетичної промисловості, де змащування для запобігання псування продукції, або за вимогами безпечної експлуатації неприпустиме. Сухе тертя супроводжується

стрибкоподібним переміщенням поверхонь. З цим, наприклад, пов'язана вібрація автомобіля при включенні зчеплення, "смикання" при гальмуванні тощо.

При сухому терті на поверхні контакту можуть бути плівки оксидів, волога, забруднення, які суттєво впливають на силу і коефіцієнт тертя. Причому сили молекулярної взаємодії між контактуючими поверхнями можуть бути в сотні разів меншими, ніж у випадку контакту чистих поверхонь. Крім того, міцність оксидних плівок менша за міцність основного металу, тому опір дряпанню і зрізуванню часток при переміщенні також суттєво знижується, внаслідок чого коефіцієнт тертя зменшується.

Наявність товстих плівок оксидів приводить до збільшення площі фактичного контакту, що може викликати збільшення сили тертя.

Граничне тертя, при якому поверхні тертя розділені шаром мастила настільки незначної товщини (близько 0,1 мкм і менше), через що цей шар має особливі властивості, які відрізняються від об'ємних властивостей змащувального матеріалу і залежать від природи та стану поверхонь тертя. Класичні рівняння гідродинаміки в'язкої рідини в цьому випадку не застосовуються.

При *рідинному терті* поверхні повністю розділені шаром мастильної рідини, що знаходиться під тиском, який врівноважує зовнішнє навантаження. Цей шар рідини називається несущим.

Напівсухе тертя – змішане тертя, одночасно граничне і сухе.

Напіврідинне тертя - змішане, одночасно рідинне і граничне, рідинне і сухе.

Отже, основні види тертя - сухе (без змащування), граничне, рідинне. Розглянемо їх більш ґрунтовно.

2.2.3 Граничне тертя

Гранична мастильна плівка може бути утворена змащувальним матеріалом, що знаходиться в будь-якому агрегатному стані: твердому, пластичному, рідкому, газоподібному. У переважній більшості випадків для змащування використовують мінеральні оливи.

Оливи являють собою суміш різних вуглеводнів і містять довгі метилові ланцюги. Кожна молекула такого ланцюга має на одному кінці карбоксильну групу COOH з високим енергетичним потенціалом, а на іншому – нейтральну метильну групу CH_3 .

Металева поверхня здійснює на ланцюг каталітичну дію, внаслідок чого йому надається вертикальна орієнтація.

За нетривалий час під дією сил поля і внутрішньомолекулярних сил відбувається подальша надбудова ланцюгів і утворюється граничний шар, в якому групи CH_3 є "слабкими" ланками. Передбачається, що вздовж площин CH_3 відбувається пошарове ковзання всередині мастильної плівки.

Набувши певної структури, граничний шар втрачає свої початкові властивості змащувального матеріалу: мастило здобуває квазікристалічну структуру, внаслідок чого змінюються його механічні властивості. Міцність на стискання такої плівки збільшується до декількох сотен МПа, а опір зсуву залишається незначним. Перший з цих параметрів визначає високу вантажопідйомність плівки, а другий - низький коефіцієнт тертя.

Граничні мастильні шари можуть бути утворені графітом, нітридом бору, дисульфідом молібдену або вольфраму тощо. У кристалічних ґратках цих речовин зв'язки між окремими шарами значно менші, ніж всередині кожного шару. Тому, наприклад, графіт добре "прилипає" до поверхні металу і в процесі тертя розшаровується, внаслідок чого

ковзання відбувається фактично по площинах з'єднання його окремих "пелюстків".

2.2.4 Рідинне тертя

Рідинне тертя виникає за певних умов, коли між навантаженими поверхнями утримується шар змащувального матеріалу завтовшки декілька десятків мікрометрів і більше, у якому зберігається найважливіша властивість рідини - в'язкість. Отже, поверхні тертя розділені шаром оливи (мастила), що сприймає прикладене нормальне навантаження. Очевидно, що мінімальна товщина шару повинна перевищувати суму максимальних висот нерівностей обох поверхонь. У цьому випадку тертя твердих тіл замінюється внутрішнім тертям шарів рідини. Рідинний режим є найбільш бажаним, тому що практично усуває зношування поверхонь, а втрати потужності пов'язані тільки з тертям усередині шарів мастильної рідини.

Несуча здатність рідинному шару може бути надана гідростатичним і гідродинамічним способами. У першому випадку рідина подається в з'єднання насосом і тиск рідини на вході в зазор повинен забезпечити протидію зовнішньому навантаженню. Гідродинамічний спосіб оснований на гідродинамічному ефекті. Якщо струменю оливи надати швидкості $\bar{V}$, то в клиноподібному зазорі виникає вертикальна сила $P_B = P \cdot ctg\alpha$, що врівноважує зовнішню силу Q , яка прикладена до тіла B (рис. 2.9, а). Необхідну швидкість V можна надати оливі (мастилу) її нагнітанням в зазор або безперервним односпрямованим рухом тіла A у напрямку $\bar{V}$. На рис. 2.9, а, б показана епюра швидкостей шарів рідини в перетині „I-I", коли вона нагнітається насосом. Частки рідини, які прилягають до тіл A і B , мають нульову швидкість, а по мірі віддалення від поверхні швидкість течії рідини збільшується до максимуму в середній частині зазору (рис. 2.9, б).

Якщо тілу А надати безперервний рух в один бік, граничний шар рідини, зв'язаний з тілом А силою зчеплення, захоплює за собою поверхневі шари, внаслідок чого в зазорі утворюється безперервний потік рідини, що також використовується для створення рідинного режиму тертя (рис. 2.9, в).

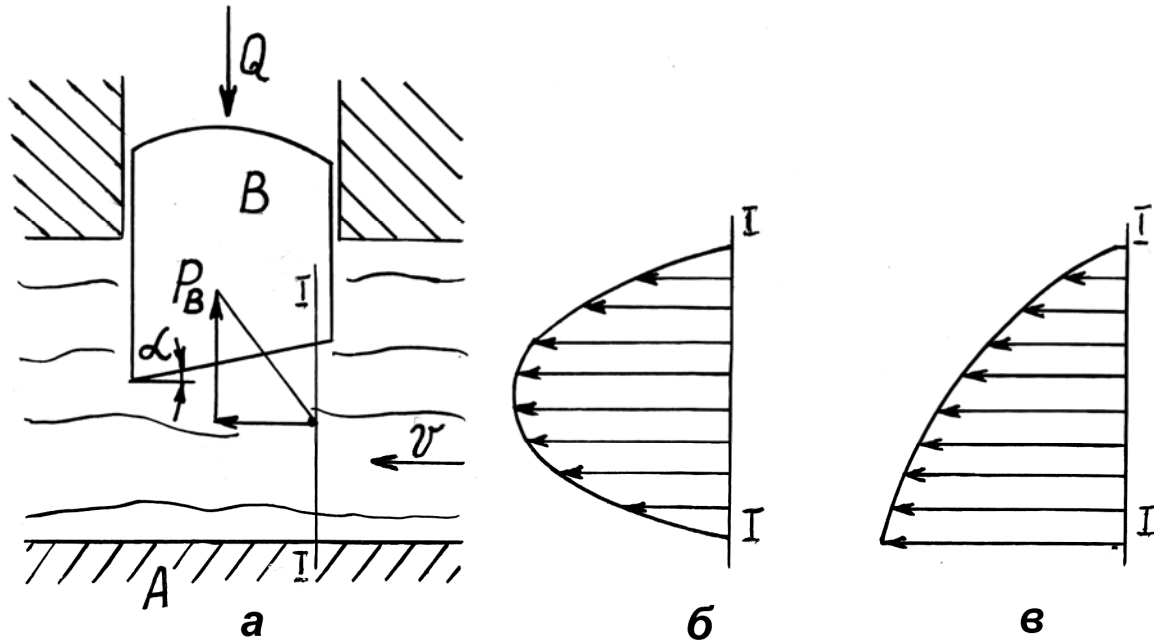


Рис. 2.9 До пояснення виникнення рідинного тертя

2.2.5 Якість поверхонь деталей вузлів тертя

Експлуатаційні властивості деталей машин суттєво залежать від якості їхніх поверхонь, обумовлених сукупністю таких характеристик, як шорсткість і хвилястість, фізико-механічний стан, мікроструктура поверхневого шару, залишкові напруження.

Шорсткість поверхні обумовлена її нерівністю, тобто виступами і впадинами, відстань між якими невелика. Отже, – це сукупність нерівностей з відносно малими кроками, що утворюють мікрорельєф поверхні в межах заданої базової довжини.

Складність явищ, що супроводжують процеси оброблення поверхонь і розмаїття факторів, що впливають на утворення нерівностей, позбавляють їхню форму геометричної правильності. Форма і розміри нерівностей у різних напрямках суттєво відрізняються. На утворення поперечної шорсткості безпосередньо впливають геометрична форма різального інструменту і величина подачі, які не обумовлюють на величину поздовжньої шорсткості. Величина останньої в 2...3 рази менша поперечної шорсткості, за якою оцінюють загальну ступінь шорсткості поверхні.

Опорну довжину профілю складає сума довжин відрізків у межах базової довжини, які обмежують на заданому рівні в оброблюваному матеріалі виступи поверхні профілем, еквідистантним середній лінії, а відносну опорну довжину профілю – відношення опорної довжини профілю до базової довжини. Визначення величини опорної довжини (або профілю опорної поверхні) дуже важливе, тому що при контакті деталі машин дотикаються по реальним поверхням, внаслідок чого виникає необхідність визначати фактичну площу контакту.

2.3 Корозія обладнання переробних і харчових виробництв

2.3.1 Основні види корозії

Корозія - руйнування металів і сплавів під впливом хімічної або фізико-хімічної дії зовнішнього середовища, що починається з поверхні виробу і поступово проникає всередину. Метал при цьому частково або цілком руйнується (розчиняється), або ж продукти корозії можуть утворювати осад на металевій поверхні. Іноді корозійні процеси реалізуються з розпадом структурних складових сплавів, що приводить до зміни їх фізико-механічних властивостей, руйнування зв'язків по межах зерен тощо. За характером взаємодії металу і середовища корозійні процеси можуть бути хімічними та електрохімічними.

Хімічною корозією називається руйнування металів і сплавів, яке зумовлене хімічним впливом зовнішнього середовища. Даний процес не супроводжується проходженням електричного струму між металом і агресивним середовищем, а продукти корозії утворюються на поверхні контакту металу чи сплаву із середовищем, де і відбувається руйнування виробу. Хімічна корозія може спричинятись впливом як рідких реагентів, так і сухих газів при високих температурах. В результаті хімічної дії зовнішнього середовища виріб покривається тонкими плівками продуктів реакції. Частіше всього це оксиди металів. Такі плівки часто мають захисні властивості і протидіють подальшому руйнуванню металевої поверхні.

Теорія захисних плівок розроблена академіком В. Кистяковським, який вважав, що на поверхні контактуючого з повітрям металевого виробу завжди утворюється тонка склоподібна плівка оксидів, і певною мірою захищають його від впливу зовнішнього середовища. Наявністю цієї плівки пояснюється і явище пасивації металів, яке є результатом стрибкоподібного зниження їх активності після оброблення сильними окислювачами. Утворення плівок розпочинається з хімічної реакції між металом і середовищем на межі рідкої і твердої фаз. Подальше зростання товщини плівки може відбуватися в результаті двохсторонньої дифузії через товщу утвореної плівки (рис. 2.10).

Найбільш імовірно, що зона нарощування товщини знаходиться всередині плівки і вона потовщується за рахунок переміщення до неї, з

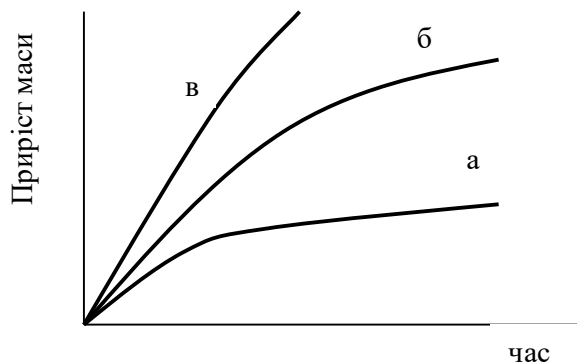


Рис. 2.11 Схема приросту маси плівки при окисленні поверхні металу

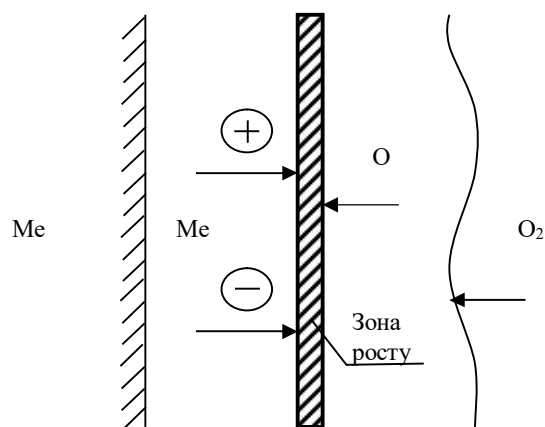


Рис.2.10 Схема утворення захисних плівок на металевій поверхні

одного боку, іонів металу й електронів, а з іншого – атомів кисню, які проникають через пори і тріщини. Якщо плівка, досягнувши деякої товщини, спроможна цілком захищати метал від корозії, то крива приросту маси плівки (рис. 2.11) згодом переходить у горизонтальну пряму (рис. 2.11, а). Якщо ж плівка лише частково захищає поверхню, то крива має параболічну форму (рис. 2.11, б) і якщо вона зовсім не спроможна захищати виріб, то крива переходить у пряму (рис. 2.11, в).

Захисні можливості плівок залежать від їх властивостей, складу, зчеплення з поверхнею виробу, товщини тощо. Вони визначаються зокрема співвідношенням об'єму оксидів ($V_{ок}$) і об'єму металу ($V_{мет}$), з якого утворені ці оксиди. Якщо $V_{ок} \geq V_{мет}$ можливе утворення суцільної плівки, а у протилежному випадку вона переривчаста і не спроможна ефективно захистити метал від корозії. Для алюмінію це співвідношення 1,214, а для хрому – 2,03. Однак цього недостатньо для отримання високоякісної захисної плівки. Необхідно, щоб вона мала високі механічні властивості (міцність і еластичність), добре зчеплення з поверхнею, достатню товщину, що забезпечує найкращі захисні властивості. Так, оксид вольфраму WO_3 має співвідношення $V_{ок}/V_{мет}=3,59$, але цей оксид розрихлений і не забезпечує достатніх захисних властивостей.

Електрохімічна корозія відбувається внаслідок проходження електричного струму через метал і електроліт, у якому він знаходиться. У відповідності з сучасними уявленнями, в металі завжди існують напіввільні електрони, які постійно рухаються та виникають при іонізації атомів металу у вузлах кристалічної ґратки. В деякий момент атом металу втрачає електрон і стає іоном. У наступний момент можливий зворотній процес й іон переходить знову в атом. Така двобічна природа руху частинок металу послужила підставою називати їх іон – атомами (умовне позначення Me^+). Таким чином, у вузлах ґратки розташовані іон – атоми, оточені напіввільними електронами. Між ними існує зв'язок,

який можна кількісно оцінити. Причому, будова поверхневого шару металу дещо відрізняється від внутрішнього. Іон – атоми на поверхні знаходяться під одностороннім впливом внутрішніх атомів і характеризуються ненасиченістю хімічних зв'язків, а тому поверхня спроможна, за деяких визначених умов, адсорбувати атоми і молекули інших речовин.

Електроліти - це розчини, які у своєму складі мають різноманітні іони. Наприклад, при розчиненні у воді кухонної солі NaCl утворюється розчин, який об'єднує катіони (позитивно заряджені іони) натрію Na^+ і аніони (негативно заряджені іони) хлору Cl^- . Ці іони не ізольовані, а зв'язані з деякою кількістю води - гідратовані. Гідратація відбувається завдяки полярній будові молекул води, які утворюють диполі: частина молекули, збагачена киснем, заряджена негативно, а протилежна частина, яка збагачена воднем, заряджена позитивно (рис. 2.12).

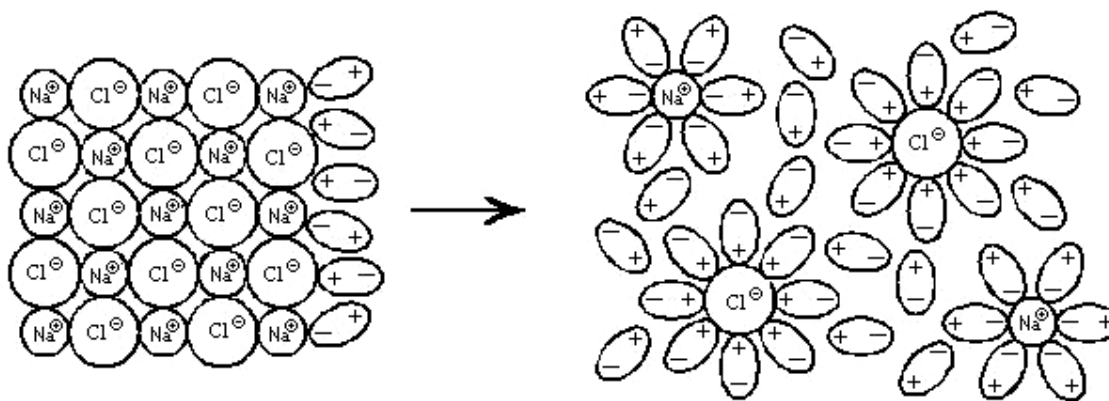


Рис. 2.12 Гідратація катіонів та аніонів повареної солі полярними молекулами води

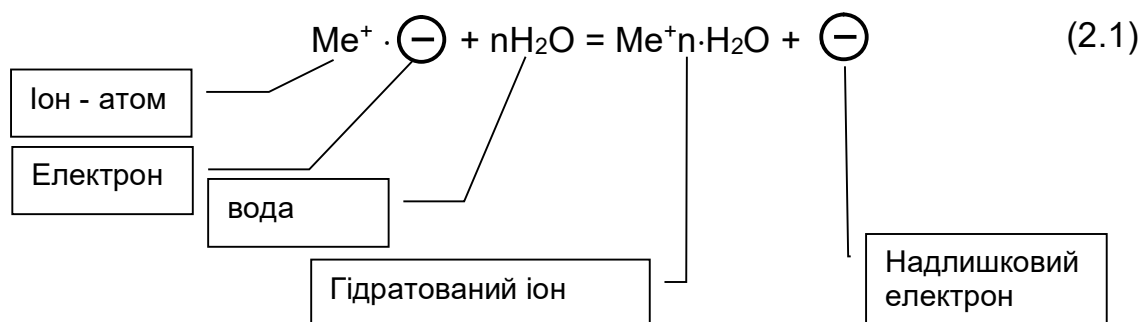
При гідратації катіона молекули води орієнтуються до нього негативно зарядженими сторонами, а при гідратації аніона – навпаки, позитивно зарядженими сторонами. При гідратації звільняється певна кількість енергії, яка називається **енергією гідратації**.

2.3.2 Вплив середовищ – електролітів на корозійні процеси

При контакті металу або сплаву з електролітом можливі два випадки, які доцільно розглянути.

1. *Енергія гідратації більша за енергію зв'язку іон–атома металу з напіввільними електронами.*

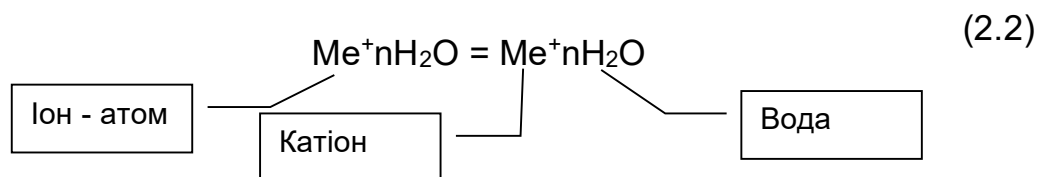
У цьому випадку переміщення іона металу в розчин є термодинамічно можливим. Сили гідратації долають опір потенційного бар'єру, протидіючого виходові іон - атома з металу, спричиняють розривання зв'язків між іон - атомами і електронами. Перейшовши у розчин, іони з'єднуються з диполями води і стають гідратованими іонами:



По мірі утворення гідратованих іонів на металевій поверхні накопичуються надлишкові електрони, які чинять все більший опір відриванню позитивних іонів. Позитивні іони, що перейшли у розчин, створюють також електростатичний опір переходові нових однойменно заряджених іонів і, через певний час, цей процес практично припиниться. В результаті метал зарядиться негативно, а прилеглий до нього прошарок, що складається з гідратованих катіонів металу – позитивно. Таким чином, на межі метал-ектроліт виникає подвійний електричний шар, завдяки чому утворюється певний стрибок потенціалу. Отже, перший із розглянутих випадків відповідає виникненню негативного електродного потенціалу металу (рис. 2.13).

2. Енергія гідратації менша за енергію зв'язку іон-атома з електронами.

В цьому випадку перехід іонів у розчин термодинамічно неможливий. Навпаки, адсорбційні сили ненасиченого поверхневого шару металу будуть спроможні дегідратувати катіони, що знаходяться в розчині, які, адсорбуючись на поверхні, утворюють позитивно заряджений прошарок:



Надлишкові аніони, що залишилися в електроліті, притягуються до поверхні металу внаслідок електростатичної взаємодії і створюють негативно заряджений прошарок. Отже, виникає подвійний електричний шар і стрибок потенціалу, внаслідок чого метал зарядиться позитивно, а електроліт – негативно. Таким чином, метал буде мати позитивний електродний потенціал (рис. 2.14).

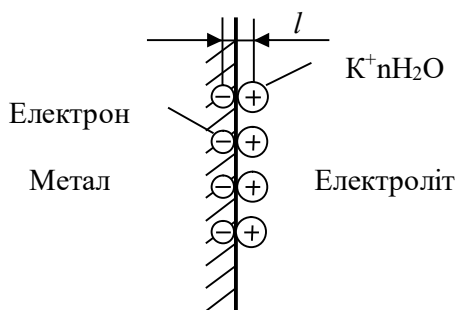


Рис. 2.13 Виникнення негативного електродного потенціалу металу

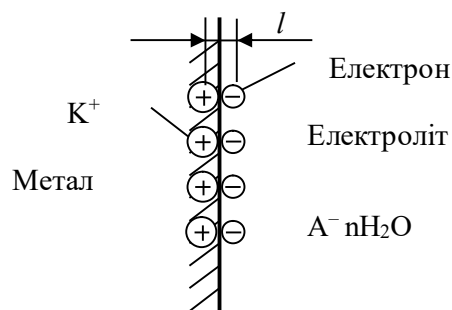


Рис. 2.14 Виникнення позитивного електродного потенціалу металу

Випадок, коли енергія гідратації дорівнює енергії взаємодії іон-атомів з електронами малоімовірний.

Залежно від величини електродних потенціалів метали розташовують у ряд напруг відносно водневого потенціалу, який приймають за нуль. Водневий потенціал вимірюють за допомогою

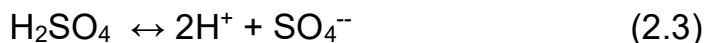
водневого електрода, виготовленого з платинового дроту, зануреного у 1N -розчин HCl, який омивається газоподібним воднем. Метали, для яких енергія гідратації іонів значно перевищує енергію взаємодії іон-атомів з електронами, мають сильно негативні потенціали, легко віддають свої іони і характеризуються низькою корозійною стійкістю (Mg, Zn). Метали, для яких енергія гідратації набагато менша за енергію взаємодії іон-атомів з електронами, характеризуються позитивними потенціалами і мають високу корозійну стійкість (золото, срібло та ін.). Співвідношення потенціалів дозволяє порівнювати корозійну стійкість металів і сплавів. За ними можна оцінювати ефективність захисних покриттів, підбирати матеріали для протекторного захисту обладнання, яке експлуатується в корозійних середовищах, для забезпечення його надійності і довговічності.

При контакті двох металів або сплавів, які мають різні потенціали і занурені в електроліт, утворюється гальванічний елемент. Метал або сплав, що має більш негативний значення потенціал називається анодом (електрод, від якого в зовнішній ланцюг рухаються електрони), а той, що має позитивне значення потенціалу - катодом.

За умовами так званої деполяризації можна виділити два види електрохімічної корозії: з водневою та кисневою деполяризацією.

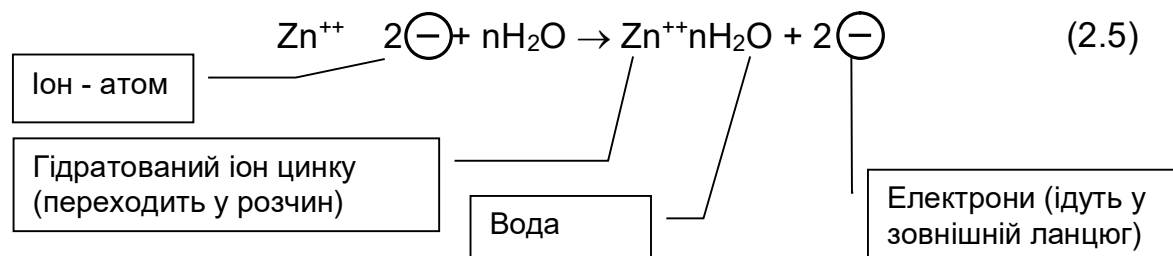
Корозія з водневою деполяризацією характеризується виділенням газоподібного водню. Наприклад, електроди з Zn і Cu зануримо в розчин H₂SO₄ (рис. 2.15). Zn має більш негативний потенціал і буде анодом, а Cu - катодом. Zn руйнується й у розчин переходять його позитивні іони.

Внаслідок дисоціації сірчаної кислоти утворюються іони водню:



Поблизу катода є багато позитивних іонів водню, які з'єднуються з електронами, що наблизились до анода, і утворюють молекули

газоподібного водню та, у вигляді бульбашок, виділяються з поверхні катода:



Вивільнені при цьому електрони рухаються від анода до катода:



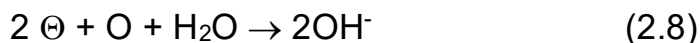
Іони водню служать деполяризаторами, тому що вони відводять електрони, які накопичуються на катоді, і забезпечують відновлення початкового значення потенціалу катода.

Іони SO_4^{--} , з'єднуючись з іонами Zn^{++} , які перейшли в розчин, утворюють продукти корозії - сірчаноокислий цинк:



За цим різновидом корозії руйнується більшість сплавів у кислотах та інших кислих технологічних середовищах харчових і переробних виробництв.

При корозії з кисневою деполяризацією для роботи гальванічного елемента необхідний приток кисню, який потрапляє в електроліт із повітря. Прикладом може служити процес корозії Zn у контакті з Cu у водяному розчині якої-небудь солі, наприклад, NaCl (рис. 2.16). Деполяризація, тобто відвід електронів із катода, відбувається за рахунок взаємодії електронів з киснем і водою за схемою:



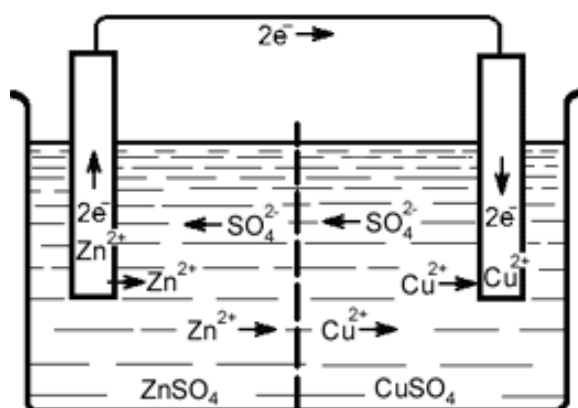


Рис. 2.15 Електродні процеси у гальванічному елементі з водневою деполяризацією

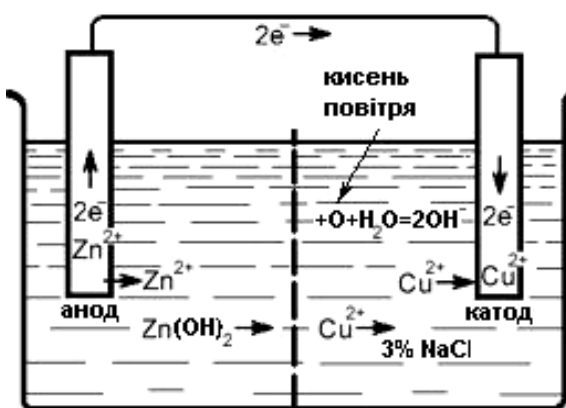


Рис. 2.16 Електродні процеси у гальванічному елементі з кисневою деполяризацією

Поблизу катода виникають гідроксильні іони, які з'єднуються з іонами цинку і утворюють продукт корозії – гідрат окислу цинку:



За таким механізмом кородують у нейтральних середовищах сталі, алюмінієві та деякі інші сплави.

Аналіз роботи гальванічних елементів дозволяє зробити такі основні висновки: 1 – при корозії завжди руйнується анод, тобто електрод із більш негативним потенціалом; 2 – катод при корозії не руйнується, і на ньому відбувається процес деполяризації, тобто відведення електронів; 3 – при водневій деполяризації електрони нейтралізуються іонами водню і з поверхні катода виділяється газоподібний водень; 4 – при кисневій деполяризації електрони відводяться киснем, розчиненим в електроліті, який потрапляє з повітря.

Деполяризація призводить до значного зближення величини потенціалів електродів, різниця потенціалів зменшується, сила струму падає і корозія уповільнюється. Отже, розрахувати швидкість корозійного руйнування за початковими значеннями потенціалів не можна, тому що у зв'язку з деполяризацією швидкість корозії може значно уповільнюватись. Корозія часто реалізується за змішаним механізмом:

деполяризація здійснюється частково за рахунок виділення водню, а частково - за рахунок поглинання кисню.

Розглянуті схеми роботи гальванічних пар лежать в основі електрохімічної корозії технічних сплавів. Якщо анодна складова розташована на поверхні, то корозія буде рівномірною, поверхневою. Якщо ж анодна складова розташовується по межах зерен-катодів, то може виникнути набагато небезпечніша міжкристалітна корозія. Знаючи структуру сплаву, потенціали окремих складових, їх відносну кількість, розміри і форму їх розподілу можна прогнозувати характер та інтенсивність корозійного руйнування і вибрати методи захисту. Електрохімічна корозія розвивається особливо інтенсивно у випадку контакту деталей з різномірних металів і сплавів, що мають різко відмінні електродні потенціали (сталь у контакті з міддю або магнієвими сплавами).

2.3.3 Вплив деяких чинників на корозійне руйнування металів

2.3.3.1 Пасивування металів

Пасивування металів називають утворення на їх поверхні захисного оксидного прошарку, що запобігає розчиненню. Воно полягає в зміщенні електродного потенціалу металу в позитивну сторону. Наприклад, залізо в активному стані має потенціал - $0,4 \div 0,5\text{В}$, а в пасивному стані його потенціал зміщується до $+1\text{В}$.

Щоб забезпечити пасивний стан металевої поверхні необхідно змінити склад середовища, зовнішні умови, наприклад, температуру, або природу металу чи сплаву. Здатність металів до пасивації різна. Наприклад, нікель пасивується легше, ніж залізо. Для забезпечення стану пасивності металу при підвищеній температурі треба підвищити концентрацію пасиватора.

Введенням у твердий розчин металів, що слабо пасивуються (Fe), елементів які пасивуються сильно (Cr, Si) можна одержати сплав, що наближається за корозійною стійкістю до легуючого елемента, навіть якщо концентрація останнього буде зовсім малою. На явищі пасивації засноване створення багатьох корозійностійких сплавів.

Депасивація металу може відбуватися в результаті відновлювальних процесів, механічного руйнування поверхневого захисного шару, підвищення температури розчину, дії деяких активних іонів (Cl^- , SO_4^{2-} , OH^- та ін.). В присутності Cl^- розчинення металу часто відбувається не по всій поверхні, а на окремих ділянках (точкова корозія). Швидкість корозійного процесу залежить не лише від термодинамічної стійкості металів і сплавів та їх спроможності до утворення захисних плівок, але і від зовнішніх та внутрішніх чинників. До зовнішніх чинників відносять природу, склад і концентрацію агресивного середовища, температуру, тиск, швидкість руху потоку тощо. До внутрішніх чинників відносять ті, що впливають із природи і будови сплаву, методів його оброблення, структурних особливостей, розташування в таблиці Менделєєва, внутрішніх напружень тощо.

2.3.2.2 Мікроструктура сплаву

При строго однорідній будові сплаву чи металу мікрогальванічні пари не утворюються і немає руйнування від електрохімічної корозії. Це характерно для чистих металів і сплавів, які мають будову однорідного твердого розчину. Аморфні сплави також стійкі в умовах електрохімічної корозії. При різномірній будові сплаву електрохімічна корозія тим інтенсивніша, чим більша різниця потенціалів його окремих мікроскладових.

Термічне оброблення може суттєво змінити будову сплаву і ступінь його корозійної стійкості. Так, оброблення, яке гомогенізує сплав, робить

його більш корозійностійким, наприклад, загартування дуралюмінію і нержавіючої сталі. Нагрівання сплаву, що має структуру пересиченого твердого розчину, може призвести до його розпаду і погіршення антикорозійних властивостей. Наприклад, при відпалюванні загартованого дуралюмінію з твердого розчину виділяються частинки CuAl_2 і MgSi , однорідність сплаву порушується і корозійна стійкість суттєво зменшується.

2.3.3.3 Напруження

При збільшенні внутрішніх напружень потенціал сплаву стає більш негативним. Тому, в нерівномірно навантаженій деталі, найімовірнішою буде електрохімічна корозія її максимально напружених ділянок. За таких умов сплав, стійкий до корозії, може руйнуватися в умовах корозії під напругою.

Пластична деформація супроводжується зміною будови металу або сплаву і появою в тілі мікропор, які сприяють проникненню вологи та знижують їх опір корозії.

За наявності агресивного середовища в умовах змінного навантаження проявляється корозійна втома, що супроводжується утворенням і розвитком тріщин від поверхні деталі всередину (рис. 2.17). Корозійне середовище проникає у ці тріщини і полегшує руйнування. Такі умови дуже небезпечні, тому що руйнування може відбуватися при напруженнях, які значно менші за межу втомної міцності металевої деталі.

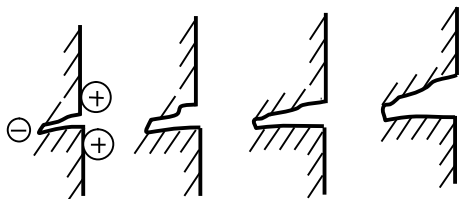


Рис. 2.17 Руйнування поверхні металу в умовах корозійної втоми

На ушкодженій ділянці, де концентруються напруження, матеріал набуває більш негативного потенціалу і така ділянка стає анодом. Тому

корозійне руйнування відбувається саме у цьому місці і тріщина прогресивно розвивається у глибину деталі. Найважливішими зовнішніми чинниками розтріскування є вид середовища, його агресивність і температура.

При корозії у водяних середовищах велике значення має їхній водневий показник рН, тобто рівень концентрації в них іонів водню. Кислі середовища особливо небезпечні для магнію, алюмінію, заліза і цинку. У лужних середовищах легко руйнуються алюміній і цинк, а залізні та магнієві сплави більш стійкі.

2.3.4 Види корозійних руйнувань

Розрізняють такі основні різновиди корозії рівномірна, місцева, міжкристалітна.

При рівномірній корозії (рис. 2.18,а) руйнування відбувається майже рівномірно по всій поверхні деталі. **При місцевій** (рис. 2.18,б) характерне ураженням окремих ділянок поверхні. У цьому випадку корозійні процеси виникають в певних ділянках і поступово розвиваються по всій деталі під впливом середовища. Різновидами місцевої корозії є точкова корозія і корозія у формі глибоких раковин – корозійних виразок. **Міжкристалітна** корозія (рис. 2.18,в) поширюється по межах зерен, які самі майже не руйнуються. Це найбільш небезпечний вид корозії, тому що руйнування швидко проникає в глибину металу і його важко виявити при візуальному обстеженні деталі. Така корозія призводить до різкого зниження міцності і пластичності сплаву, а руйнування деталі відбувається раптово (рис. 2.18, г). До міжкристалітної корозії схильні високохромисті і хромонікелеві нержавіючі сталі, дуралюміній та ін. Схильність до міжкристалітної корозії у багатьох випадках проявляють нелеговані вуглецеві сталі в напруженому стані під дією деяких агресивних технологічних середовищ харчових і переробних виробництв. Сталь із великим вмістом вуглецю також схильна до міжкристалітної корозії. Особливо велика небезпека її виникнення в зоні зварних швів.

Для міжкристалітної корозії характерне корозійне розтріскування, при якому в металі чи сплаві під одночасною дією корозійного середовища і механічних розтягуючих напружень утворюються місцеві тріщини, які швидко розповсюджуються і приводять до руйнування деталей машин і обладнання.

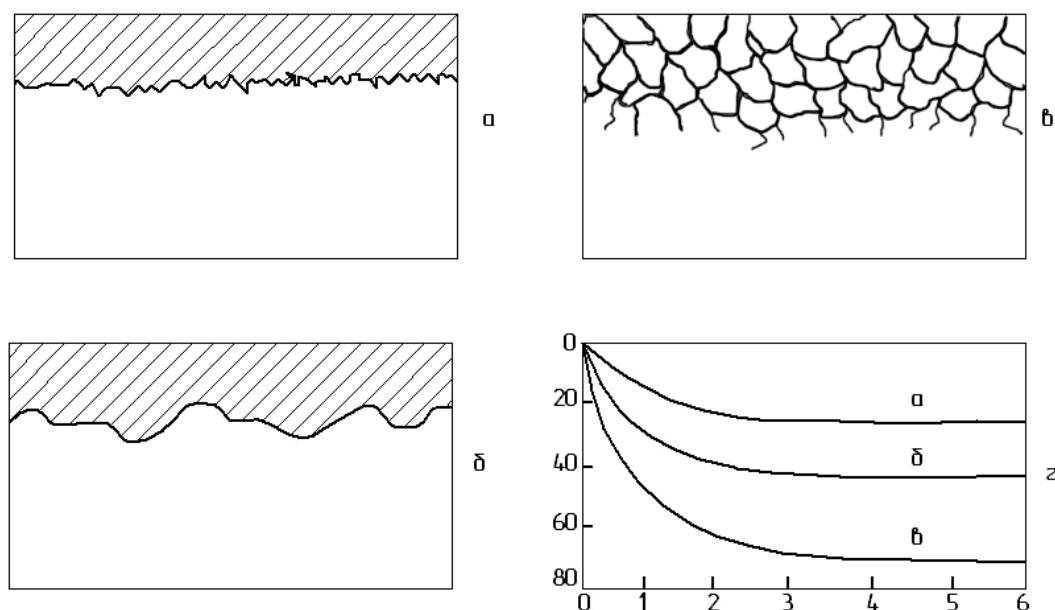


Рис. 2.18 Види корозії металевих сплавів:
а - рівномірна, б - місцева, в - міжкристалітна і графік залежності втрати
міцності сталей від втрати маси

Найбільш поширеним поясненням механізму міжкристалітної корозії хромонікелевих аустенітних нержавіючих і високохромистих сталей є зменшення вмісту хрому на межах зерен.

2.3.5 Корозія в умовах основних харчових виробництв

2.3.5.1 Корозія хлібопекарського устаткування

Напівфабрикати - рідкі дріжджі і затори для їхнього приготування, заквашені молочно - кислими бактеріями, житні закваски, житнє тісто, опара і тісто з пшеничного борошна є середовищами, у яких накопичуються продукти зброджування. Це етиловий спирт, вуглекислий газ, молочна, пропіонова, янтарна, яблучна, винна, лимонна, мурашина, щавлева, оцтова та інші органічні кислоти, деякі альдегіди і складні жири. Основну роль відіграють молочна й оцтова кислоти, на яких припадає

~90% кислотності цих напівфабрикатів, що коливається від рН 6,0 до рН 4,2. Тому такі середовища є агресивними.

О. Авдеєва досліджувала корозійну стійкість деяких матеріалів у заквасці для житнього тіста при температурі 22 °С та в борошняному кислому пшеничному заторі при температурі 54 °С, рН 3,5 (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Корозійна стійкість матеріалів у заквасці для житнього тіста

Матеріал	Втрати, г/(м ² ·год)	Матеріал	Втрати, г/(м ² ·год)
Сталь вуглецева Ст3 і Ст0	0,2630	Алюміній А-00	0
Чавун сірий	0,2266	Алюміній А-1	0
Сталь Х17	0	Чавун з 17 % Cr	0
Сталь 12Х18Н9Т	0	Фторопласт	0
Сталь 2Х18Н9Т+2%Мо	0	Лак ХС76	0

З табл. 2.1 видно, що вуглецева сталь і сірий чавун малостійкі, а інші матеріали, що випробовувалися, абсолютно стійкі. Тому лак ХС76 був рекомендований для захисту бачків для води (до 70 °С), у мірниках солоної води з 25% розчином NaCl, апаратури для кислих дріжджів тощо.

У табл. 2.2 приведені результати випробувань матеріалів у кислому пшеничному заторі.

Таблица 2.2

Корозійна стійкість матеріалів у кислому пшеничному заторі, t=54°С, рН3,5

Матеріал	Втрати маси, г/(м ² ·год.)
Сталь вуглецева Ст3, Ст0	0,8524
Чавун сірий	0,8344
Мідь	0,0558
Сталь 12Х18Н9Т	0
Сталь Х17Т	0

Алюміній	0,1177
Чавун із 17 % Cr	0
Фторопласт	0
Лак ХС76	0

Результати випробувань показують, що вуглецеві сталі, сірий чавун, мідь і алюміній у кислому заторі нестійкі. Сталь Ст3 і сірий чавун забруднюють напівфабрикати продуктами корозії, тому в апаратурі хлібопекарського виробництва без захисних покриттів їх застосовувати не можна.

2.3.5.2 Корозія металів у спиртовій промисловості

Етиловий спирт і його напівфабрикати (напівпродукти) є корозійно-активними середовищами по відношенню до чорних металів.

Основним устаткуванням спиртового виробництва є брагоперегінні і ректифікаційні колони, які раніше виготовлялися з червоної міді. Термін служби мідних апаратів складав 30 – 50 років, але через дефіцитність міді їх почали виготовляти із сірого чавуну. Такі апарати внаслідок корозії вже через 2 роки виходять з ладу, а продукти корозії значно погіршують якість спирту. Корозії піддається також обладнання дріжджового, бродильного та інших відділень спиртзаводів.

О. Авдеєва досліджувала стійкість ряду матеріалів у середовищах спиртового виробництва з рН (4,2÷5,5), які були у рідкій і газоподібній фазах при 80 – 100 °С. Випробовувалися: мідь червона лужена, сталь Ст3, нержавіючі сталі (10Х13, 10Х17 і 12Х18Н9Т), алюміній А-00.

Кращою виявилася сталь 12Х18Н9Т, що не піддається міжкристалітній корозії, пластична, добре зварюється і дає корозійностійкий зварний шов. У сталей 10Х13 і 10Х17 спостерігалася слабо виражена точкова корозія і, хоча вони дешевші, але застосування їх обмежене у зв'язку з додатковими витратами на зварювання.

Алюміній і мідь менш стійкі, на них спостерігається рівномірна корозія. Алюміній і його сплави можна застосовувати тільки для допоміжного обладнання, а для виготовлення ректифікаційних і брагоперегонних колон вони непридатні.

Мідь дефіцитна і, крім того, у брагоперегонних апаратах іони міді діють токсично на дріжджі, додають розчинам спирту неприємний смак і змінюють їх властивості.

Чорні метали нестійкі і нерентабельні для виготовлення основного устаткування. Їх можна застосовувати тільки з використанням емалевих та інших захисних покриттів.

2.3.5.3 Корозія обладнання лікєро-горілочаних заводів

О. Авдєєва досліджувала нержавіючі сталі, сталь Ст3 і емальовану сталь Ст3, сірий чавун і сталь Ст3, плаковані сталлю 12Х18Н9Т в умовах корозійної дії середовищ галузі.

Як корозійні середовища застосовували горілки і лікєри з вмістом: спирту 20 – 40%, цукру 3 – 44 г/100 мл, сухих речовин 7 – 45 г/100 мл і воду.

Сталь Ст3 виявилася занадто малостійкою. Навіть плакування її нержавіючою сталлю завтовшки 127 – 140 мкм не дали позитивних результатів, тому що вони були пористими і корозійне середовище проникало до основи, внаслідок чого вона інтенсивно руйнувалась. Сталь 12Х18Н9Т виявилася найстійкішою. Дещо меншу стійкість мала сталь 10Х17Т. Добрі результати показали при випробуваннях в усіх середовищах емалеві покриття.

2.3.5.4 Корозія в пивоварному виробництві

Хімічний склад пива може коливатися залежно від його сорту і вихідної сировини. З практики відомо, що пиво і сусло - агресивні

середовища, в яких чорні метали піддаються корозії, продукти якої погіршують якість пива, викликають його помутніння і погіршують смак.

Основні апарати, що піддаються корозії – замочні чани, заторні котли, сусловарочні котли, фільтраційні чани, теплообмінники, насоси, бродильні чани і танки, лагерні танки.

О. Авдєєва, досліджуючи корозійну стійкість ряду металів і сплавів встановила, що для апаратів, у яких зберігається сусло і пиво, сірий чавун і сталі Ст3 і Ст0 непридатні, тому що, руйнуючись, вони утворюють каламуть і осад, що надають неприємний смак пиву. Інші випробувані метали – алюміній А-1, мідь, сталі 10Х17Т і 12Х18Н9Т, хромистий чавун (17% Cr) і покриття, захищені лаком ХС76, більш стійкі і не впливають на якість пива. Алюміній був більш стійким у пиві, ніж у суслі.

При виготовленні замочних чанів для виробництва солоду найбільш стійкими виявилися сталі 12Х18Н9Т і 10Х17Т. У разі виготовлення їх із м'якої вуглецевої сталі або залізобетону внутрішню поверхню треба покривати епоксидними смолами.

Апаратуру для отримання пивного сусла рекомендується виробляти з нержавіючої сталі, міді, фосфористої бронзи і деяких інших матеріалів, корозійностійких у пивному суслі.

Зброджування сусла пивними дріжджами здійснюють в бродильних чанах, де наприкінці процесу рН знижується до 4,5÷4,3. Потім молоде пиво надходить у лагерні танки і лагерні бочки на доброджування. Широко застосовують залізобетонні, сталеві емальовані або захищені покриттями танки, а також танки з нержавіючої сталі. Сталеві або залізобетонні танки покривають усередині пивною смолкою або спеціальними лаками. Смолкою покривають і пивні бочки. Найбільш поширені у пивоварінні алюмінієві танки.

Про агресивні властивості середовищ пивоварного виробництва можна зробити такі загальні висновки.

1. У середовищах пивоварного виробництва сталь Ст3 піддається нерівномірному корозійному руйнуванню, а сірий чавун – структурно-вибірковій корозії.

2. Чорні метали в суслі нестійкі і погіршують якість пива.

3. Алюміній А-1 абсолютно стійкий в умовах зброджування сусла і застосовується в лагерних танках і танках для транспортування пива.

4. Корозійностійкі в цих умовах мідь, латунь, фосфористая бронза, олово, нержавіючі сталі 10Х17Т і 12Х18Н9Т та хромистий чавун (17% Cr).

5. Від значної кількості кольорових металів треба, по можливості, відмовлятися через їх дефіцитність і велику вартість.

6. Емалеві покриття добре захищають сталі від корозії.

7. Для захисту сталевих і залізобетонних місткостей крім пивного каменю, пивної смолки, бітуму, можна рекомендувати лак ХС76 та епоксидні смоли.

2.4 Зношування в елементах технічних систем

2.4.1 Природа і класифікація процесів зношування

Найхарактернішими процесами та явищами, що супроводжують зношування (взаємодія мікрорельєфів та виникнення фрикційних зв'язків) є наступні.

1. Високі локальні тиски, що можуть досягти значень, які відповідають фазовим перетворенням у поверхневих шарах, або призводять до розплавлення металу (виникнення "містків зварювання"). Поєднання повторних механічних і термічних напружень може спричинити появу мікротріщин, змикання яких на деякій глибині призведе до відділення матеріалу.

2. Проходження хіміко-термічних процесів, таких як: утворення плівок окису або інших хімічних сполук; розчинення одного із тіл, що труться під впливом механотермічних процесів в зоні контакту

(наприклад, досліджуваний акад. В.А. Білим процес розчинення металу полімером), окрихлювання поверхневого шару під дією атомарного водню, що виділяється із змащення або із одного із тіл тощо. Ці явища приводять до того, що властивості поверхневого шару, як правило, різко відрізняються від властивостей основного матеріалу, а саме цей шар і руйнується. Проф. Б.І. Костецький вважає, що „головною особливістю нормального зношування є відсутність будь-яких видів руйнування основного металу”.

3. Вплив на тертя і зношування змащення, що відіграє виняткову роль і в багатьох випадках визначає інтенсивність зношування. Окрім позитивної дії, змащення, потрапляючи в мікротріщини, може викликати розклинювання, що посилює руйнування поверхневих шарів.

4. Перенесення матеріалів з однієї поверхні на іншу. Це перенесення плівки більш пластичнішого тіла на більш тверде внаслідок молекулярного схоплення (намащування), перенесення сталі або чавуну через наводнення їх поверхневих шарів на м'яке контртіло (бронзу, пластмасу) і так зване вибірне атомарне перенесення, яке описане Д. Гаркуновим та І. Крагельським.

Останнє явище спостерігається під час тертя пари "сталь - сплав міді" полягає у виділенні міді внаслідок руйнування міжатомарних зв'язків з наступним перенесенням міді на поверхню сталі і утворенням тоненького шару міді, який не виноситься із зони контакту і переходить із однієї поверхні на іншу, що надає високої зносостійкості вузлові тертя,

Відповідно до стандарту (ГОСТ16429-70) всі види зношування можна поділити на три основні групи (рис. 2.19).

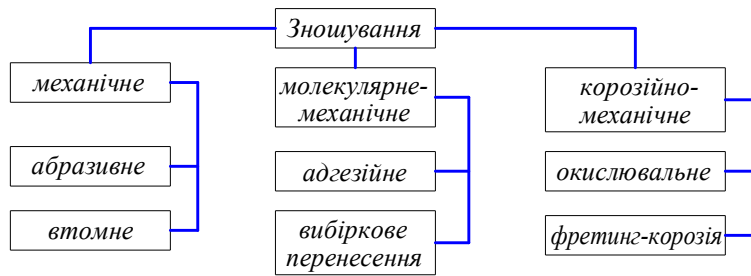


Рис. 2.19 Класифікація видів зношування

Механічне зношування - це зношування внаслідок тільки механічних взаємодій матеріалів виробу, *молекулярно-механічне* зношування супроводжується також впливом молекулярних або атомарних сил; *корозійно-механічне* зношування відбувається під час тертя матеріалу, що вступив у хімічну взаємодію із середовищем.

Абразивне зношування - це зношування, при якому на поверхнях, які труться, є абразивні частинки, що руйнують поверхню за рахунок різання та дряпання із відділенням матеріалу.

Втомне зношування є наслідком циклічного впливу змінних напружень на мікровиступи поверхонь, що труться. Відділятися частинки можуть також внаслідок наклепування поверхневого шару, який стає крихким і руйнується (інколи його називають зношуванням під час крихкого руйнування).

Адгезійне зношування пов'язане із виникненням у локальних зонах контакту поверхонь інтенсивної молекулярної (адгезійної) взаємодії, сили якої перевищують міцність зв'язків матеріалу поверхневих шарів із основним матеріалом.

Зношування в умовах вибіркового перенесення, навпаки, характеризується атомарними явищами в зоні контакту і призводить до виникнення практично беззношуваних пар. Утворений на поверхні внаслідок своєрідних механо-хімічних процесів м'який і тонкий шар збагачений, наприклад, міддю, забезпечує мінімальне тертя і сприяє рівномірному розподілу тисків по поверхні тертя.

Окислювальне зношування має місце при наявності на поверхні тертя захисних плівок, що утворилися внаслідок взаємодії матеріалу із киснем,

Зношування під час фретинг-корозії відбувається при відносних коливальних переміщеннях металевих поверхонь, що контактують, внаслідок вібрації або періодичних деформацій елементів конструкції. На ділянках, пошкоджених фретинг-корозією, спостерігаються захоплювання, абразивне руйнування, втомно-корозійні явища.

Основними параметрами, що впливають на зношування, є:

- 1) значення питомого тиску та швидкість відносних переміщень;
- 2) механічні характеристики матеріалів пари тертя;
- 3) структура матеріалів пари тертя;
- 4) вид тертя - ковзання чи кочення та наявність змащування, властивості мастильних матеріалів.

Так, наприклад, для чистих металів і термічно необроблених сталей існує лінійна залежність між їх твердістю та зносостійкістю:

$$\varepsilon = bH,$$

де ε - відносна зносостійкість абразивного зношування; H - твердість за Брінелем; b - коефіцієнт пропорційності ($b=7,3$).

2.4.2 Вплив на зношування змащування

2.4.2.1 Вплив змащування

Значний вплив змащування на інтенсивність зношування пар тертя загальновідомий. При сухому терті швидкість зношування найбільша, оскільки створюються умови для виникнення молекулярної взаємодії і таких явищ, як підвищення температури, концентрації тисків на окремих ділянках, що інтенсифікує руйнування поверхневих шарів. Плануючи роботу деталей машин, намагаються уникнути сухого тертя.

Найдопустимішим з погляду запобігання зношуванню є рідинне

тертя або газове змащування. Шар мастила запобігає безпосередньому контакту двох поверхонь, завдяки чому не тільки значно зменшуються сили тертя, але й створюються умови для усунення або різкого зменшення зношування поверхонь.

Рідинне тертя, при якому поверхні, що труться, повністю розділені шаром мастила, може бути забезпечене двома основними методами - гідродинамічним і гідростатичним (подавання мастила під тиском). Якщо розділення поверхонь, що труться, мастилом, надійне, зношування практично є винятком.

В останні роки з'явилися високообертові вузли (шпинделі внутрішньо-шліфувальних верстатів, малогабаритні турбіни) на аеродинамічних опорах, а також поступальні пари на повітряних (аеростатичних) подушках, в яких поверхні розділяє шар повітря, що служить змащуванням.

Найхарактернішим для більшості вузлів тертя є граничне тертя, при якому на тертя і зношування впливають як характеристики спряжених матеріалів, так і властивості змащувального шару. Зношування може виникати у місцях локальних розривів олійної плівки і внаслідок передавання зусиль через цю плівку, яка відіграє роль еластичної прокладки і має деякі властивості квазітвердого тіла.

2.4.2.2 Підбір мастила

В умовах граничного тертя для змащення мастило повинне, по-перше, утворювати міцну поверхневу плівку, що пов'язано із впливом змочування та налипання, і, по-друге, взаємодіяти із поверхневими шарами матеріалу і змінювати (модифікувати) їх структуру і властивості.

Як змащувальні матеріали у машинах застосовуються мінеральні мастила, густі (консистентні), а часто і тверді мастила. Останнім часом переважно використовуються мінеральні мастила, що найпридатніші для

змащування відповідальних швидкохідних спряжень і полегшують централізоване змащення. Підбір виду змащування залежить, у першу чергу, від швидкостей відносного ковзання і навантажень, що діють в спряженнях. За інших однакових умов, чим вищою є швидкість відносного ковзання і чим меншим є тиск у спряженні, тим меншу в'язкість повинне мати мастило.

2.4.2.3 Тверді мастила

В останні роки вузли тертя сучасних машин працюють у нових умовах - у вакуумі, при високих і низьких температурах, при великих тисках і швидкостях, при дії агресивних середовищ тощо. Ускладнює роботу також наявність у машині важкодоступних для змащування місць або неможливість використання рідкого мастила для машин текстильної та харчової промисловостей. Це привело до розроблення нових видів змащування. Оскільки рідке та консистентне змащування є непридатними для вказаних потреб, застосовують тверді мастила, що використовуються або у вигляді тонких покриттів, або як структурні складові підшипникових сплавів, або як порошки та присадки до звичайних мастил. Застосовують також просочування пластмас тощо. Як матеріали для твердих мастил зазвичай використовують графіт, дисульфід молібдену, полімери (фторопласти, графітопласти, капрон), металокерамічні композиції, пластичні метали (срібло, золото, свинець, індій), металічні солі високомолекулярних жирних та смоляних кислот (мила).

2.4.3 Зношування спряжень

2.4.3.1 Класифікація спряжень за умовами зношування

Основною характеристикою зношування деталі є лінійне

зношування, що вимірюється за напрямом, перпендикулярним до поверхні тертя. Внаслідок певних причин (різні значення питомих тисків і швидкостей відносного ковзання по поверхні тертя, неоднакове потрапляння абразивів тощо) зношування деталі може бути нерівномірним. Тому для повної характеристики зношування деталі необхідно знати його розподіл по поверхні тертя $U(x;y)$, тобто форму зношеної поверхні.

Внаслідок зношування спряжених деталей змінюється їх відносне розташування, яке будемо називати зношуванням спряження.

Зношування спряження є тією геометричною характеристикою, яка безпосередньо пов'язана із втратою машиною або механізмом їх початкових службових властивостей. Воно є вихідним параметром спряження. Умова дотику визначає характерну особливість зношування спряжень - при довільній формі зношуваних поверхонь деталей спостерігається певний контакт спряжених поверхонь.

Залежно від характеру можливого зближення деталей під час зношування їх поверхонь всі спряження поділяються на два типи. У спряженнях I-го типу є додаткові незношувані або малозношувані напрямні, що забезпечують зближення деталей під час зношування тільки в заданому напрямку $x-x$. У спряженнях II-го типу зношувані деталі само встановлюються, а їх взаємне розташування залежить від форми зношеної поверхні. У таких спряженнях зношування зазвичай сильніше впливає на функціональні властивості пари. Усі спряження можна також поділити на дві категорії:

а) ті, на зношування яких накладається умова дотикання поверхонь (1 і 2, іноді 3 група), і

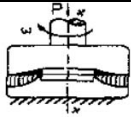
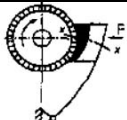
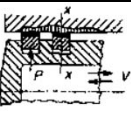
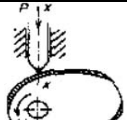
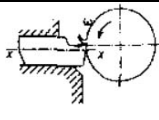
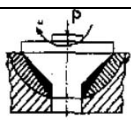
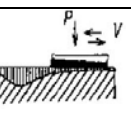
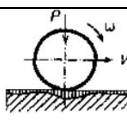
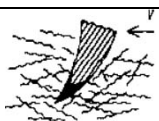
в) у яких під час зношування умови контакту є змінними.

Окрім того, в класифікації всі спряження розділені на п'ять груп залежно від сталості умов тертя і зношування для розміщених на одній

траєкторії точок спряжених поверхонь та за можливістю взаємного зближення під час зношування (табл. 2.4).

У спряжень I-ї групи точки кожного із тіл, що розташовані на одній траєкторії, мають однакові умови зношування. Наприклад, під час зношування поверхонь обертання (дисків, конусів) всі точки, що розміщені на колі даного радіуса, мають однакові швидкості ковзання, питомі тиски і тривалість зношування. Тому їх зношування буде однаковим, і для визначення форми зношеної поверхні достатньо розглянути осьовий переріз.

Таблиця 2.4

Тип	А		В		
I	1-а група	2-а група	3-я група	4-а група	5-а група
					
	Конічні гальма, фрикційн і муфти	Ходовий гвинт-гайка, колодок і гальма	Поршневі кільця-гільза циліндра	Зубчасте зачеплення, кулачок-штовхач	Різальний інструмент, зуб ковша екскаватора
	Закони зношування				
	$\gamma_1 = k_1 \cdot \rho$ $m \cdot \sigma$ $\gamma_2 = k_2 \cdot \rho$ $m \cdot \sigma$	$\gamma_1 = k_1 \cdot \rho$ $m \cdot \sigma$ $\gamma_2 = k_2 \cdot \rho$ $m \cdot \sigma$	$\frac{dU}{dt} = k \cdot v$ $[p = f(U)]$	Зубчасте зачеплення $U_v = k \cdot \rho \cdot S$ Кулачок-штовхач $\gamma = k \cdot \sigma_k^m \cdot v_r$	$dU =$ $= k[p = f(U)] \cdot v \cdot dt =$ $= k \frac{N}{h_a} \cdot v \cdot dt$
II					
	Диски	Вал-	Поступа-	Колесо-	Леміші плугів,

	фрикцій- них муфт	підшип- ник ков- зання, колодко- ві гальма, кругові напрявні	льні напрявні ковзання, куліса- камінь	рейка, підшипники, напрявні кочення	різальний інструмент із самовстанов- ленням
	Закони зношування				
	$\gamma_1 = k_1 \cdot \rho$ $m \cdot \sigma$ $\gamma_2 = k_2 \cdot \rho$ $m \cdot \sigma$	$\gamma_1 = k_1 \cdot \rho$ $m \cdot \sigma$ $\gamma_2 = k_2 \cdot \rho$ $m \cdot \sigma$	$\gamma_1 = k_1 \cdot \rho^m$ $\cdot \sigma$ $\gamma_2 = k_2 \cdot \rho^m$ $\cdot \sigma$	$\gamma_1 = k_1 \cdot \rho^m \cdot \sigma$ $\gamma_2 = k_2 \cdot \rho^m \cdot \sigma$	$dU = k[p = f(U)]$ $v dt$

Примітка:

γ_1 і γ_2 - швидкості зношування матеріалів деталей спряження,

k_1 і k_2 - коефіцієнти зношування матеріалів деталей спряження,

ρ - тиск на поверхні тертя,

v – швидкість відносного ковзання деталей спряження,

U - зношування спряження,

U_0 – лінійне зношування профілю зубця,

S – шлях тертя, що здійснюється точками контакту зубців за один оберт зубчастого колеса,

σ_k - контактні напруження,

N_1 – складова сили різання,

h та a – відповідно висота і ширина фаски на задній поверхні різця.

Коли існують зовнішні чинники, які змінюють умови зношування для точок, що лежать на одній траєкторії, то дане спряження не буде належати до 1-ї групи.

До 2-ї групи належать спряження, у яких зберігаються сталими умови зношування для всіх точок одного тіла, що лежать на даній траєкторії. Тому тільки одна поверхня має умови для рівномірного зношування в даному перерізі. Наприклад, розглядаючи у поперечному перерізі спряження типу вал - підшипник ковзання або барабан - гальмівна колодка бачимо, що всі точки тіла, яке обертається, за кожний його оберт проходять через однакові значення зусиль за будь-якої епюри тисків. Також, якщо в спряженні I-II сила діє нецентрально, то для точок нерухомої деталі, розміщених на одній траєкторії, тиски будуть неоднаковими і зношування цієї деталі буде нерівномірним. Дане спряження буде належати до 2-ї групи.

У спряжень 3-ї та 4-ї груп умови зношування не зберігаються сталими для всіх точок обох тіл, отже, тут є більші можливості для виникнення нерівномірного зношування поверхонь. До 3-ї групи належать спряження із нижчими парами, а до 4-ї - із вищими парами,

До спряжень 5-ї групи належать спряження, у яких поверхня деталі контактує із твердим середовищем – ґрунтом, породою, оброблюваною деталлю. В цьому випадку вивчають тільки зношування однієї поверхні, на яку діє абразивне чи інше середовище, від характеру взаємодії із яким (епюри навантажень та швидкостей) буде залежати форма зношеної поверхні.

Таблиця 2.5

**Поділ спряжень за можливістю взаємозближення під час
зношування поверхонь**

Група	Тип спряження	
	I – (напряг х-х задано)	II – (самовстановлення)
1	Конічні гальма і фрикційні муфти	Диски фрикційних муфт
2	Ходовий гвинт-гайка, колодкові гальма (із жорстким закріпленням)	Вал-підшипник ковзання і гальма колодкові (із само-встановлюванням колодок); кругові напрямні ковзання

		(ексцентричне навантаження)
3	Поршневі кільця-гільза циліндра	Поступальні напрямні ковзання, куліса-камінь
4	Зубчасте зачеплення, кулачок-штовхач	Колесо-рейка, підшипники і напрямні кочення
5	Різальний інструмент із жорстким закріпленням. Зуб ковша екскаватора	Леміші плугів, різальний інструмент із самовстановлюванням

2.4.3.2 Основні етапи розрахунку спряжень на зношування

Розглянемо в загальному вигляді послідовність розрахунку параметрів зношуваного спряження, схема якого зображена на рис. 2.22.

Закони зношування, знання яких є необхідними для вирішення поставленого завдання, повинні для даних умов визначити співвідношення між швидкістю зношування кожного із спряжених матеріалів (γ_1 і γ_2), тиском на поверхні тертя P і швидкістю відносного ковзання v .

$$\gamma=f(p;v) \quad (2.10)$$

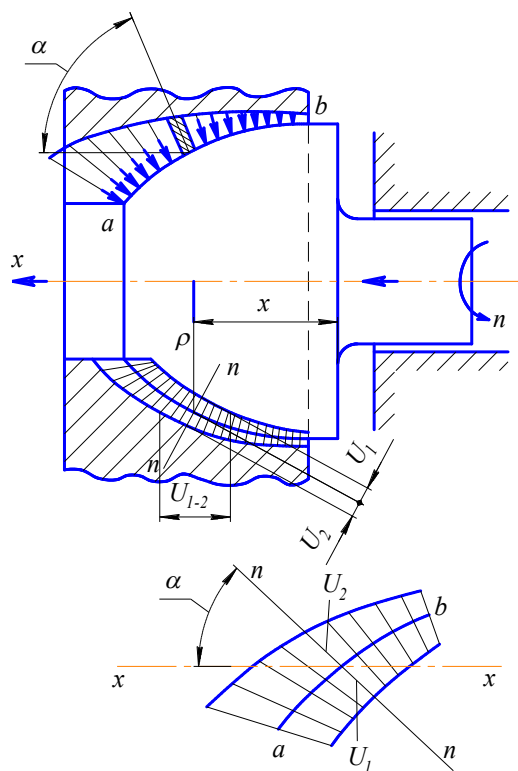


Рис. 2.22 Розрахункова схема до визначення параметрів зношеного спряження

На першому етапі здійснюється визначення характеру епюри тисків на поверхні контакту спряжених деталей.

Кожна точка поверхні з координатами $(\rho; x)$ має свою колову швидкість v , яка залежить від відстані до осі обертання:

$$v = 2\pi\rho n, \quad (2.11)$$

де n - частота обертання за одиницю часу однієї деталі відносно іншої.

Тому закони зношування (2.10) можна подати у вигляді функціональної залежності γ від ρ і p :

$$\gamma_1 = f_1(\rho; p) \quad (2.12)$$

Розподіл тиску по поверхні тертя (епюру тисків) не можна обчислити із умови рівноваги системи, оскільки це статично невизначена задача. Тому як додаткове рівняння необхідно застосувати умову дотику, що виражена в аналітичній формі як залежність між зношуванням

поверхонь і спряжень. Підставимо значення її та γ_1 із (2.12) у формулу:

$$U_{1-2} = \frac{U_1 + U_2}{\cos \alpha} \quad \text{або} \quad \gamma_{1-2} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\cos \alpha}, \quad (2.13)$$

де U_1 і U_2 - лінійне зношування в даній точці, виміряне в напрямку нормалі n-n до поверхні тертя; α - кут між нормаллю до поверхні тертя і напрямком можливого зближення деталей; γ_{1-2} - швидкість зношування спряження, γ_1 і γ_2 - швидкості зношування деталей в даній точці. Одержимо залежність між швидкістю зношування спряження і значеннями p і p .

В загальному вигляді

$$\gamma_{1-2} = F_1(p; p) \quad (2.14)$$

Беручи до уваги, що для всього спряження $\gamma_{1-2} = \text{const}$, тобто не залежить від p , із рівняння (2.14) можна визначити характер епюри тисків у функції p та γ_{1-2} :

$$p = F_2(p, \gamma_{1-2}) \quad (2.15)$$

Числові значення p можна обчислити тільки коли відомо γ_{1-2} .

На другому етапі здійснюється визначення зношування спряження $U_{1-2} = \gamma_{1-2} \cdot t$. Зовнішня сипа P пов'язана із тиском (p), розподіленим по поверхні тертя S відповідно до залежності

$$P = \int_S p \cos \alpha \cdot dS \quad (2.16)$$

або, беручи до уваги рівність (2.15)

$$P = \int_S F_2(p; \gamma_{1-2}) \cos \alpha \cdot dS \quad (2.17)$$

де інтеграл береться по всій поверхні тертя.

Інтегруючи цей вираз і розв'язуючи отримане рівняння відносно γ_{1-2} , отримаємо залежність швидкості зношування спряження від режиму роботи спряження (p і n):

$$\gamma_{1-2}=F_3(p;n) \quad (2.18)$$

Знаючи γ_{1-2} , можна знайти числові значення p за формулою (2.12).

На третьому етапі здійснюється визначення форми зношуваних поверхонь.

Значення γ_1 і γ_2 можна обчислити із рівняння (2.12), підставивши значення p із рівняння (2.15).

В цілому швидкості зношування і відповідно лінійні зношування поверхонь тертя є функцією p та геометричних параметрів спряжень, характеристик зносостійкості матеріалів і режимів роботи спряжень. Якщо p в цих залежностях не фігурує, то це означає, що зношування буде рівномірно розподілене по поверхні тертя.

2.4.3.3 Розрахунок на зношування конічних поверхонь

Розглянемо розрахунок на зношування спряжень 1-ї групи на прикладі конічних поверхонь за такими законами:

$$\gamma_1=k_1p^m v, \gamma_2=k_2p^m v \quad (2.19)$$

Ці закони в достатньо загальній формі відображають залежність зношування від p і v для багатьох видів зношування.

Спряження, що розглядається (рис. 2.23), належить до спряжень 1-ї групи і характерне наявністю незношуваних (або малозношуваних) напрямних, які визначають напрям ($x-x$) можливого зближення спряжених деталей. Тому зношування спряження можна охарактеризувати одним параметром U_{1-2} - відносним зближенням зношуваних деталей 1 та 2 в напрямі $x-x$.

Визначимо характер епюри тисків на поверхні тертя, виходячи з прийнятих закономірностей зношування (2.19). Початок координат розмістимо у вершину конуса, а вісь "У" - спрямуємо по твірній.

Швидкість відносного ковзання в даній точці поверхні тертя буде:

$$v=2\pi r n=2\pi n y \cdot \cos \alpha, \quad (2.20)$$

і закономірності (2.10) наберуть вигляд:

$$\gamma_1 = k_1 p^m 2\pi n (\cos \alpha) y; \gamma_2 = k_2 p^m 2\pi n (\cos \alpha) y$$

де k_1 і k_2 - коефіцієнти зношуваності матеріалів поверхонь (деталей), що контактують.

Приймаючи умову дотику (2.11), отримаємо

$$\gamma_{1-2} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\cos \alpha} = (k_1 + k_2) 2\pi n p^m y$$

звідки тиск p

$$p = \sqrt[m]{\frac{\gamma_{1-2}}{2 \pi n (k_1 + k_2)}} \cdot \frac{1}{y} \quad (2.21)$$

Тут y - координата точки, що розглядається.

Із цієї залежності видно, що тиск залежить від y , тобто нерівномірно розподілений по поверхні тертя і в осьовому перерізі має вигляд степеневі гіперболи.

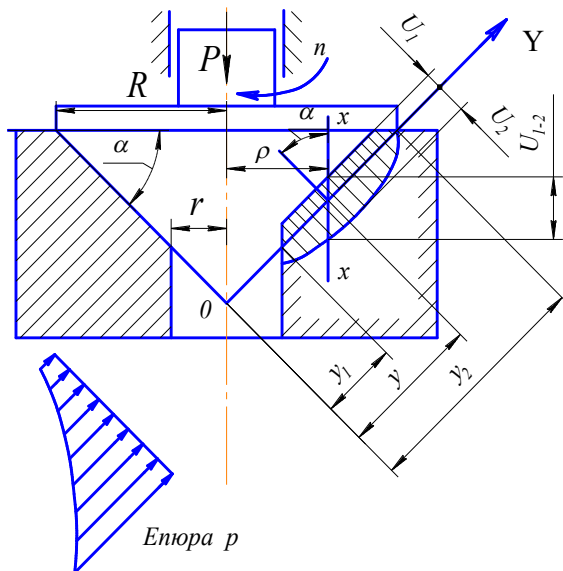


Рис. 2.23 Схема зношування конічних поверхонь

Для розрахунку значення γ_{1-2} знаходимо залежність між силою P і тиском p , розподіленим по поверхні тертя S :

$$P = \int_S p \cos \alpha dS = 2\pi \int_{y_1}^{y_2} p \cos \alpha p dy = 2\pi \cos^2 \alpha \int_{y_1}^{y_2} p p dy \quad (2.22)$$

де

$$y_1 = \frac{r}{\cos \alpha}; \quad y_2 = \frac{R}{\cos \alpha}$$

Підставляючи в цю формулу значення із рівняння (2.21), інтегруючи і розв'язуючи рівняння відносно γ_{1-2} одержимо

$$\gamma_{1-2} = \frac{k_1 + k_2}{\cos \alpha} \left[\frac{\left(2 - \frac{1}{m}\right) P}{2\pi \left(R^{2 - \frac{1}{m}} - r^{2 - \frac{1}{m}}\right)} \right]^m \cdot 2\pi n \quad (2.23)$$

Ця формула виражає залежність швидкості зношування спряження від заданих параметрів P , n , R , r , k_1 і k_2 . Значення γ_{1-2} є сталим для даних умов, а зношування спряження $U_1 = \gamma_{1-2}t$ лінійно змінюється в часі.

Чисельні значення епюри тисків на поверхні тертя можна отримати, коли в формулу (2.21) підставити значення γ_{1-2} із (2.23).

Лінійне зношування U_1 і U_2 в кожній точці поверхні, тобто форма зношеної поверхні, може бути визначена підстановкою значень p із (2.12) в закони зношування (2.10), враховуючи, що $U_1 = \gamma_1 t$ і $U_2 = \gamma_2 t$.

Після перетворень отримаємо:

$$U_1 = \gamma_{1-2} \frac{R_1 \cos \alpha}{k_1 + k_2} t \quad ; \quad U_2 = \gamma_{1-2} \frac{R_2 \cos \alpha}{k_1 + k_2} t \quad (2.24)$$

де γ_{1-2} визначаємо за формулою (2.14).

Оскільки U_1 і U_2 від y не залежать, зношування при даних законах рівномірно розподілене по поверхні тертя.

Для законів зношування, які характерні для абразивного, окислювального і деяких інших видів, справджується лінійна залежність швидкості зношування від тиску, тобто в законах (2.19) $m=1$. В цьому

випадку всі отримані формули наберуть простіший вигляд. Так, епюра тисків становитиме

$$p = \frac{\gamma_{1-2}}{2\pi n(k_1 + k_2)} \cdot \frac{1}{y} = \frac{P}{2\pi n \cos \alpha (R - r)} \cdot \frac{1}{y}, \quad (2.25)$$

зношування спряження

$$U_{1-2} = \gamma_{1-2} \cdot t = \frac{Pn(k_1 + k_2)}{(R - r)\cos\alpha} \cdot t \quad (2.26)$$

лінійне зношування поверхонь

$$U_1 = k_1 \frac{P_n}{R - r} t; \quad U_2 = k_2 \frac{P_n}{R - r} t \quad (2.27)$$

Дія оцінки зношування дискових поверхонь в дані формули необхідно підставити $\alpha=0$ та $y=\rho$, де ρ - поточний радіус.

Аналогічними методами можна розрахувати зношування кульових опор та інших поверхонь обертання, що належать до 1-ї групи спряжень при різних законах зношування.

Так, наприклад, під час зношування центральне навантажених кульових поверхонь з радіусом R колова швидкість на поверхні тертя v буде залежати від кута α між віссю обертання, що проходить через центр кулі і радіусом - вектором даної точки $v=2\pi n R \cos \alpha$. Застосувавши розглянуту послідовність розрахунку для лінійних законів зношування (закони (2.19) при $m=1$), одержимо

$$p = \frac{\gamma_{1-2}}{2\pi n(k_1 + k_2)R} \operatorname{ctg} \alpha \quad (2.28)$$

Епюра тисків підлягає закону котангенса із найбільшими значеннями p та малими кутами α . Тобто ближче до осі обертання зношування спряжень буде

$$U_{1-2} = \gamma_{1-2} t = \frac{4Pn(k_1 + k_2)}{R(\sin 2\alpha_2 + 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1 - 2\alpha_1)} t, \quad (2.29)$$

де α_1 і α_2 - межі зміни кута α , що визначає розміри поверхні тертя.

Отже, розрахунки на зношування дають можливість визначити

швидкість зношування спряження $\gamma_{1-2} = \frac{U_{1-2}}{t}$, яка є основною характеристикою зносостійкості всього спряження, оцінити вплив режимів роботи, зносостійкості матеріалів, розмірів і схеми спряження на значення γ_{1-2} і вказати способи його зменшення.

2.4.4 Зношування механізмів

2.4.4.1 Зношування жорстко з'єднаних кільцевих напрямних

Візьмемо центрально навантажений стіл із двома парами жорстко з'єднаних кільцевих напрямних, розміщених на різних радіусах (рис.

2.24). В міру зношування напрямних стіл буде опускатися. Але цей процес не можна розглядати ізольовано, тільки визначивши попередньо реакції в напрямних. Він є можливим тільки при однаковому зношуванні кожного спряження у напрямних x , тобто повинна виконуватися умова

$$U_1 = U_2 \quad (2.30)$$

Ця рівність і обумовлює значення реакцій P_1 і P_2 у напрямних і зношування всього механізму. Вона замінює додаткове рівняння деформацій, яке застосовується для розрахунків статично невизначених систем. Так, якщо в розглянутому випадку діють лінійні закони зношування, то для дисків зношування спряження визначається за формулою (2.17) при $\alpha=0$. Застосувавши залежність (2.30), отримаємо

$$\frac{(k_1 + k_2)P_1 n}{R_1 - r_1} = \frac{(k_3 + k_4)P_2 n}{R_2 - r_2}$$

звідки

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{k_3 + k_4 a_1}{k_1 + k_2 a_2} \quad (2.31)$$

де k_1, k_2, k_3, k_4 - коефіцієнти зношування для відповідних поєднань матеріалів та умов зношування, a_1 і a_2 - ширина напрямних.

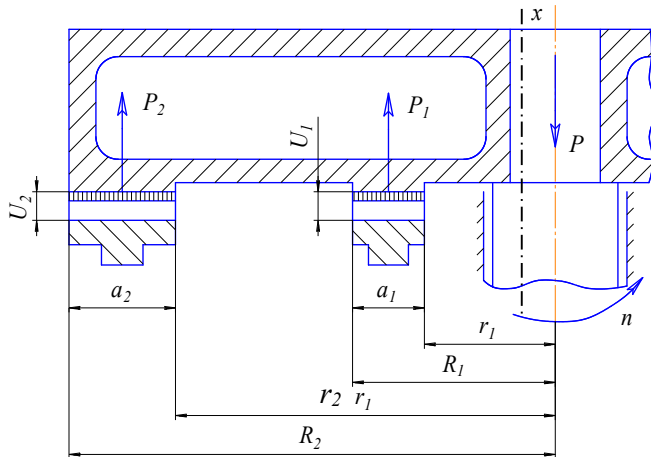


Рис. 2.24 Зношування жорстко з'єднаних кільцевих напрямних

Якщо $k_1 + k_2 = k_3 + k_4$ тобто умови зношування і матеріали для кожної пари однакові, то значення реакцій залежать тільки від ширини напрямних і пропорційні їм.

Враховуючи рівняння статки $P = P_1 + P_2$ отримаємо, що швидкість опускання стола із двома кільцевими напрямними у напрямі x-x через їх зношування буде

$$\gamma = \frac{P_n (k_1 + k_2)}{a_1 + a_2} \quad (2.32)$$

Отже, при прийнятих законах зношування значення γ залежить не від радіусів на яких розміщені напрямні, а тільки від їх ширини. Можна зробити неправильний висновок, розраховуючи напрямні за допустимим тиском (такі обчислення широко використовують на практиці, наприклад, у верстатобудуванні). Для зменшення тиску начебто вигідніше

розмістити напрямні на більшому радіусі, щоб збільшити площу поверхні тертя. Однак, як випливає з формули (2.31), це не зменшить зношування напрямних, оскільки одночасно зростає і швидкість відносного ковзання.

2.4.4.2 Спільне зношування плоских напрямних

Оцінюючи зношування жорстко з'єднаних спряжень, часто необхідно визначити не тільки реакцію, але й точку її прикладання, що впливає на характер епюри тисків та на зміну розташування спряжених тіл під час зношування. Розглянемо зношування у поперечному перерізі плоских поступальних напрямних, якщо переміщувана каретка (стіл) має високу жорсткість, а зовнішня сила прикладена ексцентрично (рис. 2.25).

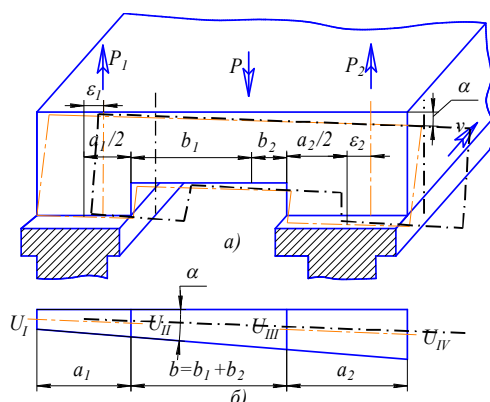


Рис. 2.25 Спільне зношування плоских напрямних

Направні, що не допускають бокового зміщення каретки, на схемі не вказані. Розглядаючи сили, що діють, бачимо, що невідомими є не тільки реакції в напрямних P_1 і P_2 , але й точки їх прикладання - ексцентриситети щодо середини напрямних ε_1 і ε_2 . Статика дає всього два рівняння, що містять невідомі

$$P = P_1 + P_2, \quad (2.33)$$

$$P_1 \left(b_1 + \frac{a_1}{2} - \varepsilon_1 \right) = P_2 \left(b_2 + \frac{a_2}{2} - \varepsilon_2 \right), \quad (2.34)$$

де ε_1 і ε_2 - ексцентриситети щодо середини напрямних.

Щоб одержати два додаткові рівняння, необхідно розглянути спільне зношування жорстко з'єднаних спряжень. В міру зношування каретка опускається і повертається на деякий кут α . Місця взаємного заглиблювання (вкорінення), що визначають залежність між зношуванням спряжень, мають вигляд двох трапецій із однаковими кутами.

Два додаткові рівняння, які можна отримати із геометричних співвідношень (із подібності трикутників), наприклад, у вигляді

$$\frac{U_{II}-U_I}{U_{III}-U_{II}} = \frac{\gamma_{II}-\gamma_I}{\gamma_{III}-\gamma_{II}} = \frac{a_1}{b}, \quad (2.35)$$

$$\frac{U_{III}-U_{II}}{U_{IV}-U_{III}} = \frac{\gamma_{III}-\gamma_{II}}{\gamma_{IV}-\gamma_{III}} = \frac{b}{a_2}. \quad (2.36)$$

Ці два рівняння і будуть тими додатковими умовами, які дають можливість розв'язати дану статично невизначену задачу. Дійсно, залежності для оцінки зношування спряження для кожної пари напрямних будуть подібними до одержаних раніше. Застосувавши формулу

$$\gamma_{1-2} = \frac{Pv(k_1 + k_2)}{al_0} \left(1 \pm 6 \frac{\varepsilon_p}{l_0} \right),$$

де ε_p - ексцентриситет прикладання сили P , і, беручи до уваги, що в залежностях (2.35) та (2.36) зношування спряження можна замінити на швидкість зношування (оскільки береться їх відношення), отримаємо:

$$\gamma_{II} - \gamma_I = \frac{P_1 v(k_1 + k_2) \varepsilon_1}{12 a_1 H}, \quad (2.37)$$

$$\gamma_{IV} - \gamma_{III} = \frac{P_2 v(k_1 + k_2) \varepsilon_2}{12 a_2 H}, \quad (2.38)$$

$$\gamma_{III} - \gamma_{II} = \frac{(k_1 + k_2) v}{H} \left[\frac{P_2}{a_2} \left(1 - 6 \frac{\varepsilon_2}{a_2} \right) - \frac{P_1}{a_1} \left(1 - 6 \frac{\varepsilon_1}{a_1} \right) \right], \quad (2.39)$$

де H - довжина каретки; v - середня швидкість її руху; роль довжини l відіграє ширина напрямних a .

Підставивши значення γ із (2.37), (2.38) та (2.39) в залежності (2.35) та (2.36), одержимо два додаткові рівняння, які містять ті ж невідомі P_1 , P_2 , ε_2 , що і рівняння статички. Розв'язання даної системи дасть змогу отримати всі необхідні дані для виявлення силової картини і для оцінки параметрів зношування. Аналогічний метод можна застосовувати, враховуючи контактні деформації.

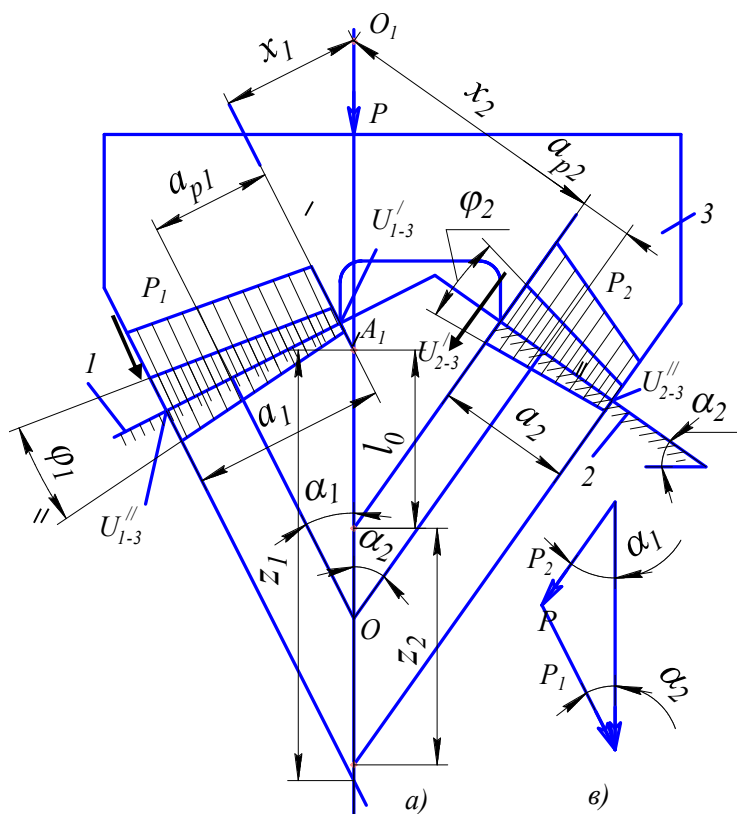


Рис. 2.26 Спільне зношування похилих напрямних

2.4.4.3 Спільне зношування похилих напрямних

Розраховують спільне зношування похилих жорстко з'єднаних напрямних (рис. 2.26) із врахуванням того, що рівномірне зношування однієї пари не впливає на формування контакту іншої, оскільки

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

відбувається невелике відносне зміщення у поперечному напрямі спряжених поверхонь другої пари. При нерівномірному зношуванні (у поперечному перерізі) рухома каретка повертається відносно напрямних і, відповідно, спостерігатиметься спільне зношування двох спряжень. Умова дотику означає, що кут повороту жорсткої каретки при зношуванні кожної пари буде однаковим, тобто $\varphi_1 = \varphi_2$. Прирівнявши тангенси цих кутів і виразивши їх через зношування спряжень, отримаємо

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{1-3}'' - U_{1-3}'}{a_1} = \frac{U_{2-3}'' - U_{2-3}'}{a_2}. \quad (2.40)$$

Оскільки в даному випадку лише поворот каретки впливає на спільне зношування поверхонь, достатньо тільки одного додаткового рівняння. Характерно, що із рівнянь статички або трикутника сил (рис. 2.26, б) можна знайти значення реакцій в напрямних

$$P_1 = P \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad \text{та} \quad P_2 = P \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (2.41)$$

Для визначення координат прикладання сил необхідно скористатися умовою дотику (2.31). Підставивши в (2.31) значення

швидкостей зношування із формули $\gamma_{1-2} = \frac{P_0(k_1 + k_2)}{a l_0} \left(1 \pm 6 \frac{\varepsilon_p}{l_0} \right)$ і зробивши перетворення, отримаємо

$$a_{p1} = \frac{m_0 a_1}{m_a + 1} \left[0.5 \left(\frac{1}{m_a} + \frac{m_a}{\sqrt[3]{m_0}} \right) + \frac{l_0}{z_I} \right], \quad (2.42)$$

$$a_{p2} = \frac{a_2}{m_a + 1} \left[0.5 \left(m_a + \frac{\sqrt[3]{m_0}}{m_a} \right) - \frac{l_0}{z_{II}} \right],$$

де $m_0 = \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^3$; $m_a = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$, а параметри z_I та z_{II} - відрізки, що

відтинаються граничними лініями напрямних на лінії дії сили P (рис. 2.26,

а); l_0 – параметр, що відзначає відносне розташування цих відрізків.

Із рис. 2.26 та формул можна зробити висновок, що силова картина і умови зношування не зміняться, якщо напрямні переміщувати вздовж лінії дії сил. Кут повороту рухомої каретки φ відносно напрямних під час зношування поверхонь можна визначити за формулою (2.40), підставивши в неї значення $U_{1-3} = \gamma t$ із формули для розрахунку γ_{1-2} , значення сил із (2.41) і ексцентриситету $\varepsilon_p = |0,5 - a_{p1}| a_1$, де a_{p1} знаходимо із формулою (2.42).

2.4.4.4 Блок - схема програми розрахунку на ЕОМ параметрів вузла тертя

Спрощена блок-схема програми розрахунку на ЕОМ оптимальних параметрів напрямних за умови тривалого збереження точності руху подана на рис 2.27.

Спочатку (оператор 1) вводять масив вхідних даних - розмірів спряжень, зусиль, що діють, умов експлуатації (наприклад, концентрацію абразиву в змащенні) тощо із зазначенням можливих меж їх зміни. Потім будують таблицю планування експерименту (обчислень) (оператор 2), із якої вибирають комбінації вхідних даних для кожного циклу досліджень (оператор 3). Оскільки кількість вхідних параметрів є достатньо великою і кожний із них може змінюватися в певних межах (або мати декілька рівнів), то для вибору оптимального варіанта необхідна велика кількість циклів розрахунку (експериментів). Зменшити обсяг обчислень можна, досліджуючи вплив тільки основних чинників, або кожного із чинників лише при часткових значеннях інших, плануючи багатofакторний експеримент (на основі латинського квадрата), використовуючи випадкову вибірку комбінацій вхідних чинників із врахуванням законів їх розподілу (метод Монте - Карло).

Перші два методи не забезпечують повноти аналізу, третій метод

дає можливість розкрити вплив всіх основних чинників при найменшій кількості експериментів. Останній метод найповніше характеризує вплив вхідних параметрів, але вимагає знань законів їх розподілу (наприклад, закону розподілу експлуатаційних навантажень у механізмі).

ЕОМ будує таблицю планування і вибирає першу комбінацію вхідних параметрів (оператор 3). Потім обчислюються реакції, які діють на гранях напрямних, та координати їх прикладання (оператор 4), що дає можливість одержати рівняння епюри тисків на кожній із напрямних (оператор 5).

Обчислюють зношування за спеціальною підпрограмою (оператор 6). Спочатку розраховують умовне зношування, тобто ту частину залежності $U(x)$, яка визначає форму зношеної поверхні. Підпрограма враховує, що епюра зношування напрямних є сумою епюр при різних циклах роботи механізму, наприклад, під час руху стола в один та другий бік, коли змінюються силові навантаження у спряженні або при робочому і неробочому ході тощо.

Потім обчислюється значення коефіцієнта зношування k (оператор 7). В підпрограму закладені дані про умови експлуатації, можливі зміни коефіцієнта k за довжиною напрямних, умови, що характеризують подавання мастила, можливі варіанти матеріалів пари, та інші дані, які дають можливість оцінити межі зміни значення коефіцієнта зношування k .

В результаті цих розрахунків ми визначаємо форму зношеної поверхні та зношування в кожній точці напрямних, розподілене на одиницю шляху тертя (оператор 8). Потім визначається похибка траєкторії руху веденої ланки Δ під час переміщення стола по зношуваних напрямних при деякому значенні шляху тертя $S=S_0$ (оператор 9). Одержана похибка Δ порівнюється із допустимою (оператор 10). Якщо $\Delta < \Delta_{\text{доп}}$, то шлях тертя збільшується на величину ΔS

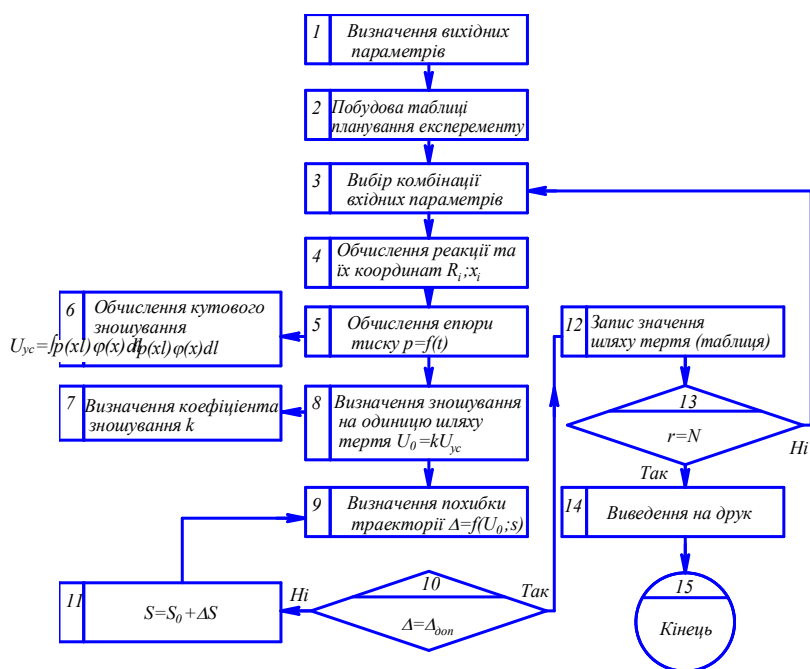


Рис. 2.27 Блок-схема програми розрахунку на ЕОМ параметрів напрямних за умови точності руху

(оператор 11), і розрахунок повторюємо, поки не отримаємо значення шляху тертя S , при якому зношування напрямних досягне граничного значення S , яке заносять в таблицю (оператор 12). Потім всі обчислення повторюються з іншими комбінаціями вхідних параметрів, поки кількість обчислень r не досягне встановленого значення N (оператор 13). Кожна комбінація вхідних параметрів та відповідне значення шляху тертя S , яке пропорційне терміну служби до досягнення параметром значення $\Delta = \Delta_{\text{доп}}$, виводяться на друкувальний пристрій у табличній формі (оператор 14). Після виконання встановленої кількості циклів обчислення закінчуються (оператор 15).

Розрахунок можна побудувати так, щоб визначалась похибка траєкторії, якщо заданий шлях тертя (базовий). В цьому випадку оптимальний варіант буде гарантувати найменше викривлення траєкторії веденої ланки за однакової тривалості роботи механізму.

Виконані на ЕОМ обчислення дають можливість вибрати

оптимальне поєднання конструктивних чинників, які забезпечують найбільшу працездатність ($S_{\max}$), розрахувати середнє значення і розсіювання напрацювання при коливанні експлуатаційних чинників, оцінити імовірність безвідмовної роботи механізму протягом заданого періоду.

2.4.5 Зношування машин

2.4.5.1 Зношування технологічного обладнання

Під час дослідження зношування всієї машини необхідно:

- оцінити формування вихідних параметрів виробу у міру зношування окремих елементів;
- виявити роль, яку відіграють окремі вузли тертя і виділити головні спряження;
- встановити зв'язок зношування одних елементів із працездатністю інших;
- оцінити вплив умов експлуатації на характер та інтенсивність зношування.

Дослідження та аналіз зношування всієї машини є кінцевим етапом побудови моделі її надійності.

Зношування технологічного обладнання призводить, в першу чергу, до погіршення якості продукції і до зниження продуктивності праці.

Незважаючи на різні розміри, різницю в конструктивному оформленні і призначенні кожної технологічної машини, для них є придатними загальні принципи методологічного підходу до аналізу зношування. Перш за все, необхідно оцінити його вплив на якість продукції, що випускається, вимоги до якої обумовлюють гранично допустимі значення зношень. Основну роль відіграють цільові механізми, які призначені для зміни форми і властивостей об'єкта праці. Саме їх зношування відіб'ється на вихідних характеристиках якості і

визначить параметричну надійність машини. Наприклад, зношування шпindelних опор і механізмів затискання заготовки металорізального верстата, напрямних човника у батанному механізмі ткацького верстата або п'яти шпінделя веретена, валків та їх опор в прокатних станах призводить до зниження якості продукції. Зношування і втрата працездатності приводних механізмів, як правило, менше впливають на вихідні параметри технологічного обладнання і визначають, в основному, надійність функціонування. Воно впливає також на його продуктивність, оскільки налагоджування і ремонти викликають додаткові простоювання обладнання, а зміна режиму роботи через зношування основних елементів машини знижує її технологічні можливості.

Проаналізувати працездатність основних механізмів технологічного обладнання можна тільки із врахуванням взаємозв'язків і взаємовпливів під час зношування окремих спряжень. Здебільшого основним критерієм параметричної надійності є забезпечення заданої точності траєкторії або розташування веденої ланки цільового механізму.

Специфічним для багатьох технологічних машин є вплив на інтенсивність зношування відходів технологічного процесу. Так, у верстатах на зношування впливає потрапляння у вузли тертя частинок оброблюваного матеріалу, наприклад, чавунного пилу або продуктів плавлення і руйнування шліфувального круга. Для металургійного обладнання є небажаним потрапляння у вузли тертя окалини, у харчових машинах кондитерської промисловості негативно впливає на зносостійкість потрапляння у вузли тертя цукристих речовин тощо. З погляду відновлення втраченої працездатності технологічного обладнання характерна можливість ремонту і технічного обслуговування в будь-який час. Щоб втрати часу та засобів були мінімальними, необхідна раціональна побудова системи ремонту.

2.4.5.2 Вибір раціональної конструкції механізму

Зношування є однією із основних причин зниження працездатності машин. Навіть якщо вважають, що високі вимоги до вихідних параметрів машини не допускають зношування її елементів, саме небезпека його проявів регламентує ресурс виробу.

Дотримання вимог до ефективності, розмірів, вартості та простоти конструкції машин призводить до того, що вузли тертя працюють в напружених умовах і зношуються. Як правило, у будь-якій машині є спряження з різними вихідними параметрами які, відповідно, мають різні допустимі значення зношування.

Для будь-якої машини підвищення зносостійкості, як правило, є досить актуальним, особливо, якщо це досягнуто без суттєвого її подорожчання. Звичайно, конструктор завжди має достатньо методів та засобів для підвищення зносостійкості спряжень, таких, як змащення поверхонь, застосування зносостійких матеріалів, різних видів термооброблювання, нанесення на поверхню спеціальних рельєфів та покриттів, ізолювання поверхонь тертя від потрапляння абразивів і застосування ущільнень для втримання змащення тощо. Однак і у виборі раціональних конструктивних рішень закладені не менші можливості для підвищення зносостійкості деталей, причому часто це не призводить до подорожчання виробу. Можна навести багато прикладів, коли через відсутність методів розрахунку зношування поверхонь і аналізу зміни вихідних параметрів внаслідок зношування не розкриваються резерви конструкції щодо підвищення її зносостійкості. Нижче розглянемо основні методи підвищення зносостійкості машин, що пов'язані із конструкцією їх механізмів і пар тертя.

Вибір раціональної конструктивної схеми механізму, при якій зношування спряження найменше впливає на вихідні параметри виробу, є загальною умовою проектування довговічних машин.

Значення зношування спряжень ще не характеризує ступінь порушення нормальної роботи механізму. При однакових зношуваннях аналогічні механізми можуть в одному випадку перестати правильно функціонувати, а в іншому працювати ще тривалий час.

Як приклад (рис. 2.28) розглянемо роботу свердлильного шпинделя, в якому зношуються підшипники 4 і затискальні губки 3, що втримують деталь 2 під час оброблювання.

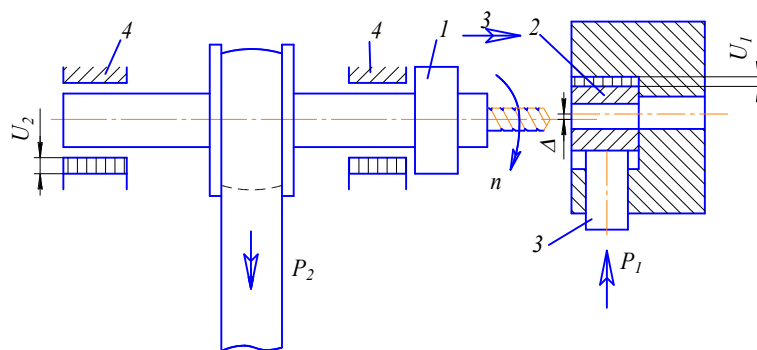


Рис. 2.28 *Схема зношування опор шпинделя та затискного патрона свердлильного автомата*

В міру зношування вказаних спряжень буде зміщуватись вісь оброблюваного отвору на деяке граничне значення, що залежить від потрібної точності оброблювання.

Якщо зношування підшипників U_2 ; (напрямок якого залежить від напрямку сили P_2 на приводному шківі) і нерухомих губки затискача U_1 будуть спрямовані в різні боки, то $\Delta = U_1 + U_2$.

Якщо напрями й зношування збігатимуться, то $\Delta = U_1 - U_2$ і термін служби набагато збільшується. Тому в поданій конструкції рухомих губку необхідно розмістити з протилежного боку. Правильний вибір конструктивної схеми може забезпечити значне підвищення довговічності механізму.

Вибираючи конструкції пар тертя, часто застосовують принцип

самовстановлення спряжених поверхонь. Він забезпечує надійнішу та довговічнішу роботу тих пар, в яких вимагається особливо точне прилягання спряжених поверхонь, а також сприяє зменшенню періоду макроприпрацювання. На рис. 2.29 наведена схема макроприпрацювання вала та підшипника ковзання. Через деформацію вала (яка показана умовно завищеною) і неточне початкове встановлення підшипника площа їх дотику невелика, що збільшує кромкові тиски. Якщо це не призведе до заїдання вала, то у міру зношування площа контакту буде зростати, і питомі тиски зменшуватися. Вал буде припрацьовуватися до підшипника, забезпечуючи правильний дотик спряжених поверхонь.

Зменшити період макроприпрацювання можна не тільки точним монтажем, підвищенням жорсткості вала і точним оброблюванням спряжених поверхонь, але й створенням конструкції, здатної забезпечити самовстановлювання спряжених поверхонь. Так, якщо підшипник складається із окремих вкладок, які можуть повертатися і само встановлюватися залежно від розташування вала (див. рис. 2.12, а), то кромкові тиски не виникають і період макроприпрацювання зменшується.

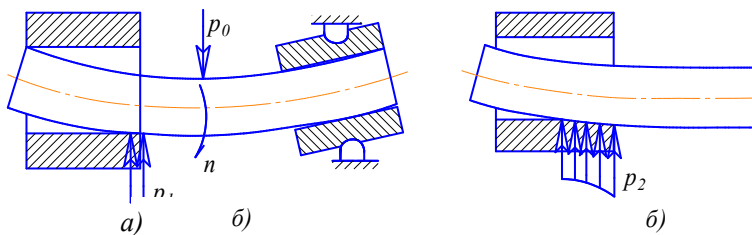


Рис. 2.29 *Схема припрацювання та самовстановлення пари вал-підшипник:*

а) *період припрацювання;*

б) *період стабільної роботи опори*

Принцип самовстановлювання застосовується у спеціальних

конструкціях підшипників ковзання та в інших спряженнях машин. Наприклад, поршень із шатуном в двигунах внутрішнього згоряння з'єднується переважно за допомогою плаваючого поршневого пальця, який забезпечує вільний поворот поршня відносно шатуна. У двигунах внутрішнього згоряння застосовують самовстановлюване (плаваюче) сидло клапана, що дає змогу забезпечити правильність прилягання пари сидло-клапан незалежно від деформації під час її нагрівання.

2.4.5.3 Зменшення навантажень на поверхні тертя

Найпростіше зменшити тиск на поверхні тертя, збільшуючи їх розмір. Однак це веде до збільшення розмірів виробу. Тому застосовують різні спеціальні методи. Один із них - зменшити зусилля у відповідальних спряженнях, інтенсивніше навантажуючи менш відповідальні елементи.

Наприклад, для підвищення терміну служби напрямних верстата вагу стола і частково зусилля різання сприймає спеціально підпружинений візок на роликах, а самі напрямні ковзання дійсно стають в основному лише напрямними, а не несучими елементами.

Розвантаження пар тертя кочення - це складніше завдання. Якщо просто розвантажити, наприклад, напрямні кочення, то виникає небезпека, що контактна жорсткість буде малою.

Збільшити площу контактування під час тертя кочення можна, створивши умови для тіснішого дотикання поверхонь та шляхом збільшення зони контактування. Наприклад, перехід від звичайних евольвентних передач до зачеплення Новікова збільшує зону контакту, що сприяє підвищенню зносостійкості і несучої здатності передачі.

2.4.5.4 Принцип рівномірного зношування

Порушення правильної роботи механізмів внаслідок їх зношування

часто залежить не стільки від розмірів зношування, скільки від нерівномірності його розподілу по поверхні тертя. Наприклад, нерівномірне зношування по довжині ходових гвинтів призводить до зменшення точності переміщення вузлів. Нерівномірне зношування по профілю кулачкових механізмів спотворює характер передаваного закону руху. Нерівномірне зношування напрямних прямолінійного руху негативно відображається на точності та вібростійкості верстатів тощо.

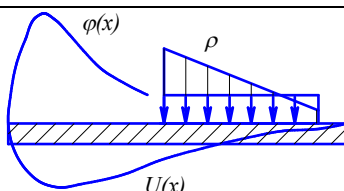
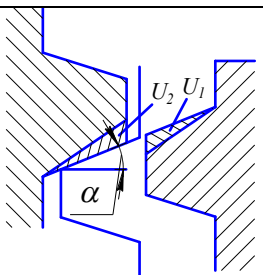
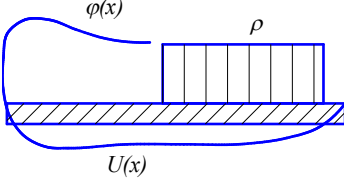
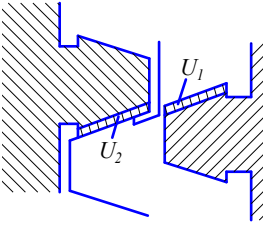
Зношув.	Напрямні	Кулачкові муфти
Нерівномірне		
Рівномірне		
	а	б

Рис. 2.30 Приклади рівномірного та нерівномірного зношування:

а - напрямних: б - кулачкових муфт

Розрахунок параметрів напрямних дає змогу вибрати варіант, що забезпечить мінімальне спотворення форми зношеної поверхні (рис. 2.30, а). Розглянемо вплив на працездатність механізму нерівномірного зношування поверхонь на прикладі роботи кулачкових муфт, що передають крутний момент від одного вала до іншого. Під час роботи напівмуфт їх зубці U_1 і U_2 зношуються нерівномірно (рис. 2.30,б), оскільки

вершини зубців проходять більший шлях тертя. Внаслідок цього кут нахилу поверхні зубця α збільшується і створюється небезпека самовимикання муфти, оскільки одна напівмуфта притискається до другої пружиною. Якщо зробити біля муфт заплечики, щоб вершина зубця заходила за основу спряженого зубця, то зношування зубців стане рівномірнішим і небезпека самовимикання зменшиться.

Проектуючи основні елементи машини, що труться, необхідно створити таку конструкцію, в якій можлива нерівномірність зношування буде найменшою, тим самим будуть забезпечені умови для тривалішого зберігання механізмом його службових показників.

2.4.5.5 Автоматична компенсація зношування

Вище говорилося про методи компенсації зношування, що забезпечують триваліший термін служби спряжень. Найефективнішими будуть методи автоматичної компенсації, зношування, коли машина відновлює втрачену працездатність без втручання людини.

Як приклад розглянемо автоматичну компенсацію зношування напрямних верстатів і машин, запропоновану А.С. Проніковим (а.с.№130314), зображену на рис. 2.30.

Основою цього методу є те, що як спряжені матеріали для напрямних станини використовується зносостійкий матеріал, а для напрямних супорта - матеріал, що може мати і невисоку зносостійкість, але повинен не зношувати напрямних станини.

Для збереження супортом початкового розташування автоматично компенсується зношування його напрямних. Базою є або напрямні станини, які не зношуються і тому зберігають прямолінійність, або спеціальні поверхні, або контрольні штифти.

Принципова схема автоматичної компенсації зміни розташування супорта в міру зношування його напрямних показана на рис. 2.30,а.

Супорт 8 має напрямні у вигляді пластмасових вставок 3, розміщених у склянках 2. Під час переміщення по напрямних станини 1, які практично не зношуються, супорт змінює своє початкове розташування внаслідок зношування вставок 3. Для контролю за розташуванням супорта передбачені штифти 4, які під час опускання діють на датчики (перетворювачі) 5. Датчики встановлені так, що їх мірні штифти контролюють розміри h , тобто розташування супорта 8 стосовно базової прямої станини 1. При опусканні супорта нижче від висоти h датчик дає команду і пластмасова вставка 3 висовується на невелику величину. Для цієї мети у автокомпенсаторі передбачені гвинт 6 і поршеньок 7, або будь-який інший пристрій, що гарантує періодичне висовування вставки 3 і відновлення внаслідок цього правильного розташування супорта.

Так автоматично компенсуються зношування. На рис. 2.30,б наведено приклад конструктивного оформлення опори для напрямних стола внутрішньо-шліфувального верстата. Тут автокомпенсатори розміщені в опорах 5, встановлених у станині.

Під час опускання стола 4 на електроконтактний датчик 9 діє кулачок 8 і через блок електроавтоматики 3 подається команда на виконавчий електромагніт 2. Останній за допомогою храпового механізму 1, черв'ячної 7 та гвинтової пар 6 піднімає пластмасову вставку, відновлюючи правильне розташування стола. При повороті храповика на один зубець пластмасова вставка буде висунута на 0,005мм. Пластмаса, розміщена в замкненому об'ємі, може витримувати більші навантаження порівняно із напрямними у вигляді прикріплених пластмасових пластин. Тому підвищується контактна жорсткість у спряженнях і надійно усуваються всі щілини.

Стіл верстата має плоску і призматичну напрямні, які встановлюють на шість опор - чотири крайні із автоматичною компенсацією зношування і дві середні - підпружинені, що не допускають прогину стола. Всі

компенсатори зношування (опори) - це стакани, закріплені у розточці станини.

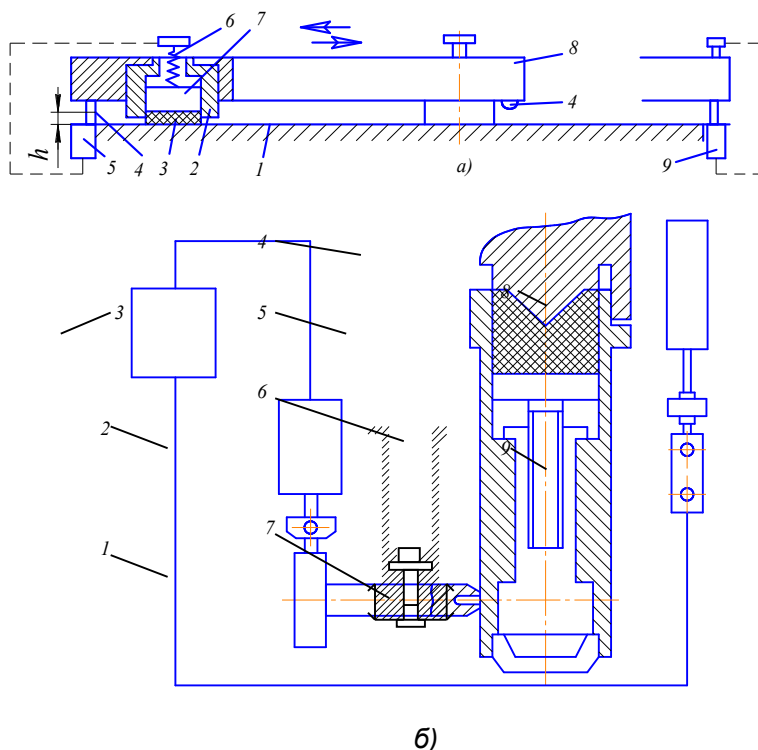


Рис. 2.30 Автоматична компенсація зношування напрямних:

а - загальна схема; б – регульовальна опора стола шліфувального верстата

Щоб зробити роботу системи автокомпенсації надійною, розташування стола перевіряють через певні проміжки часу, що займає декілька хвилин. Решту часу мірний штифт кожного датчика відведений від кулачка, а сам датчик від'єднаний.

Вмикання автоматики заблоковано із кнопкою "Пуск" верстата і, відповідно, не вимагає спеціальної уваги робітника.

Автоматична компенсація зношування напрямних має такі переваги: забезпечується збереження точності переміщення стола протягом всього періоду експлуатації; не виникає необхідність ремонту напрямних, не зношується і не ремонтується дорога станина; для напрямних супорта можна застосовувати малостійкі та маломіцні матеріали, що мають інші цінні якості, наприклад, низький коефіцієнт

тертя, хороше вібропоглинання.

Застосування автоматичної компенсації зношування різних відповідальних пар тертя сприяє створенню високонадійних конструкцій і розвиток цих методів має певні перспективи.

2.4.5.6 Регламентування показників зношування машини із умови її надійності

Необхідно не тільки застосовувати різні методи підвищення зносостійкості спряжень, але й лімітувати показники, що визначають інтенсивність зношування, і оцінювати його допустиму швидкість. Основним критерієм для регламентації показників зношування є вимоги надійності, що ставляться до машини. Встановлено гранично допустимі значення для показників зношування машини і контроль за їх дотриманням є важливим засобом створення виробів із оптимальними показниками зносостійкості.

В першу чергу необхідно встановити межі допустимих значень для швидкостей зношування спряжень, що визначають зміну вихідних параметрів машини.

Розглянемо методичний підхід до розв'язання цієї задачі, якщо модель відмови є такою, що імовірність безвідмовної роботи виробу $P(t)$ може бути розрахована, а значення вихідного параметра X пов'язане із зношуванням спряжень лінійною залежністю.

$$X = k_0 + kU. \quad (2.43)$$

Відповідно, швидкість зміни параметра γ_x , безпосередньо залежить від швидкості зношування γ :

$$\gamma_x = \frac{dX}{dt} = k\gamma. \quad (2.45)$$

Із формули

$$P(T) = 0.5 + \hat{O} \left[\frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{cp} \cdot T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 \cdot T^2}} \right] \quad (2.46)$$

видно, що при заданих імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ і ресурсові T_p можна встановити значення γ_{cp} і σ_γ , за яких будуть забезпечені вимоги надійності. Найбільша допустима швидкість зміни вихідного параметра $\gamma_{x\max}$ становитиме

$$\gamma_{x\max} = \gamma_{cp} + a \sigma_\gamma, \quad (2.47)$$

де коефіцієнт a встановлюють, виходячи із умов безвідмовності. Наприклад, при $P(t)=0,999$ і нормальному законові розсіювання, параметр $a=3$ (шестисигмова зона розсіювання). Тоді відповідно до

(2.46) може бути регламентована і швидкість зношування $\gamma_{\max} = \frac{\gamma_{x\max}}{k}$.

Якщо на вихідний параметр впливає зношування не одного, а декількох спряжень, то можна встановити допустимі значення зношувань для кожного з них, використовуючи закономірності для розрахунку багатоланкових механізмів.

Обмеження швидкості зношування основного спряження машини і визначення класу зношування має першочергове значення для створення надійних машин. Існують різні методи і засоби для підвищення зносостійкості будь-яких пар тертя, однак необхідно знати, які пари в яких межах повинні забезпечувати заданий діапазон швидкостей або інтенсивності зношування. Для створення зносостійких машин необхідно також регламентувати ті показники зношеного спряження і ті умови експлуатації, які визначають термін служби (напрацювання) виробу до відмови. Це, в першу чергу, стосується гранично допустимих зношувань і умов експлуатації – навантажень, швидкостей і температур, характеристик доквілля. Тільки цілеспрямовані заходи для підвищення зносостійкості дадуть найбільший ефект. Тому застосування з цією

метою різних методів має поєднуватися із розрахунком і аналізом зношування основних спряжень, прогнозуванням поведінки зношеної машини, регламентації швидкості зношування. Ще на стадії проектування повинні бути закладені основи для створення зносостійких надійних машин, що зберігають працездатність в різних умовах експлуатації. Надійність, що закладена під час проектування машини, має бути забезпечена під час її виробництва та експлуатації.

2.5 Спрацювання обладнання в агресивних середовищах

2.5.1 Ерозійне і гідроабразивне зношування в середовищах галузі

Вперше це питання стосовно середовищ цукрового виробництва вивчалось на кафедрі МІТМ НУХТ Г. Прейсом, М. Сологубом, О. Некозом і О. Слиньком.

В бурякоцукровій промисловості експлуатується велика кількість насосів, надійність і довговічність яких дуже важливі для забезпечення стабільності технологічного процесу.

Аналіз експлуатації відцентрових насосів показав, що основною причиною їх недостатньої довговічності є інтенсивне гідроерозійне руйнування деталей проточної частини: робочих коліс, ущільнювальних елементів, кришок корпусів (рис. 14.9). Залежно від умов роботи насосів, властивостей рідин, які вони перекачують, наявності в середовищах зважених твердих частинок, гідроерозія зазначених деталей є наслідком сукупної кавітаційної, корозійно-ерозійної та гідроабразивної дії. В більшості досліджень встановлено, що фізико-хімічні властивості рідини та її параметри (густина, в'язкість, поверхневий натяг, хімічна активність, температура тощо) суттєво впливають на гідроерозію металів. Інтенсивність зношування в початковий період невелика (інкубаційний період), а потім раптово зростає через втому конструкційного матеріалу

(рис. 2.31). Так, наприклад, встановлено, що у 3 %-му розчині хлористого натрію кавітаційне руйнування матеріалів на 80 % інтенсивніше, ніж у воді.

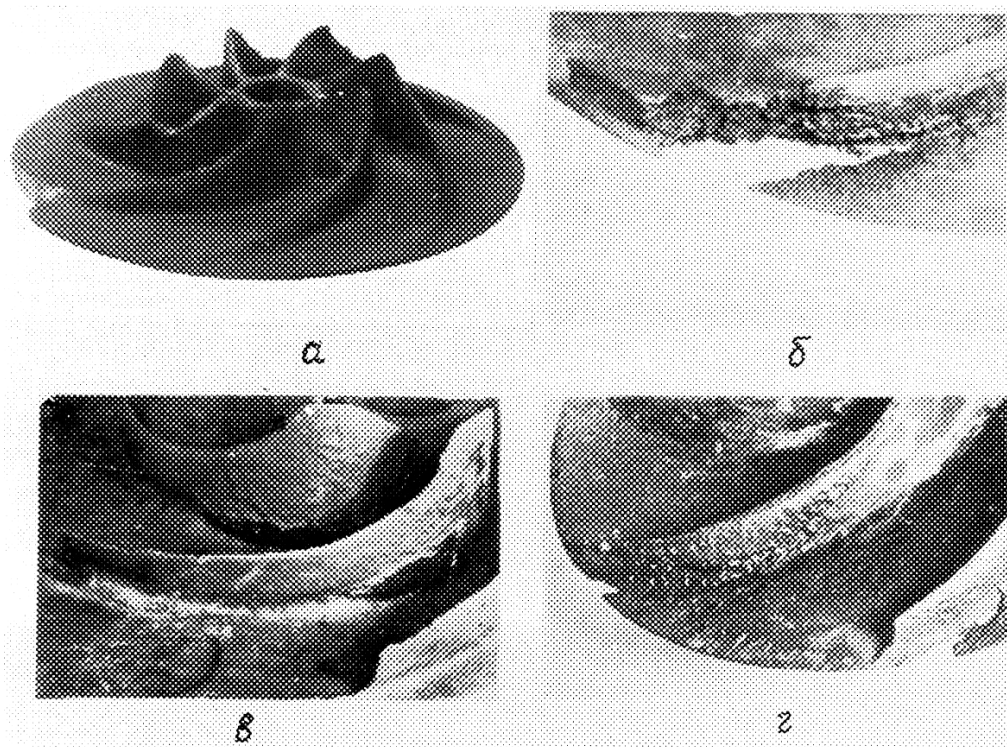


Рис. 2.31 Корозійно-ерозійний знос робочого колеса відцентрового насоса СОР-100 в середовищах сульфатованого (а,б) і дифузійного (в,г) соків бурякоцукрового виробництва

Цукроза - основний компонент багатьох технологічних середовищ бурякоцукрового виробництва, яка значною мірою змінює фізико-хімічні властивості робочих розчинів: підвищує густину, в'язкість, знижує хімічну активність. Цукроза у водяних розчинах здійснює різний вплив на гідроерозію металів. Гідроерозія вуглецевої сталі в розчинах цукрози має підвищену тривалість інкубаційного періоду (час до початку руйнування) і дещо більшу швидкість крихкого руйнування, ніж у воді. Швидкість крихкого руйнування підвищується зі збільшенням концентрації цукрози в розчині.

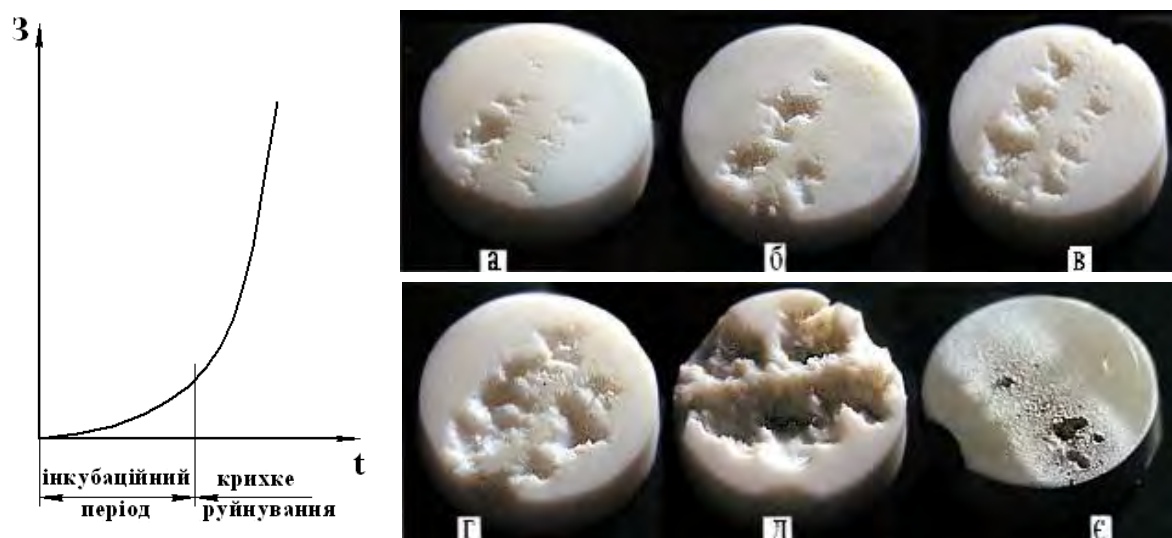


Рис. 2.32 Типова залежність зносу і зміна швидкості руйнування зразків з фторопласта – 4Д (а-д) і дюралюмінію Д16 (є) в умовах гідроерозії на УЕС (див. рис. 2.36) від часу випробувань: а – 10; б – 20; в – 30; г – 40; д, є – 50 хв.

Тривалість інкубаційного періоду нержавіючої сталі і мідних сплавів зменшується, а швидкість крихкого руйнування підвищується в цукрових розчинах порівняно з водою. Для чавунів характерне зменшення втрат маси з підвищенням концентрації цукрози в розчині.

Різна дія цукрози на гідроерозію металів пояснюється корозійно–механічним характером процесу і специфічним впливом цукрози на корозійний і механічний фактори процесу. Більша частина розчинів з цукрозою підвищує механічний вплив рідини на метали при гідроерозії. Саме посиленням механічного чинника обумовлене збільшення інтенсивності крихкого руйнування сталі і мідних сплавів. У той же час, маючи інгіббуючі властивості, цукроза сприяє послабленню інтенсивності корозійного чинника в процесі гідроерозії. Цим обумовлене зменшення втрати маси чавунів і збільшення тривалості інкубаційного періоду вуглецевих сталей у розчинах цукрози.

Дослідження зносостійкості конструкційних матеріалів в дифузійному соці проводились у виробничих умовах. Відомо, що дифузійний сік містить цукрозу, органічні кислоти і нецукри. Встановлено,

що метали за гідроерозійною стійкістю можна розділити на дві групи: 1 – метали, що мають невисокі антикорозійні властивості – вуглецеві сталі та чавуни; 2 – нержавіючі сталі, мідні та алюмінієві сплави, термодифузійнохромована сталь. Стійкість металів останньої групи виявилась в десятки разів більшою, ніж металів першої групи. Таким чином, гідроерозійна стійкість металів у дифузійному соці визначається головним чином їхніми протикорозійними властивостями.

Дослідження у виробничих умовах зносостійкості металів в лужних середовищах проводились в фільтрованому дифузійному соку першої сатурації (рН 10,5-11). Встановлено, що найбільшу стійкість має загартована сталь і відбілений чавун. Гідроерозійна стійкість матеріалів визначається, в основному, механічними характеристиками і не залежить від їхніх антикорозійних властивостей. Аналіз бувших в експлуатації насосів для перекачування вапняного молока показав, що причиною їхнього нетривалого терміну експлуатації є інтенсивне гідроабразивне руйнування, обумовлене наявністю у вапняному молоці великої кількості твердих часток – окисів алюмінію, заліза, кремнію. Через це також малодовговічні насоси для перекачування нефільтрованого сатураційного соку. Гідроерозійна і гідроабразивна стійкість металів у вапняному молоці визначається лише їх міцностними характеристиками (наприклад, твердістю). Найменш стійкі метали – бронза, чавуни, а найбільш стійкі – загартована сталь та відбілений чавун.

2.5.2 Кавітаційно-ерозійне зношування технологічного обладнання

При обробленні багатьох рідких середовищ харчової та переробної промисловості робочі вузли обладнання піддаються кавітаційно-ерозійному зношуванню, що є серйозною проблемою при їх конструюванні та експлуатації.

Відомі різні гіпотези, які пояснюють природу кавітаційного руйнування, але більшість досліджень, головним чином якісних, свідчать, що кавітаційна ерозія поверхні обумовлена її руйнуванням під дією високих локальних тисків (до 1000 МПа), які виникають при колапсі кавітаційних бульбашок. Таким чином, за своєю природою кавітаційна ерозія є переважно механічною, причому, вона суттєво прискорюється корозійними процесами, відносна частина яких становить від 20 до 60 % і визначається властивостями середовища і матеріалу.

Особливістю механічної дії кавітації є миттєвість і циклічність прикладення навантаження, його локальність, тобто вплив на мікроділянки конструкційного матеріалу. Розподіл і поширення напружень, які виникають від ударів кумулятивних мікрострумків, відбувається нерівномірно. Тому в локальних мікрооб'ємах структури поверхні матеріалу, що зазнає силової дії, напруження, які виникають при цьому, можуть перевищити межу текучості матеріалу, а багаторазова ударно-хвильова дія кавітації призводить до пластичної деформації матеріалу на ділянках площею до 10 мм². Наступні напруження можуть викликати утворення нових дефектів, які знижують міцність матеріалу. При збільшенні частоти кавітаційних ударів утворюються внутрішньокристалічні зміщення, що реалізується переважно по тілу зерна на взаємонахилених поверхнях і перешкоджають одне одному. Через це в матеріалі виникають місцеві концентрації напружень, які приводять до утворення втомлювальних мікротріщин шириною близько 0,001 мм. При великій кількості джерел дислокацій зміщення не зосереджуються в окремих об'ємах, а поширюються на великі площі. Тріщини суттєво зменшують твердість поверхні матеріалу і посилюють концентрацію напружень. Глибина тріщини залежить від властивостей матеріалу: на зразках з вуглецевих сталей тріщини більш поширені в глибину, ніж на аналогічних зразках з

корозійностійких сталей. Тріщини втомного характеру швидко розвиваються при проникненні в них рідини, тому що виникаючі в них окисли сприяють розклиненню тріщин, чим послаблюють структуру поверхневого шару матеріалу і прискорюють його ерозію. Хімічні процеси відіграють у цей період допоміжну роль. Зокрема, вони сприяють утворенню на поверхні матеріалу місць, де закріплюються кавітаційні бульбашки, які при колапсі (захлопуванні) спричиняють ерозію поверхні.

В період швидкого збільшення кавітаційних ушкоджень з'являються ділянки поверхні зі значною пластичною деформацією, ушкодженнями зерен з багатьма лініями ковзання і зсуву. Хімічні процеси на цій стадії набувають суттєвого значення поряд з втомою матеріалу. Корозія полегшує виникнення тріщин в місцях підвищеної шорсткості, а одночасна дія циклічних напружень та корозійно-активного середовища обумовлює розвиток переважно внутрішньокристалічних тріщин, які характерні для корозійної втомлюваності матеріалу. Вплив середовища зводиться, в основному, до інтенсифікації процесу корозійної втомлюваності матеріалу, а корозія, яка викликає відносно невелике збільшення втрати маси зразків матеріалу, є каталізатором інтенсивного ерозійного зношування.

Швидкість корозійних руйнувань процесів при кавітаційно-ерозійному зношуванні на два-три порядки вища швидкості корозії в звичайних умовах, причому інкубаційний період розвитку ерозійних ушкоджень скорочується. Збільшення швидкості руйнування в корозійних середовищах пояснюється також інтенсифікацією дифузійних явищ, полегшенням відведення продуктів корозії (окисних плівок) від поверхні, руйнуванням і відведенням з неї продуктів зносу (рис. 2.33).

Очевидно, що для вибору конструкційних матеріалів, методів підвищення їх кавітаційно-ерозійної стійкості і оптимальних режимів

здійснення технологічних операцій кавітаційної обробки, практичний інтерес становить початковий період ерозії і наступний період її максимальної швидкості. Проте, залежність кавітаційної зносостійкості матеріалу від його механічних властивостей неоднозначна, не може бути виражена певною залежністю, оскільки визначається його структурою. Вплив кавітаційної дії з різним ступенем достовірності пояснюється двома схемами: дією сферичної хвилі, що виникає при захопуванні кавітаційних бульбашок, і дією ударів кумулятивних мікрострумків, які утворюються при захопуванні кавітаційних бульбашок біля поверхні.

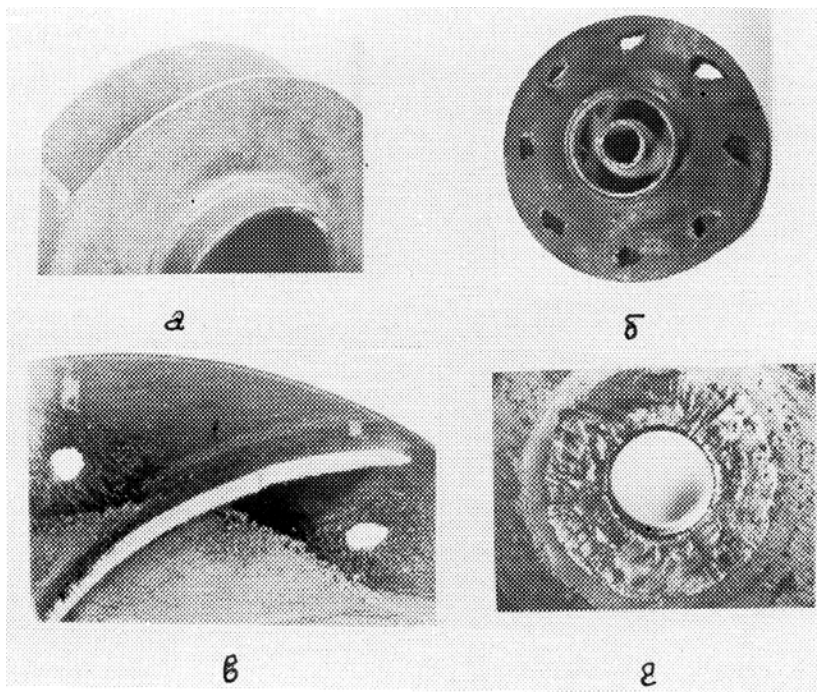


Рис. 2.33 Кавітаційно-ерозійний знос коліс відцентрових насосів НЖВ-150 (а) і 8НДВ (б,в) та сідла клапана гомогенізатора молока (г)

За першою схемою каверна (або бульбашка) при захопуванні від максимального розміру до мінімального, генерує ударну хвилю, яка ініціює ударну взаємодію прилеглих об'ємів рідини з твердою поверхнею. За іншою схемою, при захопуванні каверни (бульбашки) рідина безпосередньо діє на тверду поверхню з тиском гідравлічного удару.

Однак, у багатьох випадках встановлено, що кавітаційна ерозія матеріалів є наслідком дії на нього кумулятивних мікрострумків і сферичних ударних хвиль від симетричного захопування кавітаційних бульбашок у полі змінного тиску. Частина бульбашок може захопуватись на певній відстані від поверхні, внаслідок чого у середовищі поширюється ударна хвиля, яка згасає по мірі віддалення від точки захопування. Енергія хвилі частково передається поверхні, проте, величина тиску на останню не може бути визначальною при ерозійному руйнуванні матеріалу робочих органів технологічного обладнання. При цьому не можна недооцінювати вплив ударних хвиль на технологічні середовища. Встановлено, що при захопуванні пульсуючої бульбашки виникає первинна ударна хвиля з амплітудою тиску 240 МПа і швидкістю поширення 1700 м/с, а також вторинні хвилі, локалізовані в невеликому об'ємі середовища, з швидкістю близько 18100 м/с і з піковим тиском до 710 МПа. Можливо, вторинні хвилі виникають при ударі кумулятивних мікрострумків по стінках сусідніх бульбашок. Подібні явища, вірогідно, створюють умови для узгодженого захопування скупчень кавітаційних бульбашок однакових характерних розмірів. Спільне захопування периферійних бульбашок підвищує енергію бульбашок, які розташовані ближче до центру скупчень, і спрямовану до його середини. Внаслідок цього сумарний тиск захопування майже на порядок вищий, ніж при захопуванні окремої бульбашки. Симетричне захопування бульбашки нестійке в реальних умовах (близькість поверхні, високі градієнти тиску і швидкості, турбулентність тощо). Через це вплив лише ударних хвиль на ерозію відносно незначний, а головною причиною ерозійного руйнування поверхонь робочих органів технологічного обладнання є механічна дія кумулятивних мікрострумків. На думку авторів, останнє добре пояснюється релаксаційною гіпотезою кавітаційного руйнування. За цією гіпотезою ерозійні руйнування виникають від удару кумулятивних

мікрострумків у поверхню, а тривалість удару наближається до тривалості зсувної релаксації рідини. Встановлено, що при захопуванні кавітаційної бульбашки з розміром 1 мм тривалість дії кумулятивного мікрострумка становить $10^{-8} \dots 10^{-7}$ с. В цьому випадку прискорена маса рідини мікрострумка подібна до твердого тіла. Підтвердженням вірогідності такого припущення становить той факт, що характер початку кавітаційних руйнувань аналогічний початковому періоду корозійно-абразивної ерозії.

Під дією послідовних механічних навантажень, які виникають при захопуванні кавітаційних бульбашок, а також в умовах дії різних харчових середовищ, відбувається як кавітаційна ерозія, так і корозія. Їх сукупний вплив підсилює швидкість руйнування матеріалів.

Загальна теорія кавітаційної ерозії, яка б дозволила достовірно оцінити вплив на руйнування конструкційних матеріалів гідродинамічних характеристик кавітаційного потоку – відсутня.

Враховуючи специфіку середовищ харчової і переробної промисловості, а також необхідність забезпечення необхідного технологічного результату, можна виділити такі важливі взаємопов'язані чинники, які обумовлюють виникнення і розвиток кавітаційної ерозії. Це фізико-хімічні властивості середовищ і гідродинамічні характеристики технологічного потоку. Фізичні властивості середовища впливають на динамічні характеристики технологічного потоку і характеристики кавітаційного поля, а хімічні - на поверхневі явища, що відбуваються на межі "тверде тіло – рідина", причому, кавітація викликає зміну хімічної активності середовища.

Кавітаційно - ерозійне зношування робочих органів технологічного обладнання для оброблення (гомогенізації) харчових середовищ має свої особливості. Вони обумовлені різноманітним характером технологічних середовищ, які містять велику кількість розчинених і

нерозчинних речовин, мають різну хімічну активність, поверхневий натяг, густину, температуру тощо. За таких умов технологічне середовище спричиняє на поверхню робочих органів технічних об'єктів одночасний механічний, хімічний і адсорбційний вплив.

Наприклад, плодоягідні соки містять значну кількість кислот, в основному, яблучної. Так, кислотність чорносмородинового соку в перерахунку на яблучну кислоту становить 1,8...3,5 %, сливового – 0,8...1,5 %. Вони є агресивними середовищами для вуглецевих сталей, особливо при температурах понад 50 °С, а хромисті і хромонікелеві сталі достатньо стійкі в широкому діапазоні температур. При обробленні соків, консервованих сірчаним газом, а також яблучного пюре з вмістом консерванту 0,08...0,12 % хромисті і хромомарганцеві сталі піддаються точковій корозії.

Зносостійкість конструкційних матеріалів визначається, головним чином, їх антикорозійними властивостями, а характеристики міцності мають другорядне значення. Водночас, використання кольорових сплавів, легованих і високолегованих сталей не завжди доцільне через дефіцитність, високу вартість і незадовільну оброблюваність різанням. Тому деталі і обладнання, які працюють в несприятливих технологічних умовах, доступніше виготовляти з дешевих, зокрема вуглецевих, сталей з подальшим поверхневим захистом.

2.5.3 Прискорена оцінка зносостійкості матеріалів

Найбільш надійними даними, які дають можливість прогнозувати довговічність деталей, є результати натурних випробувань. Але вони вимагають значних витрат часу і коштів, а подекуди і неможливі. Тому дуже поширені різноманітні методи і стенди, які прискорюють спрацювання матеріалів і дають можливість досліджувати вплив різноманітних факторів на процес зношування і вивчити його механізм.

Для визначення зносостійкості при терті в технологічних рідинах харчових виробництв використовують серійні машини тертя СМЦ-2, СМТ-1, М-22М та М-22П, а також спеціальні стенди. Дослідження тертя і зношування матеріалів проводиться за схемами торцевого тертя, вал-укладка підшипника, вал-лезо ножа, лезо-обгортка-лезо (рис. 2.34) та ін. Стенди дають можливість проводити дослідження в рідких технологічних середовищах при різноманітних швидкостях тертя і питомих навантаженнях на контакті.

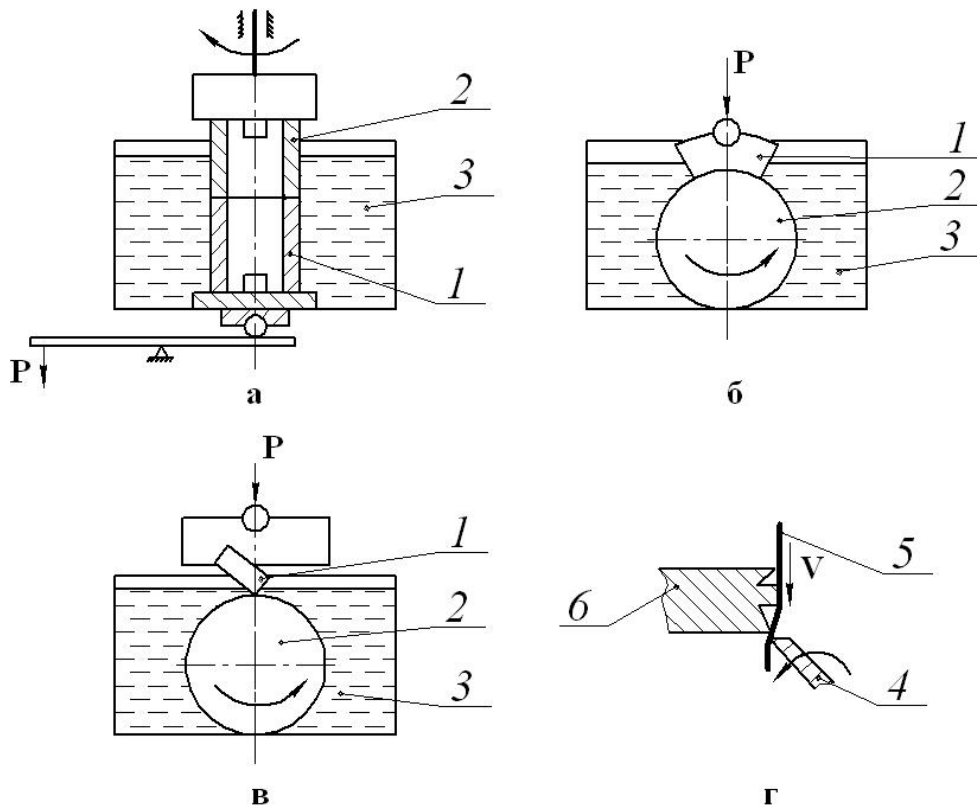


Рис. 2.34 Схеми випробувань на тертя і зношення:
а) торцевого тертя; б) вал – укладка підшипника; в) вал – лезо ножа; г) лезо – обгортка – лезо; 1 – зразок; 2 – контртіло; 3 – технологічне середовище; 4 – ніж рухомий; 5 – обгортка; 6 – ніж нерухомий

Вони забезпечені системами терморегулювання, пристроями для вимірювання параметрів тертя (моменту тертя). Величина зносу визначається по втраті маси досліджуваних зразків або безпосереднім лінійним вимірюванням.

Електрохімічні властивості металів, сплавів і покриттів оцінюють прискореними методами за величиною і характером зміни в часі електродних потенціалів, а також за потенціодинамічними поляризаційними кривими, побудова яких детально описана в підручниках з електрохімії.

Наприклад, електродні потенціали металевої поверхні, зміцненої наплавкою захисного покриття на торець циліндричного зразка 1, можна виміряти за допомогою пристрою, поданого на рис. 2.35. Крім зразка у скляний стакан разом з досліджуваним середовищем 6 встановлюється електрод порівняння 2 і допоміжний електрод 3, а циліндрична поверхня зразка ізолюється від середовища шаром лаку 4. Потенціал поверхні зразка оцінюється з використанням потенціостата 5, а середовище, в разі потреби, перемішується за допомогою магнітного змішувача 7,8.

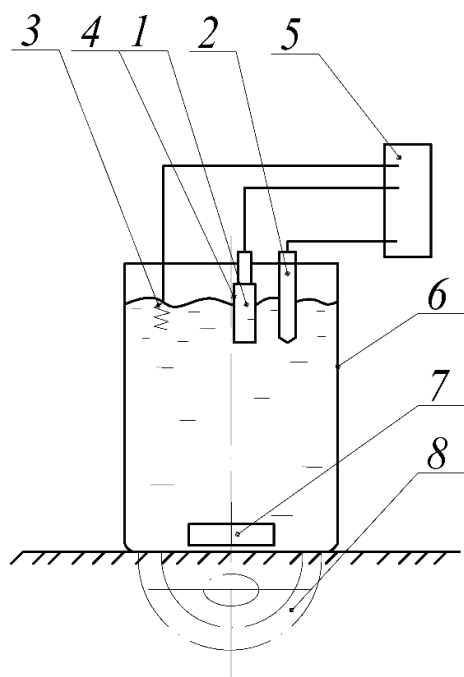


Рис. 2.35 *Схема пристрою для вимірювання електродних потенціалів і отримання поляризаційних кривих: 1 – металічний зразок з покриттям (досліджуваний електрод); 2 – електрод порівняння; 3 – допоміжний електрод; 4 – шар захисного лаку; 5 – потенціостат; 6 – скляний стакан для середовища; 7,8 – магнітний перемішувач*

Для оцінки зносостійкості матеріалів при кавітаційно-ерозійному і гідроабразивному зношенні використовують спеціальні стенди: ударно-ерозійний (УЕС), магнітострикційний (МСВ) і з обертовими дисками (УВД).

Метод дослідження на УЕС (рис. 14.14) ґрунтується на фізичній ідеї, що кавітаційно-ерозійне зношування є наслідком безпосередніх ударів мікрооб'ємів рідини. Зношування зразків на УЕС відбувається при пересіченні ними з великою (до 60 м/с) швидкістю струменю рідини.

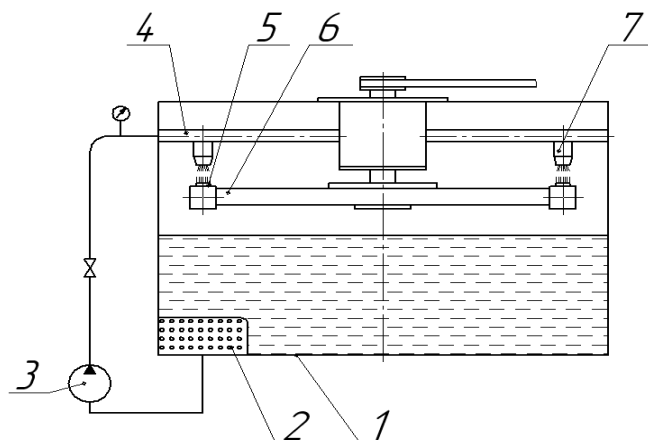


Рис. 2.36 *Схема ударно-ерозійного стенда:*

1 – герметична ємність, 2 – фільтр; 3 – відцентровий насос; 4 – струменерозподільник; 5 – зразок; 6 – ротор; 7 – сопло

На стендах з магнітострикційними вібраторами (МСВ) (рис. 2.37) зразки піддаються дії ультразвукової кавітації з частотою коливань 22 кГц і амплітудою близько 30 мкм. Ці стенди досить компактні, відзначаються малою тривалістю дослідів, невеликим об'ємом робочого середовища, а тому їх застосовують найчастіше. Стенди УЕС і МСВ споряджаються системою терморегулювання середовища і апаратурою для електрохімічних вимірювань.

Для досліджень, наближених до умов роботи обладнання, використовувався стенд з обертовими дисками УВД (рис. 2.38). В цьому стенді при обертанні диска з отворами зі швидкістю близько 30 м/с за останніми утворюється кавітаційна зона, в якій встановлені досліджувальні зразки. На такому стенді відтворюються умови, що реально зустрічаються у відцентрових насосах.

Використовуючи на УЕС і УВД абразивно-рідинні суміші, можна проводити дослідження гідроабразивного зношування. Величину зносу у дослідженнях кавітаційно-ерозійного і гідроабразивного зношування на

перерахованих стендах визначають по втраті маси досліджуваних зразків за певний час випробувань.

З метою скорочення тривалості дослідів намагаються проводити їх при якомога більших навантаженнях, швидкостях тощо. Але при цьому треба мати на увазі, що така інтенсифікація процесу зношування допустима тільки поки зберігається якісна картина і вид зношування. У дослідженнях корозійно-механічного, хіміко-механічного, кавітаційно-ерозійного зношування, при інтенсифікації лише механічного навантаження на експериментальних стендах, змінюється співвідношення між механічним і корозійним факторами і показники зносостійкості, визначені експериментально і в реальних умовах роботи деталей обладнання, можуть значно відрізнятись.

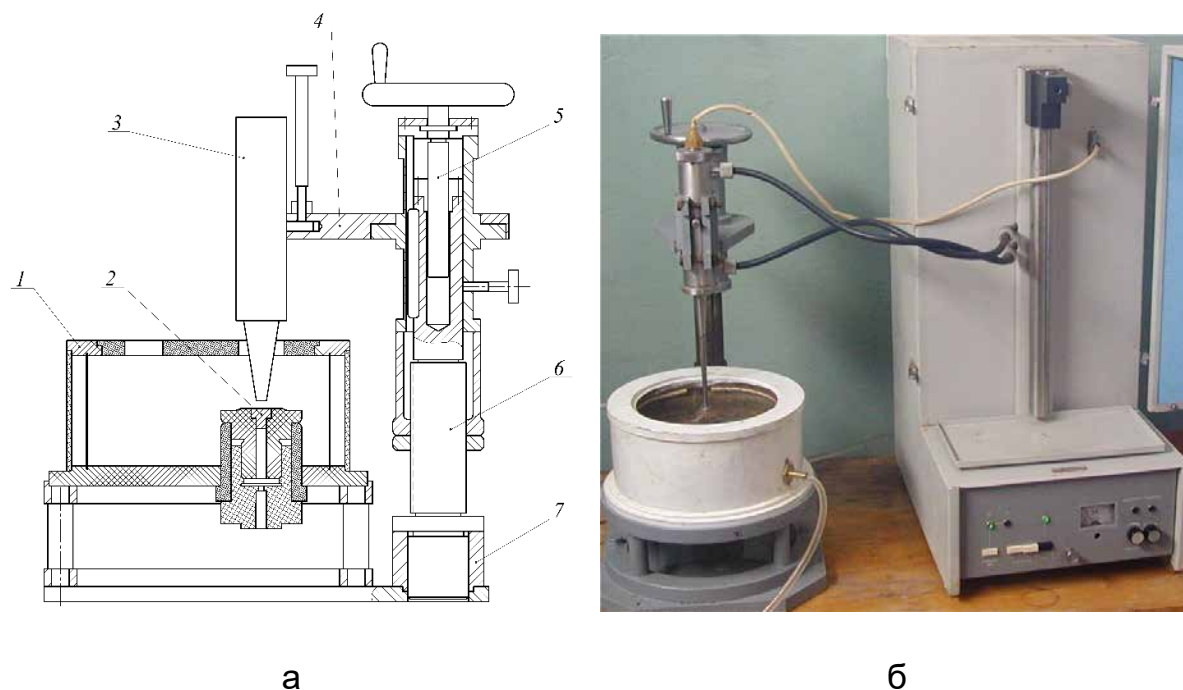


Рис. 2.37 Загальний вигляд (а) і схема (б) установки з магнітострикційним вібратором (МСВ): 1 – бак з водяною сорочкою; 2 – зразок; 3 – МСВ; 4 – вузол кріплення МСВ; 5 – гвинт; 6 – стояк; 7 – основа

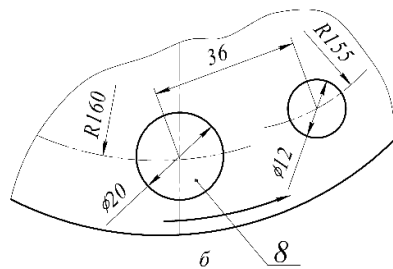
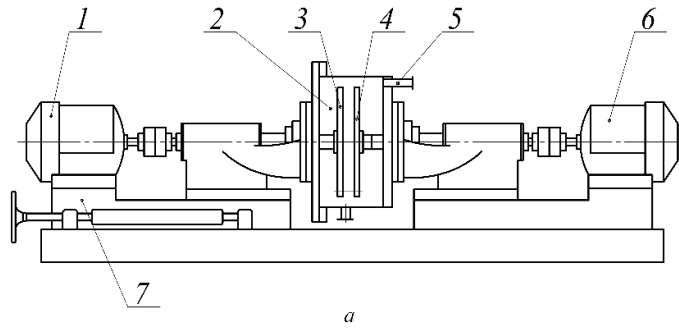


Рис. 2.38 Схема УВД (а) і розташування досліджуваного зразка (б):

1,6 – приводи; 2 – камера;
3,4 – обертові диски;
5 – патрубок підводу робочої рідини; 7 – рухома каретка;
8 – зразок

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Дайте класифікацію видів тертя.
2. Дайте характеристику рідинному та граничному тертю.
3. Дайте характеристику чистому та сухому тертю.
4. Від яких чинників залежить коефіцієнт тертя?
5. Як впливає якість поверхонь тертя деталей і залишкові напруження на зносостійкість деталей машин?
6. Як впливають фізико-хімічні властивості поверхонь деталей вузла тертя на його спрацювання?
7. За рахунок чого змінюється стан поверхонь деталей в процесі тертя і зношування?
8. Як відбувається руйнування зв'язків на поверхнях тертя?
9. Опишіть сучасні уявлення про природу зношування твердих тіл.
10. У чому сутність втомлювальної теорії зношування деталей машин?
11. Назвіть і охарактеризуйте види зношування деталей машин і обладнання, які стандартизовані.
12. Дайте характеристику явища вибіркового переносу і назвіть способи забезпечення його реалізації.

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

13. Як можна використати вибіркового перенос для підвищення надійності і довговічності харчового обладнання?
14. У яких випадках у машинах і апаратах проявляється водневе зношування?
15. Чому вплив водню на тертьові деталі є негативним?
16. У чому різниця між хімічною і електрохімічною корозією металів?
17. Які середовища харчових і переробних виробництв є електролітами?
18. Що називається енергією гідратації молекул та як вона впливає на виникнення позитивного і негативного потенціалу в середовищах – електролітах?
19. У якому випадку при контакті двох різнорідних металів або сплавів виникає гальванічний елемент?
20. Опишіть механізм водневої і кисневої деполяризації металів в середовищах – електролітах.
21. Поясніть механізм пасивування металів у середовищах – електролітах.
22. Як впливає мікроструктура сплавів на їх корозійну стійкість?
23. У яких випадках проявляється корозійна втома металів?
24. Опишіть різновиди корозійних руйнувань металів?
25. Назвіть основні методи корозійних випробувань металів і сплавів.
26. Як впливають технологічні середовища переробних і харчових виробництв на корозійну стійкість чорних і легированих вуглецевих сплавів?
27. Як впливають склад і характеристики середовищ молокопереробних виробництв на інтенсивність спрацювання деталей обладнання?
28. Назвіть агресивні компоненти технологічних середовищ на прикладах переробних і харчових виробництв.
29. Як запобігти ерозійному і гідроабразивному зношуванню в середовищах галузі?
30. Поясніть явище кавітаційно-ерозійного зношування обладнання в технологічних середовищах харчових і переробних виробництв.
31. Яка роль механічного і корозійного чинників в умовах кавітаційно-ерозійного зношування деталей технологічного обладнання?
32. Опишіть області застосування кавітації в технологічних процесах харчових виробництв.
33. Запропонуйте способи захисту харчового обладнання від кавітаційного зношування.

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

34. Представте аналіз основних процесів, що відбуваються в умовах хімічної корозії.

35. Представте аналіз основних процесів, що відбуваються в умовах електрохімічної корозії.

Розділ 3 ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМ ТА ВИПРОБУВАННЯ ЇХ НА НАДІЙНІСТЬ

3.1 Оцінка ступеня пошкодження матеріалу деталей машин

Чисельна оцінка величини пошкодження матеріалу деталі є досить складним завданням, оскільки:

- спостерігається велике різноманіття видів пошкоджень (табл. 3.1);
- пошкодження може поширюватися на весь об'єм матеріалу або на його поверхневі шари;
- пошкодження може розповсюджуватися на весь об'єм матеріалу або на всю поверхню деталі, а також мати локальний характер (повне або локальне пошкодження);
- значення, що оцінює ступінь пошкодження, має бути пов'язане із зміною вихідних параметрів виробу.

Існують два методи оцінки ступеня пошкодження.

Згідно з *першим методом* вибирають чисельні критерії для безпосереднього вимірювання пошкодження виробу. Наприклад, деформація деталі, її лінійне або вагове зношування, глибина і розміри каверн для локального руйнування поверхні тощо. Однак часто, особливо для локальних видів пошкодження, буває важко безпосередньо оцінити ступінь пошкодження.

У цьому випадку використовують *другий метод*, коли про пошкодження судять за зміною вихідного параметра. Наприклад, для місцевих пошкоджень тіла деталі або при появі пластичних зон ступінь пошкодження оцінюють за втратою несучої здатності (міцності); локальні пошкодження золотника гідросистеми оцінюють за зменшенням тиску тощо.

Оцінити ступінь пошкодження поверхні можна трьома групами методів: інтегральними, коли показник оцінює сумарний ефект

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

пошкодження, диференційними, якщо він характеризує ступінь пошкодження в кожній точці або ділянці даної поверхні, а також за вихідними параметрами виробу. Для оцінки пошкодження користуються також геометричними, ваговими і фізичними показниками.

До *інтегральних* методів належать показники, що оцінюють втрату маси або об'єму поверхні внаслідок її пошкодження, наприклад: зношування деталі масою U_d (мг) - тобто втрата маси по всій поверхні внаслідок зношування; об'ємний показник корозії U_v (мм³) - тобто об'єм пошкодженого або видаленого матеріалу тощо.

До цих показників необхідно зарахувати середні значення лінійного зношування поверхні U_{cp} , або середній глибинний показник корозії. Аналогічні показники можуть застосовуватися і для явищ наростоутворення, де вони оцінюють кількість не видаленого, а доданого матеріалу.

Таблиця 3.1

Показники ступеня пошкодження матеріалу виробу

Пошкодження		Метод оцінки ступеня пошкодження		
		Інтегральний	Диференційний	За вихідними параметрами виробу
Глибинне		Послаблення перерізу тріщинами (фактична площа перерізу). Сумарна деформація деталі. Кількість дислокацій у небезпечному перерізі	Розмір тріщин та їх розподіл. Епюра деформації. Розподіл дислокацій по об'єму деталі	Втрата несучої здатності деталі
Поверхнєве	Повне	Вагове зношування. Середнє зношування. Об'ємний показник корозії	Лінійне зношування поверхні. Глибинний показник корозії. Зміна твердості по поверхні	Зміна температури, коефіцієнта тертя, втрата щільності, тиску, вібрації

	Локальне	Сумарна площа пошкодження. Кількість дефектів на одиницю площі. Розміри найбільшого пошкодження	Закони розподілу параметрів, що характеризують окремі пошкодження. Щільність пошкодження на окремих ділянках поверхні	

Результативнішими є *диференційні* методи для оцінки ступеня пошкодження поверхні. До них належать - лінійне зношування U (мкм), тобто зміна розмірів деталі під час її зношування у напрямку, перпендикулярному до поверхні тертя. Аналогічно застосовується глибинний показник корозії, що оцінює зменшення товщини металу в кожній точці (зоні) поверхні. Ці показники є функцією координат даної точки поверхні ($x=1$ - довжини, $y=a$ - ширини), тобто $U=f(a,l)$ (рис.3.1). Аналіз цієї залежності дає змогу встановити необхідні для даних умов числові показники ступеня пошкодження.

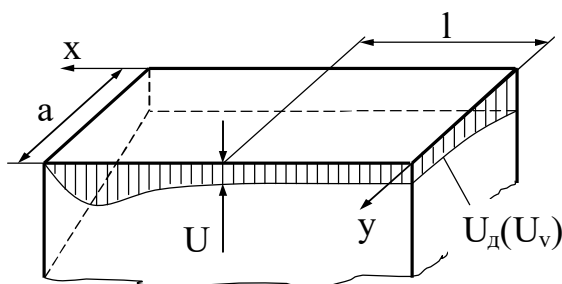


Рис. 3.1 Схема повного пошкодження поверхні

Як було сказано вище, про втрату виробом працездатності, особливо для локальних пошкоджень, можна говорити за його вихідними параметрами, оминаючи етап числової оцінки ступеня пошкодження. Це можна подати у вигляді схеми:

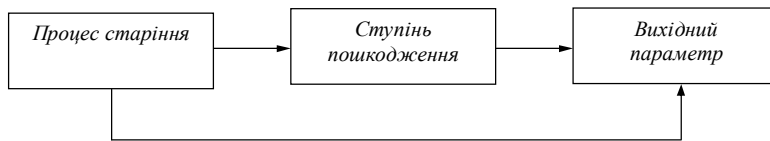
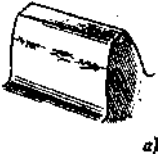
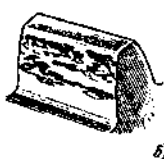
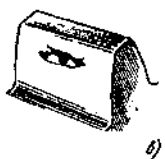
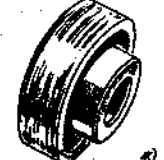
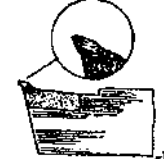
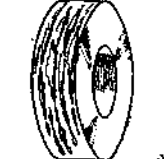


Рис. 3.2 Схеми оцінки ступеня пошкодження

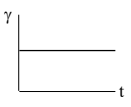
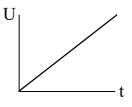
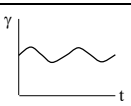
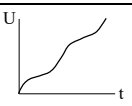
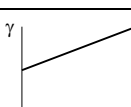
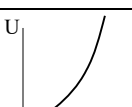
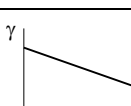
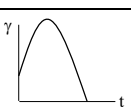
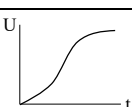
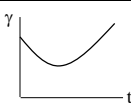
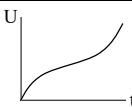
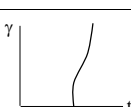
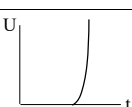
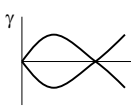
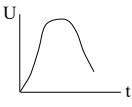
Таблиця 3.2

Види локальних пошкоджень поверхонь та методи їх оцінки

	Нормальне	Інтенсивне	Одиничне
Втома			
Розтріскання			
Зношування			
Наростання утворення			

Таблиця 3.3

Типові закономірності проходження у часі процесів старіння

Процеси (за γ -характеристикою)		$\gamma(t)=dU/dt$	$U(t)$	Приклади
Стационарні	Постійні			Зношування $U=kt$
	Псевдо-стационарні			Зношування при змінних режимах
Монотонні	Ті, що зростають			Зношування при забрудненні поверхонь $U=kt^n$; $n>1$; $U=A(e^{-kt}-1)$
	Ті, що зменшуються			Зношування у період прироблювання, розпад мартенситу $U=kt^n$; $n<1$ $U=A(1-e^{-kt})$
Екстремальні	З максимумом			Корозія короблення $\gamma=\alpha te^{-kt}$
	З мінімумом			Повзучість, зношування, корозія
Із запізненням				Втома, крихке руйнування
Знакозмінні				Зміна механічних характеристик

В табл. 3.3 подана класифікація та приклади локальних

пошкоджень поверхонь для найпоширеніших процесів - втоми, роз'їдання, зношування і наростоутворення. Вони поділені на три види - пошкодження, що характерні для нормальних умов експлуатації, інтенсивні пошкодження, що виникають або при важких умовах і режимах експлуатації, або ж після певного періоду роботи виробу і, нарешті, одиничні пошкодження, які поражають обмежену частину поверхні і які виникають під час раптових відмов.

Застосовувані інтегральні методи, хоча і дуже прості, але дають менше інформації про ті зміни, яких зазнає поверхня виробу в процесі експлуатації. До них належать: відсоток пошкодженої площі, середня кількість пошкоджень (дефектів) на одиницю площі, розміри (площа, глибина) найбільшого пошкодження або середнє значення пошкоджень тощо.

Ці показники деякою мірою характеризують ступінь пошкодження без диференціації параметрів окремих локальних пошкоджень та їх розподіл по робочій поверхні.

На практиці, наприклад, у ремонтних службах застосовують нормативи на граничний ступінь пошкодження за одним із вище перерахованих критеріїв.

Більш повну інформацію про локальні пошкодження дають диференційні характеристики, які оцінюють різноманітність та кількість пошкоджень, а також і їх розподіл по поверхні тертя. Так, часто корисним є застосування законів розподілу розмірів локальних пошкоджень, які дають можливість судити, який відсоток пошкоджень даного розміру зустрічається серед всіх існуючих. Це особливо важливо знати, коли на вихідні параметри виробу впливає розмір (глибина, площа) окремих пошкоджень.

Типові закономірності проходження у часі процесів старіння приведені в таблиці 3.2, де розглянуті характерні особливості

стаціонарних, монотонних та екстремальних процесів, а також процесів із запізненням та знакозмінних.

3.2 Математичні методи оцінки параметрів надійності систем

3.2.1 Основні положення статистичної математики у теорії надійності

Визначення показників надійності технологічного обладнання і машин за допомогою математичних методів на основі узагальнення нагромадженої масової статистичної інформації із сфери їх експлуатації дає змогу встановлювати імовірнісні закономірності та співвідношення між випадковими чинниками, які впливають на рівень надійності об'єктів. При цьому застосовують апарат теорії імовірностей і математичної статистики. Практичним підґрунтям у використанні цих розділів математичних наук є досвід, спостереження, активний експеримент.

Застосовують такі специфічні поняття: **випробування (дослід), подія, випадкова величина, імовірність, частота, частість.**

Випробування (дослід) - це практичне здійснення деяких умов чи правил. Під час виконання дослідів виникають явища (події). Вони бувають поодинокими, коли явище виникло один раз при багаторазовому повторенні досліду і більше не виникає. Переважно ж події бувають масовими, тобто такими, які повторюються за багаторазового проведення дослідів. У практиці експлуатації технологічного обладнання галузі маємо справу з масовими подіями.

Власне **подія** - це явище, яке виникає у результаті досліду. Отже, експлуатація об'єктів харчової промисловості з позицій теорії імовірностей - це випробування (дослід), а виникнення їх відмов за певний період часу чи наробітку - це події.

Події бувають: **вірогідні, неможливі, випадкові, сумісні, несумісні, рівноможливі та незалежні.**

Вірогідні - такі, які в усіх дослідах завжди виникають (наприклад, зміна розмірів деталей внаслідок їх зношування).

Неможливі події – які в усіх дослідах ніколи не виникають (наприклад, наявність не зношеного колінчастого вала холодильного компресора, який надійшов у ремонт чи вичерпав свій ресурс).

Випадкові події – такі, які в результаті дослідів можуть виникати, або не виникати (відмова якогось конструктивного елемента об'єкта на заданому проміжку часу або наробітку).

Сумісні - це дві випадкові події, одна з яких не виключає можливості появи іншої (наприклад, відмова контрольних приладів дифузійного апарата цукрового заводу, як подія А, не виключає відмови його провиду, як події В).

Несумісні - це такі дві події, якщо при випробуваннях поява однієї виключає появу іншої (відмова приводу і працездатний стан згаданого дифузійного апарата - це події, які не можуть виникати одночасно).

Рівноможливі - це декілька можливих подій, які появляються у процесі випробування (відмови дозувального механізму пакувальної машини, вимірювальних приладів, транспортера тощо). До них належать і сумісні події.

Незалежні події - це такі, поява яких не залежить від того, яка подія виникла перед цим (наприклад, попередня відмова системи контролю не впливає на наступну відмову системи забезпечення вакууму у ректифікаційному апараті спиртового заводу).

Очевидно, що факти виникнення подій (відмов) є якісною характеристикою результатів випробувань. Кількісну характеристику складають випадкові величини та їх значення.

Випадковою величиною називається така, яка у результаті дослідів може набувати таке або інше значення, причому наперед (перед дослідом)

невідоме. Наприклад, напрацювання об'єкта до, чи на відмову, середній ресурс, знос його деталі тощо. Випадкові величини позначають заголовковими латинськими літерами (X, Y та ін.), а їх можливі кількісні значення відповідними рядковими (x, y тощо). Випадкові величини можуть бути дискретними та безперервними.

Дискретна випадкова величина - це така, кількість можливих значень якої можна перерахувати, і вона має певний обсяг вибірки (наприклад, кількість дефектних деталей, значень зносу, відмов тощо).

Безперервна випадкова величина - це така, яка у деякому інтервалі часу може набувати будь-якого значення (тривалість безвідмовної роботи об'єкта, його ТО чи ремонту тощо). З метою кількісної оцінки виникнення випадкових подій під час реалізації різних дослідів користуються виразом, числове значення якого буде тим більшим, чим вища можливість появи подій. Цей вираз в теоретичному сенсі називається **імовірністю події** і визначається із співвідношення

$$P(A) = m / n, \quad (3.1)$$

де $P(A)$ - імовірність появи події A; m - кількість випадків у досліді, які сприяють появі події A; n - загальна кількість дослідів.

Експериментальне значення імовірності появи події називається **експериментальною (емпіричною) частотою** або відносною частотою (позначається через W_i) і визначається так:

$$W_i = m_i / n_i, \quad (3.2)$$

де m_i - частота появи випадкової події (відмови); n_i - загальна кількість проведених дослідів для визначення емпіричної частоти.

Імовірності випадкових величин або подій можна додавати і множити. Для цього користуються відповідними формулами додавання і множення імовірностей.

Формула додавання імовірностей випадкових величин A_i :

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (3.3)$$

Таким чином, імовірність появи однієї з декількох незалежних і несумісних подій дорівнює сумі імовірностей цих подій. Для випадку повної групи таких подій A_i будемо мати:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1 \quad (3.4)$$

На практиці у дослідженнях надійності обладнання, машин та їх систем розглядають, як правило, дві несумісні протилежні події - працездатний стан з імовірністю P та стан їх відмов з імовірністю Q . Тоді, очевидно, що:

$$P + Q = 1, \text{ а } Q = 1 - P \quad (3.5)$$

Формула множення імовірностей:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B) \quad (3.6)$$

Якщо дві події A і B є незалежними, то ймовірність сумісної появи їх дорівнює добуткові ймовірностей цих подій.

Якщо $P(A) = P(B)$ то $P(AB) = P(A)^2$

Якщо маємо більше, ніж дві незалежних події, то

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \dots P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (3.7)$$

При цьому, якщо $P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_n)$, то

$$\prod_{i=1}^n P(A_i) = P(A_i)^n \quad (3.8)$$

Користуючись формулою множення імовірностей не важко встановити, що система послідовно з'єднаних об'єктів не може бути надійнішою від найменш надійних своїх конструктивних складових.

Приклад. Нехай об'єкт складається з двох послідовно з'єднаних агрегатів, імовірність безвідмовної роботи яких становить $P_1 = 0,8$; $P_2 = 0,9$. Отже, імовірність безвідмовної роботи об'єкта становитиме: $P = P_1 \cdot P_2 = 0,8 \cdot 0,9 = 0,72$.

Для залежних випадкових подій формула множення імовірностей набуває такого вигляду:

$$P(AB) = P_B(A) \cdot P_A(B) \quad (3.9)$$

де $P(AB)$ - імовірність одночасної появи подій A і B ; $P_B(A)$ - імовірність появи події A за умови, що вже виникла подія B (цю імовірність ще називають умовною імовірністю).

3.2.2 Показники безвідмовності невідновлювальних виробів

Події, які мають місце при роботі (або випробуваннях) машин чи систем, відбуваються внаслідок сумісної дії великої кількості причин, що можуть проявлятися в випадковому сполученні. Для великої кількості діючих об'єктів ці події приймають певний характер розподілу в часі, що підпорядковується законам розподілу випадкових величин. Тобто теорія надійності базується на законах математичної статистики, а тому надійність і всі її показники необхідно розглядати в імовірнісному аспекті.

Якщо розглядати в загальному вигляді результати спостережень за роботою великої кількості N об'єктів на протязі певного періоду часу t , то, по завершенню цього терміну, виявиться n_D об'єктів, для яких вибрана подія (наприклад, відмова) не відбулася, і n_B об'єктів, для яких ця подія мала місце. Тобто по завершенню періоду t маємо n_D дієздатних об'єктів і n_B об'єктів, що відмовили. Тоді відносна кількість відмов:

$$F^*(t) = \frac{n_B}{N} \approx Q^*(t) \quad (3.10)$$

Якщо спостереження проводяться для прогнозування надійності, то величину $F(t)$ можна розглядати як кількісну оцінку імовірності відмови, або, якщо N досить велике, як імовірність відмови $Q(t)$.

При цьому імовірність безвідмовної роботи:

$$P^*(t) = \frac{n_D}{N} = 1 - \frac{n_B}{N} = 1 - F^*(t) \quad (3.11)$$

Враховуючи, що імовірність відмови та імовірність безвідмовної роботи є взаємовиключаючими поняттями, то

$$P^*(t) + F^*(t) = 1 \quad (3.12)$$

Із приведених залежностей виходить, що

при $t = 0$, $n_B = 0$, і $F(t) = 0$, а $P(t) = 1$;

при $t = \infty$, $n_B = N$, і $F(t) = 1$, а $P(t) = 0$;

Таким чином, видно, що не спадаюча функція $F(t)$ яка зі збільшенням аргумента зростає від 0 до 1 (монотонно для безперервних процесів і ступінчасто для дискретних). Ця функція називається інтегральною (рис. 3.3) і в загальному вигляді позначається $F(x)$.

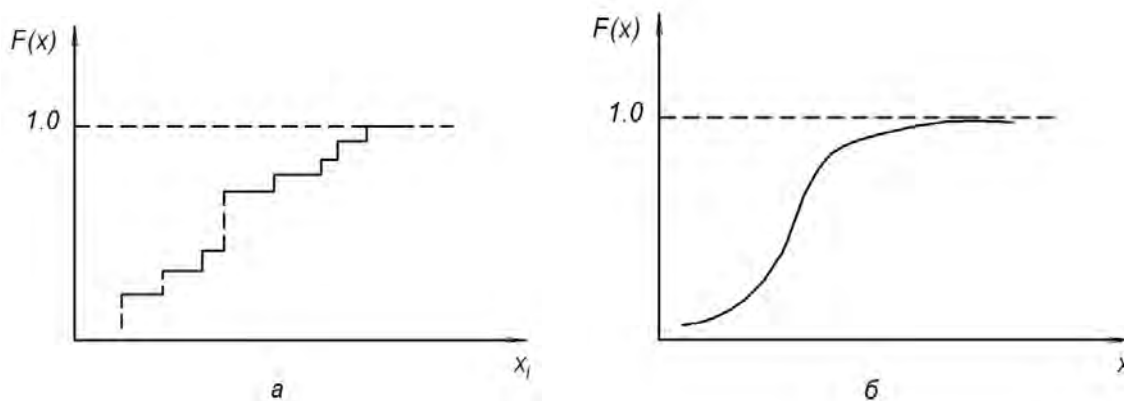


Рис 3.3 Інтегральні емпіричні функції розподілу дискретної (а) і безперервної (б) випадкових величин

Похідна від функції розподілу по поточній перемінній називається **густиною розподілу** випадкової величини:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{d(x)} \quad (3.13)$$

Це є диференціальна функція. В статистичній трактовці вона запишеться так:

$$f(t) = \frac{\Delta n_B}{N \cdot \Delta t} = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Для без перервних величин:

$$f(x) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP}{dt} \quad (2.6)$$

Диференціальну функцію $f(t)$ можна побудувати за результатами випробувань. При обмеженій кількості випробувань з відомим результатом відношення кількості об'єктів зруйнованих n_{Bi} до загальної кількості випробуваних за цей же час у цих же умовах в математичній статистиці називається частістю настання відмови:

$$W = n_{Bi} / N\Delta t \quad (3.15)$$

Наприклад, при випробовуваннях на втому деякої кількості зразків N руйнування для кожного зразка настає при різній кількості навантажувальних циклів (або часу руйнування t). Розташування визначених випадкових значень наробітків у зростаючому порядку створює **упорядкований** або **варіаційний ряд**. Можливо, що кожне значення випадкової величини t зустрічається не один, а n разів.

Варіаційний ряд випадкових величин подають графічно (рис. 3.4). Ділиться весь часовий інтервал на рівні відрізки з кроком Δt та визначається кількість зруйнованих зразків n_{Bi} , які попали в кожний інтервал t_i . Відкладається по осі ординат кількість зразків, які відмовили в інтервалі часу Δt часу:

$$\overline{W} = \sum_{i=1}^n n_{Bi} / \Delta t \cdot N \quad (3.16)$$

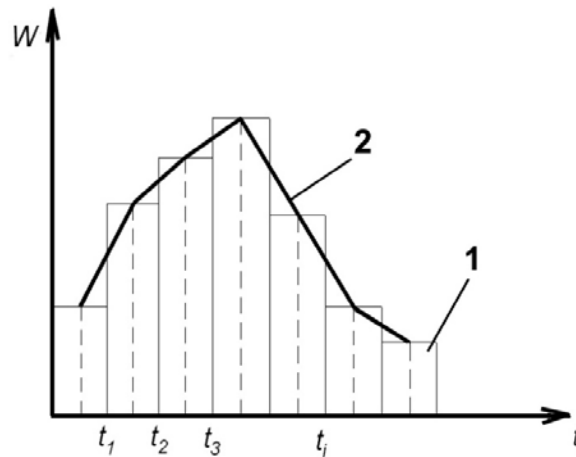


Рис. 3.4 Гістограма (1) і полігон (2) розподілу відмов у часі

При нескінченно великій кількості випробовувань ступінчастий графік гістограми наближається до плавного графіка (функції) і називається густиною розподілу імовірності настання події, або густиною розподілу випадкової величини $f(t)$. Форма диференціальної функції це характерний закон розподілу випадкової величини. (рис 3.5)

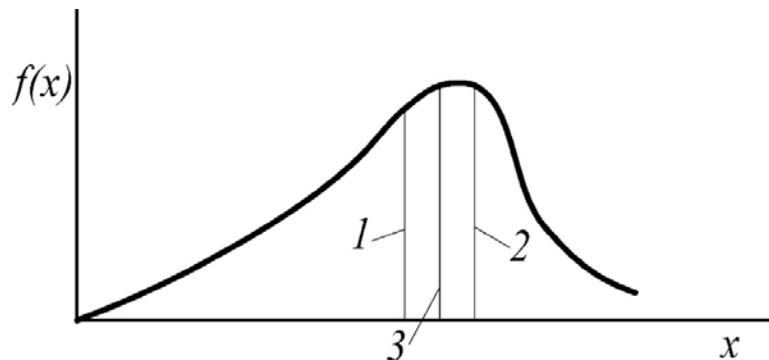


Рис. 3.5 Густина імовірності та характеристики групування випадкової величини: 1 - медіана; 2 - мода; 3 - математичне сподівання

Диференціальна функція $f(x)$ характеризується: математичним сподіванням, модою, квантиллю, дисперсією (середнім квадратичним відхиленням), коефіцієнтом варіації. (рис. 3.5)

- **Математичне сподівання** (середнє значення) m_x – основна і найпростіша характеристика випадкової величини X . Значення математичного сподівання, що визначається за результатами спостережень, для дискретних і безперервних величин називають

оцінкою математичного сподівання, або оцінкою середнього значення $\bar{X}$:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}, \quad \text{або} \quad \bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{g_i x_i}{N}, \quad (3.17)$$

де x_i – поточне значення випадкової величини; g_i – кількість однакових значень x_i ; N - загальна кількість спостережень. В першій формулі складають всі N членів, в другій-кількість членів з різними значеннями x_i . При досить великій кількості спостережень вважають, що $m_x = \bar{X}$. В імовірнісних задачах математичне сподівання визначають в залежності від густини розподілення $f(x)$ (для безперервних величин) або імовірності ρ_i появи значення x_i (для дискретних величин):

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx; m_x = \sum_{i=1}^N \rho_i x_i \quad (3.18)$$

- **Мода** – значення випадкової величини, що зустрічається найчастіше, або найбільш імовірне її значення.

- **Квантилю** називають значення випадкової величини, що відповідає заданій імовірності. Квантиль, що відповідає імовірності 0.5, називається медіаною.

- **Медіана** є центром групування випадкової величини. Площа під графіком ділиться медіаною навпіл.

Для нормального закону розподілення випадкових величин, що описується відомою кривою Гаусса, яка подана нижче, математичне сподівання мода і медіана співпадають.

- **Дисперсія** випадкової величини-це математичне сподівання квадрату відхилення цієї величини від її математичного сподівання.

Оцінка дисперсії випадкової величини – середнє значення квадрату різниці між значеннями випадкової величини і її середнім значенням:

$$D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \text{ або } D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N g_i (x_i - \bar{X})^2, \quad (3.19)$$

де N – загальна кількість спостережень; x_i – поточне значення випадкової величини; $\bar{X}$ – середнє значення випадкової величини; g_i – кількість однакових значень випадкової величини.

Поняття „дисперсія” означає розсіювання і характеризує розбїг випадкової величини.

Для безперервних випадкових величин:

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx \quad (3.20)$$

Для дискретних випадкових величин:

$$D_x = \sum (x_i - m_x)^2 \rho_i, \quad (3.21)$$

де ρ_i імовірність появи значення x_i .

Дисперсія вимірюється квадратом розмірності випадкової величини. У зв'язку з тим, що зручніше користуватися характеристикою розсіювання, що має розмірність випадкової величини, була введена характеристика – **середнє квадратичне відхилення**, тобто квадратний корінь з дисперсії:

$$S_x = \sqrt{D_x} \quad (3.22)$$

Для оцінки розсіювання випадкових величин за допомогою безрозмірної (відносної) характеристики використовують **коефіцієнт варіації**, що дорівнює відношенню середнього квадратичного відхилення до математичного сподівання:

$$V_x = S_x / m_x \quad (3.23)$$

Приклад. Визначити кількісні характеристики функції $P(t)$, $F(t)$, $f(t)$ колінчастого вала холодильного компресора при випробуваннях його на втому по заданому варіаційному ряду наробітків до руйнування (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

**Варіаційний ряд наробітків колінчастих валів
холодильних компресорів до відмови ***

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

Інтервали наробітку (год.)	1-5	5-9	9-13	13-17	17-21
№ рядка	Наробіток (год.)				
1	1,0	5,1 6,1	9,0 9,5 10,0 11,0 12, 0	13,0 16, 5	17, 0
2	1,5	5,2 6,3	9,1 9,5 10,1 11,1 12,1	13,5 16,6	17,5
3	2,0	5,3 6,5	9,1 9,6 10,2 11,2 12,2	14,0	18,0
4	2,5	5,4 6,7	9,2 9,6 10,3 11,3 12,3	14,5	18,5
5	3,0	5,5 7,0	9,2 9,7 10,4 11,4 12,4	15,0	19,0
6	3,5	5,6 7,1	9,3 9,8 10,5 11,5 12,5	15,5	19,5
7	4,0	5,7 7,2	9,3 9,9 10,6 11,6 12,6	16,0	20,0
8	4,5	5,8 7,5	9,4 9,9 10,7 11,7 12,7	16,5	20,5
9	4,8	5,9 8,0	9,4 9,9 10,8 11,8 12,8	16,5	
10	4,9	6,0 8,9	9,4 9,9 10,9 11,9 12,9	16,5	
*N = 100 – кількість випробуваних колінчастих валів.					

$t_i^{cp} = (t_i + t_{i+1})/2$ – середній наробіток вала в інтервалі наробітку;

$w_i = \frac{n_i}{\Delta t} N$ – частість настання відмови;

$f(t) = n_i/N$ - густина розподілу випадкової величини;

$F(t) = \sum f(t) = Q(t)$ – імовірність відмови колінчатого вала;

$P(t) = 1 - Q(t)$ – імовірність безвідмовної роботи вала.

Таблиця 3.5

Результати розрахунку показників надійності

Номер інтервалу	$\Delta t = 4$ $(t_{i+1} - t_i)$	t_i^{cp}	n_i	$f(t) =$ $w\Delta t$	$F(t)$	$P(t)$
1	1-5	3	10	0,100	0,10	0,90
2	5-9	7	20	0,200	0,30	0,70
3	9-13	11	50	0,500	0,80	0,20
4	13-17	15	12	0,120	0,92	0,08
5	17-21	19	8	0,080	1,00	0,00

Оцінку математичного сподівання зробимо за формулою:

$$m_t = \frac{1}{N \sum n_i t_i^{cp}} = \frac{1}{100 \cdot (310 + 720 + 1150 + 1512 + 198)} = 10 \text{ год.}$$

Оцінку дисперсії знаходимо за формулою:

$$D_t = \frac{1}{N} - 1 \sum (t_i - m_t)^2 \cdot n_i = \frac{1}{99(10(-7)^2 + 20(-3)^2 + 50(1)^2 + 8(9)^2)} = 16,84$$

Середньо квадратичне відхилення:

$$S_t = \sqrt{D_t} = \sqrt{16,84} = 4,1$$

Коефіцієнт варіації:

$$V_t = \frac{S_t}{m_t} = \frac{4,1}{10} = 0,41$$

Розрахунки показників надійності колінчастого вала холодильного компресора подано на рис. 3.6.

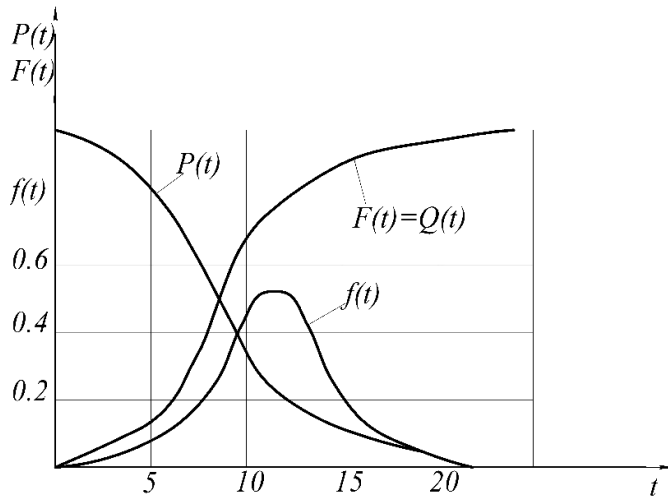


Рис. 3.6 Показники надійності колінчастого вала холодильного компресора: $P(t)$ - імовірність безвідмовної роботи; $F(t)=Q(t)$ - імовірність відмови; $f(t)$ - функція густини розподілу випадкової величини

Імовірність відмов, і безвідмовної роботи (в часі t)

через функцію густини розподілу $f(t)$ пов'язані залежностями:

$$F(t) = Q(t) = \int_0^t f(t)dt; \text{ при } t = \infty \quad F(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 \quad (3.24)$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (3.25)$$

Функція $Q(t)$, як правило, безперервна, і існує безперервна **густина розподілу наробітку до відмови**, яку називають також частотою відмов. **Частота відмов** є густина розподілу часу безвідмовної роботи або похідна від імовірності відмови.

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}, \quad (3.26)$$

Властивістю $f(t)$ є те, що

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (3.27)$$

Графік $f(t)$ часто називають **кривою розподілу наробітку до відмови**.

Величина $f(t)dt$ характеризує імовірність відмови за інтервал наробітку $(t, t+dt)$ об'єкта, взятого навмання з групи однакових. При цьому невідомо, чи працездатним був цей об'єкт на початку інтервалу (тобто в момент t) чи відмовив раніше. Це не завжди зручно. Тому $f(t)$ як самостійний показник надійності невідновлюваних об'єктів знаходить обмежене застосування.

Для визначення статистичної оцінки частоти відмов розглянемо інтервал часу $(t + \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2})$, де Δt - довжина цього інтервалу. Тоді

$$f^* \cdot (t) = \frac{n(t + \Delta t/2) - n(t - \Delta t/2)}{N\Delta t} = \frac{n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{N\Delta t}, \quad (3.28)$$

де $n(t + \Delta t/2) - n(t - \Delta t/2)$ - кількість систем, що відмовили на інтервалі часу $(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)$, N - загальна кількість випробуваних об'єктів чи систем.

Доведемо справедливості цієї оцінки. Кількість систем, що відмовили протягом часу Δt , можна визначити через $N_0(t + \Delta t/2)$ і $N_0(t - \Delta t/2)$ - кількості систем, що працювали без відмови протягом часу $(t - \Delta t/2)$ і $(t + \Delta t/2)$ відповідно. Тоді

$$n \cdot (t - \Delta t/2, t + \Delta t/2) = N_0(t + \Delta t/2) - N_0(t - \Delta t/2) \quad (3.29)$$

Отже, при достатньо великій кількості систем N , поставлених на випробування, можна записати:

$$N_0(t - \Delta t/2) = NP(t - \Delta t/2) \quad (3.30)$$

$$N_0(t + \Delta t/2) = NP(t + \Delta t/2) \quad (3.31)$$

З урахуванням (2.22) і (2.23) перепишемо (2.20), зважаючи, що

$$P(t - \Delta t/2) > P(t + \Delta t/2) \quad f \cdot (t) = - \frac{NP(t + \Delta t/2) - NP(t - \Delta t/2)}{N\Delta t}$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ дістанемо:

$$f^*(t) = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{NP(t + \Delta t/2) - NP(t - \Delta t/2)}{N\Delta t} = - \frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt}, \quad (3.32)$$

що саме так і є.

Розмірність $f(t)$ є оберненою до розмірності наробітку t .

Для невідновлюваних об'єктів більш широке застосування, ніж частота відмов, має **інтенсивність відмов** $\lambda(t)$ - умовна густина імовірності виникнення відмов об'єкта, яка визначається для заданого наробітку за умови, що до цього наробітку відмова не виникла.

У статистичній трактовці інтенсивність відмов є відношення кількості об'єктів, які відмовили n_B за період часу Δt до кількості об'єктів, які залишились дієздатними із загальної кількості випробуваних об'єктів:

$$\lambda(t) = n_B / n_D \Delta t \quad (3.33)$$

В імовірнісній трактовці, враховуючи, що $n_D / N \cong P(t)$, матимемо:

$$\lambda(t) = f(t) / P(t).$$

В статистичній трактовці можна подати так:

$$\begin{aligned} \lambda^*(t) = f^*(t) / P^*(t) &= \frac{n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{N\Delta t} \frac{N}{N - n(t)} = \\ &= \frac{n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{\Delta t(N - n(t))} = \frac{n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{\Delta t N_C}, \end{aligned} \quad (3.34)$$

де N_C - середня кількість працездатних об'єктів на інтервалі Δt ;

$n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)$ - кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі $(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)$; $N - n(t)$ - кількість об'єктів працездатних до моменту t .

Розмірність $\lambda(t)$ є оберненою до розмірності наробітку (t) .

Враховуючи, (2.18) і (2.26), одержимо вираз для імовірності безвідмовної роботи в залежності від інтенсивності відмов :

$$dP(t)/dt = -\lambda(t)dt \quad (3.35)$$

Інтегруючи даний вираз, отримаємо: $\ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t)dt$. Звідси:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (3.36)$$

Це співвідношення є одним із основних рівнянь теорії надійності.

Іноді доводиться визначати імовірність безвідмовної роботи для будь-якого періоду роботи виробу, тобто для будь-якого проміжку часу t , після того як об'єкт напрацював певний час T . Така задача розв'язується виходячи з теореми множення імовірностей (імовірність сумісного проявлення незалежних подій дорівнює добутку імовірностей цих подій):

$$P(T+t) = P(T) \cdot P(t) \text{ або } P(t) = \frac{P(T+t)}{P(T)}, \quad (3.37)$$

де $P(T)$ і $P(T+t)$ – імовірність безвідмовної роботи за час T і $T+t$, а $P(t)$ – умовна імовірність безвідмовної роботи за час t . Термін «умовна» тут застосовується в зв'язку з тим, що імовірність визначається з припущенням, що об'єкт не мав відмови до початку інтервалу часу або наробітку t .

Отже, умовна імовірність безвідмовної роботи, в інтервалі часу t дорівнює відношенню функцій надійності в кінці і на початку інтервалу.

Розглянемо важливу особливість високонадійних об'єктів. Якщо $P(t) \geq 0,99$ то $f(t) \approx \lambda(t)$. Помилка, якої при цьому допускаємося, складає всього 1% і, як правило, не перевищує помилок статистичного визначення $f(t)$ і $\lambda(t)$.

Варто розрізняти величини $f(t)$ і $\lambda(t)$. Імовірність $f(t)dt$

характеризує імовірність відмови об'єкта (системи або елемента) за проміжок часу $(t, t + dt)$, взятого навмання з групи таких самих об'єктів, причому невідомо, в якому стані (працездатному чи ні) він знаходиться. Імовірність $\lambda(t)dt$ характеризує імовірність відмови об'єкта на інтервалі $(t, t + dt)$, взятого з групи працездатних до моменту часу t .

Приклад 1. На випробовування поставлено 1000 однотипних технічних пристроїв. За перші 3000 годин відмовило 80 пристроїв, а за інтервал часу (3000, 4000) год. – ще 50. Визначити частоту та інтенсивність відмов пристроїв в інтервалі (3000, 4000) год.

Розв'язок Згідно з (2.20)

$$f^*(3500) = \frac{50}{1000(4000 - 3000)} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

Згідно з (2.26)

$$\lambda^*(3500) = \frac{50}{(4000 - 3000) \cdot ((1000 - 80) + (1000 - 80 - 50)) / 2} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ дає наочну картину зміни безвідмовності.

Приклад 2. На випробування поставлено $N=100$ невідновлюваних технічних систем. До моменту $t_1 = 7500$ год. кількість систем, що відмовили, $n(t_1) = 10$; до моменту $t_2 = 8000$ год. $n(t_2) = 11$; до моменту $t_3 = 8500$ год. $n(t_3) = 13$.

Визначити імовірність безвідмовної роботи $P(t_2)$, імовірність відмови $Q(t_2)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t_2)$ технічних систем.

Розв'язок. Згідно з (2.1) та (2.2)

$$P^*(8000) = \frac{100 - 11}{100} = 0,89; \quad Q \cdot (8000) = 1 - P \cdot (8000) = 1 - 0,89 = 0,11.$$

Оскільки момент часу t_2 розташований посередині інтервалу (t_1, t_2) , то згідно з (2.26)

$$\lambda^*(8000) = (n(8500) - n(7500)) / \left(N \left(1 - \left(\frac{n \cdot (8000)}{N} \right) \cdot (t_3 - t_1) \right) \right) =$$

$$= (13 - 10) / \left(100 \cdot \left(1 - \frac{11}{100} \right) \cdot 1000 \right) = 3,37 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

Таким чином, показники надійності $P(t), Q(t), f(t), \lambda(t), m_t$ характеризують безвідмовність об'єкта (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Визначення характеристик надійності за показниками безвідмовності об'єкта

Характеристика	$Q(t)$	$P(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
Функція ненадійності (імовірність відмови) $Q(t)$	-	$1 - P(t)$	$\int_0^t f(t) dt$	$1 - \exp\left(\int_0^t \lambda(t) dt\right)$
Функція надійності (імовірність безвідмовної роботи) $P(t)$	$1 - Q(t)$	-	$1 - \int_0^t f(t) dt = \int_0^\infty f(t) dt$	$\exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)$
Густина розподілу $f(t)$ відмов	$dQ(t)/dt$	$-dP(t)/dt$	-	$\lambda(t) \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)$
Інтенсивність відмов $\lambda(t)$	$(dQ(t)/dt) /$	$\left(\frac{-dP(t)}{dt}\right) / P(t)$	$\frac{f(t)}{\int_0^t f(t) dt} = \frac{f(t)}{P(t)}$	-
Математичне сподівання наробітку до відмови m_t	$\int_0^\infty (1 - Q(t))$	$\int_0^\infty P(t) dt$	$\int_0^\infty t f(t) dt$	$\int_0^\infty \exp\left(-\int_0^x \lambda(t) dt\right) dx$

3.2.3 Показники ремонтпридатності

Важливою характеристикою об'єкта є зручність його обслуговування. Вона є характеристикою технічної конструкції, повинна плануватися на етапі проектування і мати кількісні характеристики. На практиці тривалість відновлення об'єкта майже завжди набагато менша від наробітку між відмовами, але при розрахунках втрат внаслідок відмов і кількості обслуговуючого персоналу її треба враховувати.

Позначимо T_B випадкову величину – час відновлення працездатного стану технічної системи після відмови. Вважатимемо, що розподіл величини T_B не залежить від часу, порядкового номера відновлення, тривалості попереднього відновлення, попереднього наробітку між відмовами.

Імовірність відновлення – це імовірність того, що об'єкт після відмови буде відновлений протягом заданого часу t . Ця характеристика є функцією розподілу часу відновлення і має вигляд:

$$S(t) = P\{T_B < t\}. \quad (3.38)$$

Очевидно, $0 \leq S(t) \leq 1$, $S(0) = 0$, $S(\infty) = 1$. Статистична оцінка для визначення імовірності відновлення має вигляд:

$$S^*(t) = N_B / N_{3B}, \quad (3.39)$$

де N_{3B} – загальна кількість об'єктів, поставлених на відновлення; N_B – кількість об'єктів, час відновлення яких виявився меншим від заданого часу t .

Частота відновлення – це густина розподілу часу відновлення.

Отже

$$f_B(t) = S'(t) \quad (3.40)$$

Статистична оцінка $f_B(t)$ має вигляд:

$$f_B^*(t) = \frac{n_B(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{N_{3B} \cdot \Delta t}, \quad (3.41)$$

де $n_B(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)$ – кількість відновлених об'єктів на інтервалі часу

$$(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2).$$

Інтенсивність відновлення – це умовна густина часу відновлення для моменту часу t і за умови, що до цього моменту відновлення об'єкта не відбувалося. Отже

$$\mu(t) = \frac{f_B(t)}{1 - S(t)} \quad (3.42)$$

Враховуючи, що $S(0)=0$ і залежить (2.50), з виразу (2.52) отримаємо:

$$S(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \mu(x) dx \right] \quad (3.43)$$

При $\mu = const$ матимемо експоненційний розподіл для часу відновлення:

$$S(t) = 1 - e^{-\mu \cdot t} \quad (3.44)$$

Аналогічно $\lambda^*(t)$ статистична оцінка величини $\mu(t)$ матиме вигляд:

$$\mu^*(t) = \frac{n_B(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{N_{CB} \Delta t}, \quad (3.45)$$

де N_{CB} - середня кількість об'єктів, що не відновлювалися на інтервалі часу $(0, t)$.

Середнім часом відновлення є математичне сподівання часу відновлення.

$$m_{tB} = M[T_B] = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt \quad (3.46)$$

Аналогічно (3.24) для статистичної оцінки середнього часу відновлення матимемо:

$$m_{tB}^* = \sum_{i=1}^{N_{3B}} t_{Bi} / N_{3B} \quad (3.47)$$

де t_{Bi} - тривалість відновлення i -го об'єкта.

3.2.4 Показники збережуваності

Особливістю деяких технічних об'єктів є те, що в умовах зберігання переважають поступові відмови внаслідок погіршення характеристик елементів через їх старіння. При цьому навіть для однотипних елементів

залежність параметрів технічного об'єкта від часу зберігання є випадковою функцією. Для передбачення збережуваності треба або проводити випробування, або екстраполяцію характеристик елементів.

Існує великий клас технічних об'єктів і систем, час збереження яких сумірний з часом їх роботи, а іноді і перевищує його. Це об'єкти і системи разового використання (наприклад, системи керування військовими об'єктами) та системи з малим коефіцієнтом використання (наприклад, гальмівне парашутне обладнання для літаків та захисні подушки для автомобілів). Для автоматичних систем керування технологічними процесами харчових виробництв така властивість, як збережуваність, не є суттєвою, тому що найчастіше зберігаються не системи в цілому, а їх окремі елементи. Крім того, тривалість їх збереження відносно невелика.

За стандартом властивість **збережуваність** оцінюється двома основними показниками: середній термін збережуваності і гамма – відсотковий термін збережуваності.

Середній термін збережуваності визначається за формулою:

$$\bar{T}_{зб} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{збi}, \text{ років} \quad (3.48)$$

де $t_{збi}$ – термін збережуваності i -х об'єктів.

Гамма – відсотковий термін збережуваності за умов, що його поточні значення підпорядковані нормальному законові розподілу випадкових величин, можна розрахувати так:

$$T_{зб\gamma} = T_{зб} - U(t_{зб})S, \text{ років} \quad (3.49)$$

де $U(t_{зб})$ – квантиль нормального закону розподілу терміну збережуваності; S – середнє квадратичне відхилення цього показника.

3.2.5 Показники довговічності

Довговічність – це властивість об'єкта зберігати працездатність до граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування і ремонтів. Час роботи любого технічного виробу (наробіток) до граничного стану, оговореного в технічній документації, називається *ресурсом*.

Граничний стан обумовлюється фізичною стійкістю виробу, небезпечністю його подальшої експлуатації або економічними факторами. Для багатьох технічних об'єктів це або час до капітального ремонту, або весь період експлуатації до фізичного чи морального зносу.

Чим менші затрати часу і коштів, які ідуть на відновлення працездатності об'єкта протягом всього періоду його експлуатації, тим вища його довговічність.

Мірою довговічності технічного об'єкта може служити коефіцієнт технічного використання (коефіцієнт довговічності) P_D , який визначається за формулою:

$$P_D = T_p / \left(T_p + \sum_{i=1}^n \tau_{ni} \right) \quad (3.50)$$

де T_p – час роботи машини за весь період експлуатації;

$\sum_{i=1}^n \tau_{ni}$ – сумарний час простоїв машини через відмови (ремонт, регулювання тощо) за весь період експлуатації.

З формули (2.60) виходить, що основними засобами підвищення довговічності технічного об'єкта є скорочення часу, який витрачається на ремонт, і підвищення строку служби його деталей. Очевидно, що P_D залежить від суми, яку можна назвати відносними ремонтними витратами:

$$Z = \frac{\tau_1}{T_1} + \frac{\tau_2}{T_2} + \dots + \frac{\tau_n}{T_n} = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{T_i}, \quad (3.51)$$

Z – це випадкова величина, тому що τ_i, T_i також випадкові величини.

Згідно з теоремою теорії імовірностей, математичне співвідношення суми випадкових величин дорівнює сумі їх математичних сподівань. А це означає, що для визначення середнього значення Z треба визначити середні значення кожного з доданків τ_i/T_i .

Для визначення коефіцієнта технічного використання (коефіцієнта довговічності) P_D необхідно установити його залежність від строків служби деталей (елементів) технічного об'єкта.

Час простою об'єкта через ремонт його деталі чи вузла (елемента) визначається так:

$$\tau_{ni} = \frac{T_p}{T_i} \tau_i, \quad (3.52)$$

де T_p – час роботи об'єкта за весь період експлуатації;

T_i – наробіток i -го елемента об'єкта;

τ_i – трудомісткість ремонту i -го елемента.

Відношення T_p/T_i показує, скільки разів протягом періоду T_p ремонтувався i -й елемент об'єкта.

Підставляючи τ_{ni} в формулу для визначення коефіцієнта довговічності (2.60) отримаємо вираз для визначення цього коефіцієнта через строки служби і трудомісткості ремонту складових елементів об'єкта:

$$P_D = 1 / \left(1 + \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{T_i} \right), \quad (3.53)$$

Коефіцієнт довговічності (коефіцієнт технічного використання за весь період експлуатації об'єкта) є безрозмірною величиною ($P_d \leq 1$), і чим вище його значення, тим більш довговічний об'єкт. Коефіцієнт довговічності кількісно дорівнює імовірності того, що в даний, довільно взятий момент часу об'єкт працює, а не ремонтується. Наприклад, якщо $P_d = 0,95$, то це значить, що 95% часу об'єкт працює, а 5% простоє за весь період експлуатації. Іншими словами, імовірність того, що об'єкт працює в цей, довільно взятий час, а не знаходиться на ремонті або технічному обслуговуванні, складає 0,95.

Деякі інші показники довговічності технічних об'єктів, які обумовлені стандартами, обчислюються за такими формулами.

Середній ресурс і середній термін служби об'єкта:

$$\bar{T}_{cl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}, \text{ год} \quad (3.54)$$

$$\bar{T}_{cl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{cli}, \text{ років} \quad (3.55)$$

де t_{pi} , t_{cli} – відповідно, ресурс і термін служби i -х об'єктів.

Гамма – відсотковий ресурс і термін служби об'єктів за умови, що їх поточні значення підпорядковані нормальному закону розподілу випадкових величин:

$$T_{py} = T_p - U(t'_y) \cdot S'_1, \text{ год} \quad (3.56)$$

$$T_{cly} = T_{cl} - U(t_y) \cdot S'_2, \text{ років}, \quad (3.57)$$

де $U(t'_y)$, $U(t_y)$ – квантилі нормального закону розподілу ресурсу і терміну служби об'єкта; S'_1, S'_2 – середні квадратичні відхилення випадкових значень ресурсу і терміну служби.

Квантиллю називається значення абсциси розподілу наробітків об'єкта, через яке проводиться вертикальна пряма, що буде відтинати

від площі під кривою густини розподілу наробітків заданий її відсоток. Медіана, наприклад, поділяє цю площу навпіл і, отже, є 50 %-ою квантиллю. Графічно це пояснюється таким чином (рис 3.7). якщо квантиль U_t відсікає 25 % площі під кривою її називають квартиль. При цьому розрізняють нижню 25 %-ву квартиль та 75 %-ву верхню квартиль. Значення квантилей для різних законів розподілу випадкових величин протабульовано у літературі з теорії імовірностей.

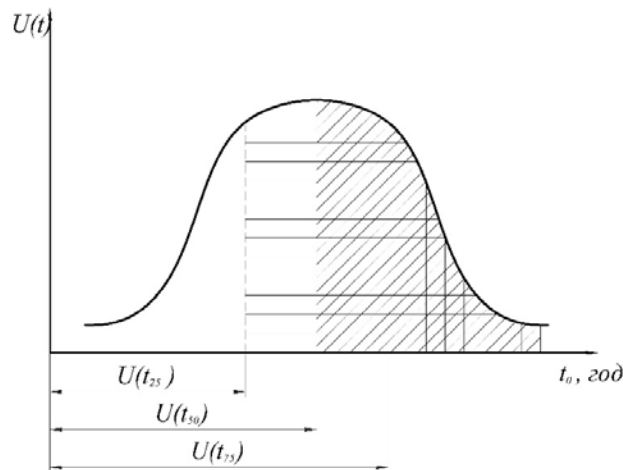


Рис. 3.7 До пояснення сутності квантилі

Технічний об'єкт може бути безвідмовним, але не довговічним. В цьому випадку він з високим ступенем безвідмовності пропрацює заданий період часу і вийде з ладу. Відновлення ж його працездатності може коштувати надто дорого. І навпаки, об'єкт може бути довговічним, але мати недостатньо безвідмовність, а тому часто ремонтуватись чи підналагоджуватись.

Показники довговічності оцінюють втрати працездатності виробу за весь період його експлуатації. Потрібно вміти розрізнити показники для оцінки довговічності елемента виробу і виробу або машини в цілому.

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

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

Показником, що визначає довговічність машини, в цілому може служити коефіцієнт технічного використання $K_{\text{ТВ}}$, який дорівнює:

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{T_{\text{роб}}}{T_{\text{роб}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{рем.}i}}, \quad (3.58)$$

де $T_{\text{роб}}$ - час роботи машини за певний період експлуатації;

$\sum_{i=1}^n T_{\text{рем.}i}$ – сумарна тривалість ремонтів машини за цей же час.

Як основний показник довговічності виробу застосовують коефіцієнт довговічності $K_{\text{Д}}$, що дорівнює коефіцієнтові технічного використання за весь період експлуатації. Час, що затрачено на ремонт і технічне обслуговування, залежить не тільки від методів експлуатації і технології ремонту, але й від конструкції виробу, його придатності для ремонту і обслуговування.

Ремонтпридатність - це властивість виробу, що полягає в його пристосуванні до попередження, виявлення і усунення відмов і неполадок проведенням технічного обслуговування та ремонтів.

Ремонтпридатність визначає затрати часу на ремонти $\sum_{i=1}^n T_{\text{рем.}i}$ (див. формулу (3.1)) і є складовою частиною довговічності.

Для обчислення коефіцієнта довговічності $K_{\text{Д}}$ потрібно встановити його залежність від термінів служби елементів виробу.

Час простою через ремонт i -тої деталі або вузла машини дорівнюватиме:

$$T_{\text{рем}} = n(T_i) \tau_i, \quad (3.59)$$

де T_i - термін служби (напрацювання) до відмови i -тої деталі (вузла) машини; τ_i - тривалість (трудомісткість) її ремонту, зокрема розбирання, збирань і вивірення. Величина $n(T_i)$ показує, скільки разів протягом періоду, що дорівнює $T_{\text{роб}}$, ремонтувалась дана деталь.

Показником надійності з економічного погляду є сума затрат, пов'язаних із виготовленням та експлуатацією машини, поділена на тривалість її експлуатації

$$K_E = \frac{Q_B + Q_E}{T_E}, \quad (3.60)$$

де K_E - економічний показник надійності, грн./год; Q_B - вартість виготовлення нової машини, грн.; Q_E - сумарні затрати на експлуатацію, ремонт та обслуговування машини, грн.; T_E - період експлуатації виробу, год.

Необхідно прагнути до мінімального значення цього показника, раціонально розподіляючи капіталовкладення між сферами виробництва та експлуатації.

3.2.6 Комплексні показники надійності

Окрім розглянутих показників надійності, кожний з яких характеризує одну із властивостей надійності, використовують також комплексні показники, що оцінюють одночасно безвідмовність і ремонтпридатність. До них належать коефіцієнт готовності k_G , коефіцієнт технічного використання k_{mv} та інші.

Ці показники доцільно застосовувати для відновлюваних об'єктів, для яких дозволені відмови і короткочасні перерви в роботі протягом заданого часу роботи. Для таких об'єктів важливе значення має властивість готовності, тобто здатності знаходитися у процесі експлуатації максимальний час у працездатному або готовому до застосування стані.

Розглянемо процес експлуатації відновлюваних об'єктів, для яких дозволені перерви в роботі (рис. 3.8). Хрестиками на рисунку позначені моменти відмов, кружками – моменти закінчення відновлення і

продовження експлуатації. На рисунку видалені проміжки часі, коли об'єкт не працював з інших причин, окрім відмови.

Коефіцієнтом готовності k_{Γ} називають імовірність того, що система виявиться працездатною у довільно вибраний момент часу в усталеному процесі експлуатації:

$$k_{\Gamma} = \frac{m_{tP}}{m_{tP} + m_{tB}} \quad (3.61)$$

де m_{tP} – середній наробіток до відмови відновлюваного об'єкта;

m_{tB} – середній час відновлення.

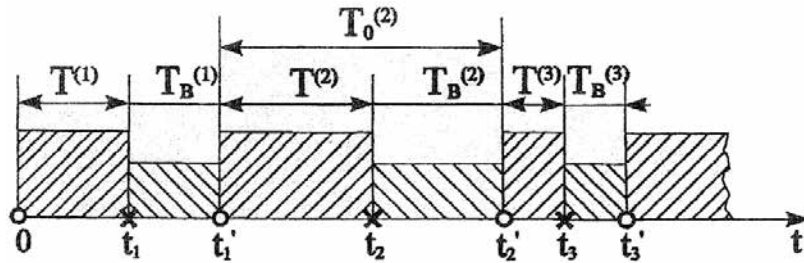


Рис. 3.8 *Схема випадкового часового режиму експлуатації об'єкта:*

$T^{(1)}, \dots, T^{(n)}$ – наробітки між відмовами; $T_B^{(1)}, \dots, T_B^{(n)}$ – тривалість відновлень; $T_0^{(i)}$ – час між $(i-1)$ та i -м відновленням; $t_1, \dots, t_n$ – моменти виникнення відмов; $t_1', \dots, t_n'$ – моменти відновлення працездатного стану

Тобто k_{Γ} дорівнює середній частині часу, протягом якого об'єкт перебуває в працездатному стані. Його статистична оцінка для випадку, коли у випробуваннях беруть участь N об'єктів:

$$k_{\Gamma}^* = N_{\Pi}(t_x) / N \quad (3.62)$$

або один об'єкт (рис. 3.8):

$$k_{\Gamma}^* = \sum_{i=1}^n T^{(i)} / \left(\sum_{i=1}^n T^{(i)} + \sum_{i=1}^n T_B^{(i)} \right), \quad (3.63)$$

де $N_{\Pi}(t_x)$ – кількість об'єктів, працездатних у довільний, достатньо

віддалений від початку випробувань, момент часу t_x ; N – загальна кількість однакових відновлюваних об'єктів, поставлених на випробування; i – порядковий номер відмови.

При визначенні k_T із розгляду виключається заплановані періоди часу, протягом якого застосування об'єкта за призначенням не передбачене (наприклад, інтервали планового технічного обслуговування). Ці періоди враховуються **коефіцієнтом технічного використання**:

$$k_{TB} = m_{tP\Sigma} / (m_{tP\Sigma} + \tau_{TO\Sigma} + m_{tB\Sigma}), \quad (3.64)$$

де $m_{tP\Sigma}, \tau_{TO\Sigma}, m_{tB\Sigma}$ - відповідно, математичні сподівання сумарних відрізків часу перебування об'єкта у працездатному стані, на технічному обслуговуванні і на відновленні за деякий період експлуатації τ_Σ .

Зв'язок між двома розглянутими коефіцієнтами відображує таке співвідношення:

$$k_{TB} = \gamma \frac{k_T}{1 - k_T}, \quad (3.65)$$

де γ – частка часу експлуатації, що припадає на аварійний ремонт.

Розглянемо два об'єкта, що мають однакові коефіцієнти готовності. Нехай перший об'єкт малонадійний, але має малий m_{tB} (незручний в експлуатації), а другий – значно надійніший, але має великий m_{tB} . Нехай, крім того, для реалізації технологічного процесу потрібна тривала безперервна робота об'єкта. Тоді другий об'єкт здатний реалізувати цей техпроцес, оскільки він може тривалий час працювати без відмови. Перший об'єкт не може реалізувати техпроцес, тому що має часті відмови. Хоча цей об'єкт швидко відновлюється, але розв'язати задачу до кінця не може внаслідок того, що кожного разу після відмови треба починати реалізацію техпроцесу спочатку. Перший об'єкт потребує

великої кількості запасних деталей але може обслуговуватися менш кваліфікованим персоналом, тоді як другий потребує обслуговуючого персоналу більш високої кваліфікації, зате малу кількість запасних деталей. Отже, однакові значення k_r ще не означають рівнозначності в надійності об'єктів, зручності у їх використанні, вартості експлуатації. Коефіцієнт готовності є зручною характеристикою технічного об'єкта, що призначений для тривалої безперервної роботи і повинен розв'язувати технологічні задачі протягом короткого інтервалу часу.

Описаний вище коефіцієнт готовності характеризує готовність об'єкта до використання його за призначенням, або ж – це імовірність застати його у працездатному стані у будь-який момент часу без урахування простоїв об'єкта на запланованому то, ремонті, зберіганні чи транспортуванні. Він не враховує простої з організаційних причин. Їх враховує **коефіцієнт оперативної готовності**:

$$k_{ог} = \frac{T_{пц}}{T_{пц} + T_B + T_{орг}}, \quad (3.66)$$

де $T_{пц}$ – сумарна тривалість працездатного стану об'єкта; T_B – сумарна тривалість усунення його відмов; $T_{орг}$ - простої об'єкта з організаційних причин (відсутність наряду на виконання робіт, виклик спеціалістів – налагоджувальників, доставка запчастин).

Коефіцієнт збереження ефективності забезпечує урахування зміни ефективності об'єкта в залежності від тривалості його перебування у працездатному стані. Розраховується за відношенням показника ефективності використання об'єкта у технологічних процесах (наприклад, фактичний обсяг виконаної роботи $V_{р.ф.}$) до номінального значення цього показника $V_{р.н.}$, розрахованого за умови, що відмови об'єкта впродовж того ж періоду не виникають ($k_r=1$):

$$k_{е.в.} = V_{р.ф.} / V_{р.н.}, \quad (3.67)$$

У випадку різкого зниження $k_{e.в.}$ експлуатаційникам потрібно передати об'єкт на капітальний ремонт, або замінити його у технічній системі чи технологічній лінії.

3.2.7 Розрахунок показників надійності за результатами спостережень

За результатами спостережень за роботою технічних об'єктів і їх випробувань можна розрахувати показники надійності. Розглянемо це на прикладах.

Приклад 1. Нехай під спостереженнями перебувало 10 компресорів холодильних машин ($N=10$ од.). На інтервалі наробітку $T=T_2-T_1=10$ тис. год відмовило $m(T_2)=3$ компресори. Знайти імовірність безвідмовної роботи холодильних машин $P(T)$ на інтервалі напрацювання, а також T імовірність їх відмов $Q(t)$.

Згідно з формулою для визначення першого показника маємо:

$$P(T) = 1 - \frac{m(T)}{N} = 1 - \frac{3}{10} = 0,7.$$

Тоді імовірність відмов, яка характеризує протилежний стан становитиме

$$Q(t) = 1 - P(T) = 1 - 0,7 = 0,3.$$

Приклад 2. Під спостереженнями у періоді припрацювання перебувало $N=10$ нових пакувальних машин. Після наробітку $L_1=5$ тис. пакувань відмовили $m(L_1)=2$ пакувальні машини; після наробітку $L_2=6$ тис. пакувань відмовили $m(L_2)=3$ машини; після наробітку $L_3=7$ тис. пакувань відмовили $m(L_3)=4$ машини; після наробітку $L_4=8$ тис. пакувань відмовила $m(L_4)=1$ машина. Визначити середнє напрацювання до відмов L_0 .

$$\bar{L}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N L_{0i} m_i = \frac{1}{10} (5 \cdot 2 + 6 \cdot 3 + 7 \cdot 4 + 8 \cdot 1) = 6,4 \text{ тис. пакувань}$$

Приклад 3. Під спостереженням в умовах звичайної експлуатації перебувало $N(T_0)=10$ од. гомогенізаторів молока. На початку спостережень після наробітку $T_1=110$ тис. хвилин працездатними були $M(T_1)=10$ од. гомогенізаторів. Наприкінці спостережень $T_2=115$ тис. хвилин залишилось працездатними $M(T_2)=5$ од. Визначити інтенсивність відмов гомогенізаторів $\lambda(L)$.

$$\lambda(T) = \frac{M(T_1) - M(T_2)}{N(T_0)(T_2 - T_1)} = \frac{10 - 5}{10 \cdot (115 - 110)} = \frac{5}{10 \cdot 5} = 10^{-4} \text{ хх}^{-1}$$

Приклад 4. На випробуваннях перебувало $N=5$ од. привідних агрегатів ланцюгових транспортерів. На пробігу від $L_1=43$ тис. км. до $L_2=46$ тис. км. відмовило $m(L)_i = 3$ од. агрегатів. Визначити параметр потоку відмов агрегатів транспортерів $\omega(L)$.

$$\omega(L) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{m(L)_i}{\Delta L_i} = \frac{1}{5} \cdot \frac{3}{46 - 43} = \frac{3}{5 \cdot 3} = \frac{1}{5} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}.$$

Мають свої особливості методики розрахунку показників надійності окремих технічних об'єктів, як систем, конструкцію яких складають послідовно і паралельно з'єднані елементи (агрегати, деталі). Методика таких розрахунків буде описана нижче.

3.3 Моделювання відмов

3.3.1 Геометричні характеристики випадкових величин

Геометричні характеристики випадкових величин можна визначати як відхилення від параметрів нормального розподілу (рис. 3.9).

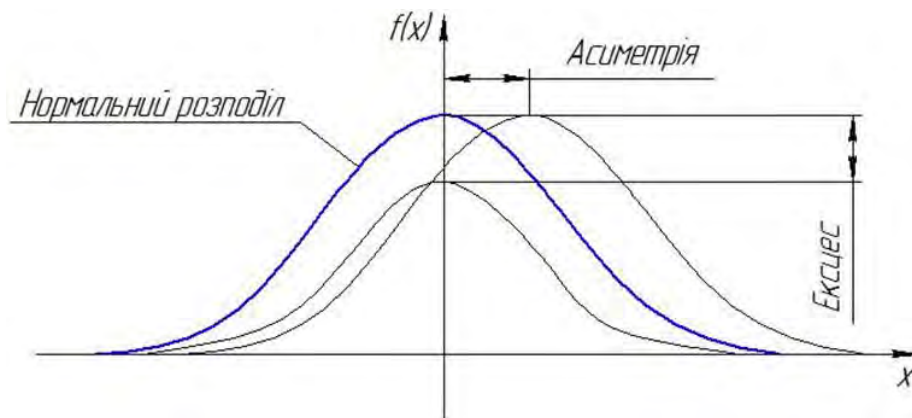


Рис. 3.9 Параметри відхилень від нормального розподілу

Для більш точного виразу випадкових величин при використанні геометричних методів аналізу графік щільності розподілу розбивають відповідно на 4 частини, визначаючи квантілі у квартилях (рис. 3.10-3.12) та на 100 при використанні перцентилів (рис. 3.13).

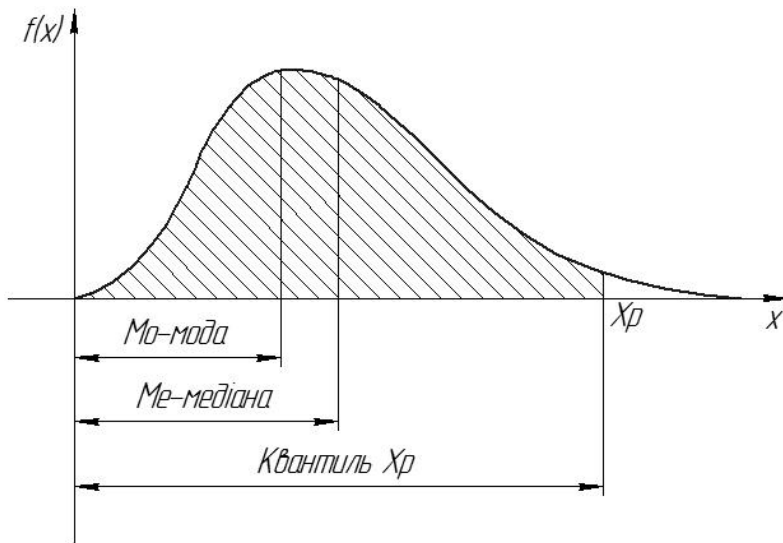


Рис. 3.10 Основні параметри випадкових величин

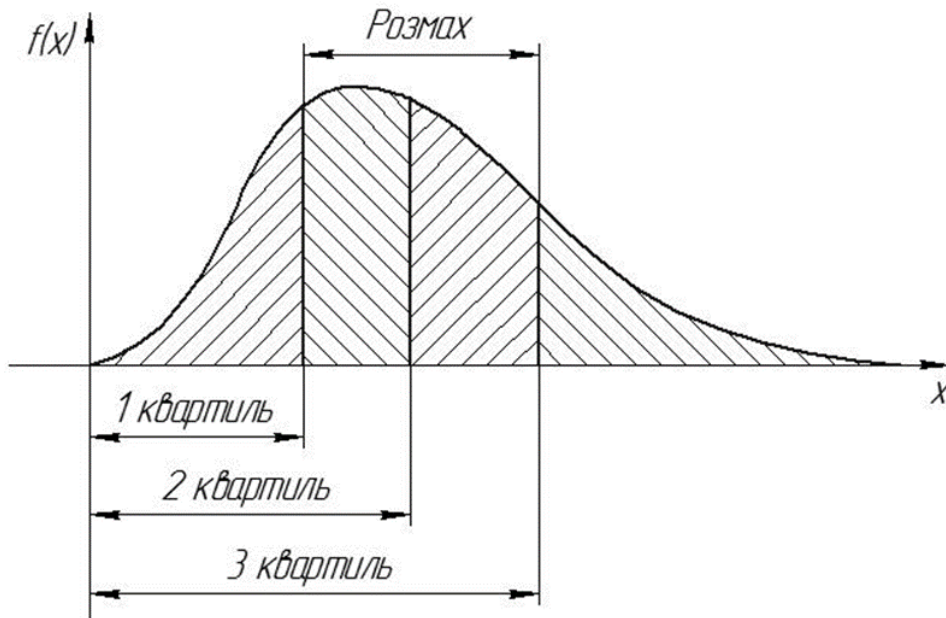


Рис. 3.11 Визначення випадкових величин у квантилях

Квантиль у квантилях

- 1 квантиль – перший або нижній квантиль (0,25 квантиль)
- 2 квантиль – другий квантиль або медіана (0,5 квантиль)
- 3 квантиль – третій або верхній квантиль (0,75 квантиль)

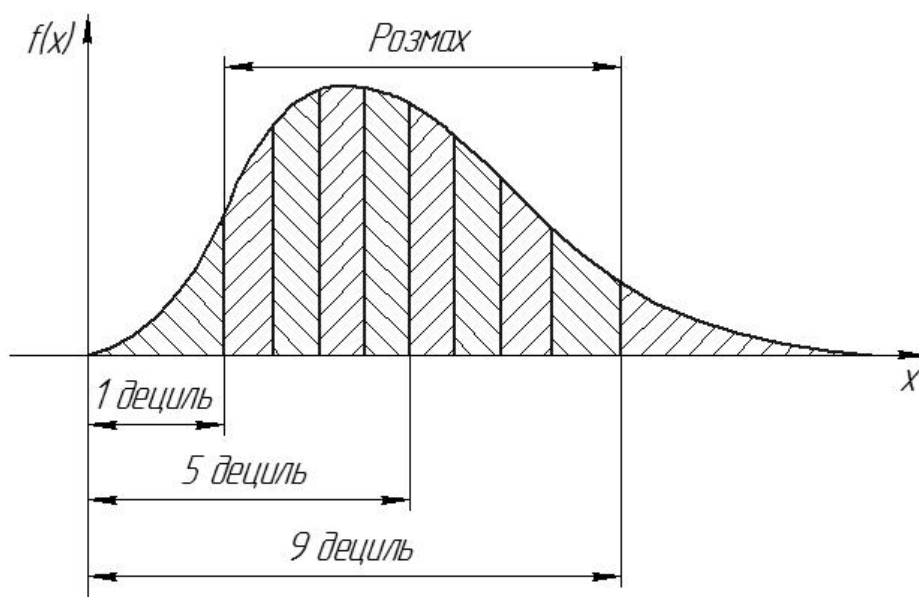


Рис.3.12 Визначення випадкових величин у децилях

Квантиль у децилях

1 дециль – перший або нижній дециль (0,1 квантиль)

5 дециль – п'ятий дециль або медіана (0,5 квантиль)

9 дециль – дев'ятий або верхній дециль (0,9 квантиль)

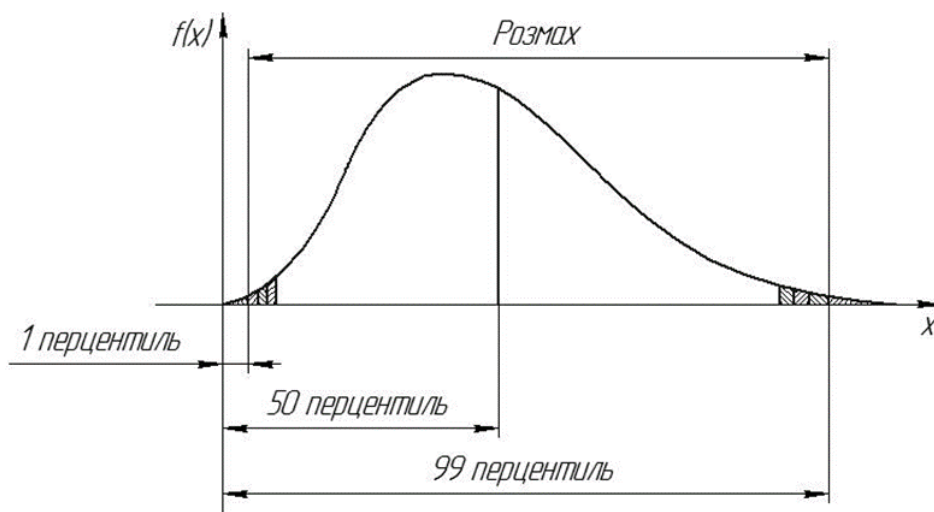


Рис. 3.13 Визначення випадкових величин у перцентилях

Квантиль у перцентилях

1 перцентиль – перший або нижній перцентиль (0,01 квантиль)

50 перцентиль – другий перцентиль або медіана (0,5 квантиль)

99 перцентиль – третій або верхній перцентиль (0,99 квантиль)

Основним показником для оцінки безвідмовності виробу є ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ (коефіцієнт надійності) - ймовірність того, що в даному інтервалі часу $t=T$ (або в межах заданого напрацювання) не виникає його відмова. Значення $P(t)$, як будь-якої ймовірності, може знаходитися в межах $0 \leq P(t) \leq 1$.

Наприклад, коли ймовірність безвідмовної роботи машини протягом $T=1000$ год. дорівнює 0,95, то це означає, що із великої кількості машин даної моделі в середньому біля 5 відсотків втрачають працездатність раніше ніж через 1000 год. роботи.

3.3.2 Ймовірнісні моделі відмов

Історично склалося, що ймовірнісні методи дослідження розвиваються шляхом використання теоретичних розподілів випадкових величин, які часто називають законами теорії надійності. Розглянемо найбільш вживані теоретичні розподіли.

3.3.2.1 Нормальний розподіл

Один з найбільш універсальних, зручних і широко застосовуваних для практичних розрахунків законів розподілу випадкових величин – це закон розподілу Гаусса (рис. 3.14) універсальність його полягає в тому, що він є граничним законом, з якого витікають інші (показниковий, Релея, Вейбулла, Пуассона, біноміальний тощо).

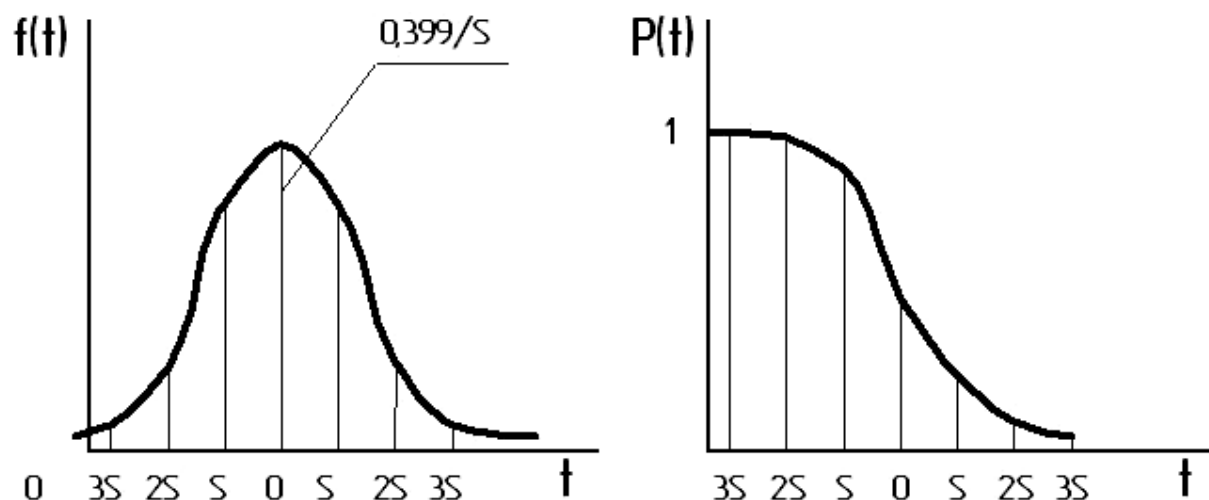


Рис.3.14 Густина імовірності (а) та інтегральна функція імовірності (б) нормального розподілу

Нормальний розподіл проявляється тоді, коли зміна випадкової величини викликана багатьма причинами рівнозначного впливу. Йому підкоряються наробітки до відмови і на відмову більшості відновлюваних і невідновлюваних виробів, які зношуються і кородують, похибки вимірювань тощо.

Функцію густини розподілу розраховують за формулою:

$$f(t) = \frac{1}{S_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S_t^2}} \quad (3.68)$$

Цей розподіл має 2 незалежних параметри: математичне сподівання m_t і середнє квадратичне відхилення S . Значення названих параметрів оцінюють згідно формул:

$$m_t \approx \bar{t} = \sum t_i / N \quad (3.69)$$

$$S \cong s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (3.70)$$

де $\bar{t}$ і S – статистичні оцінки математичного сподівання і середнього квадратичного відхилення (наприклад, часу напрацювання об'єкта до відмови, або на відмову).

Математичне сподівання в цьому законі розподілу визначає положення центру кривої на осі абсцис, а середнє квадратичне відхилення – ширину фігури, описаною цією кривою (рис. 3.15, а). При деякому наробітку t імовірність відмови $Q(t)=F(t)$ наближається до 1,0, а імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ падає до нуля (рис 3.15, б).

Крива густини розподілу випадкової величини тим гостріша і вища, чим менше значення S (рис. 3.15). Вона розповсюджується у межах значень аргументу t від $-\infty$ до $+\infty$. Це не дуже вагомий її недолік, тому що площа, окреслена кінцями кривої, що ідуть в нескінченність, відображає дуже малу імовірність відмови об'єкта. Так, імовірність відмови за період до $m_t - 3S$ складає лише 0,135 % і може не враховуватись у розрахунках. Для періоду $m_t - 2S$ імовірність відмови теж ще низька і не перевищує 2,175%. Найбільша ордината кривої густини розподілу дорівнює $0,399/S$.

Інтегральна функція розподілу: $F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt$ Імовірність відмови та імовірність безвідмовної роботи відповідно: $Q(t)=F(t)$; $P(t)=1-F(t)$. Вирахування інтегралів замінюють застосуванням таблиць, а для спрощення користуються невеликими таблицями, для нормального розподілу, у якого $m_x=0$; $S_x=1$. Функція густини імовірності для цього розподілу має вигляд: $f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ і залежить лише від однієї змінної x (рис. 3.16). Величина x являється центрованою, тому що $m_x=0$, і нормованою, тому що $S_x=1$.

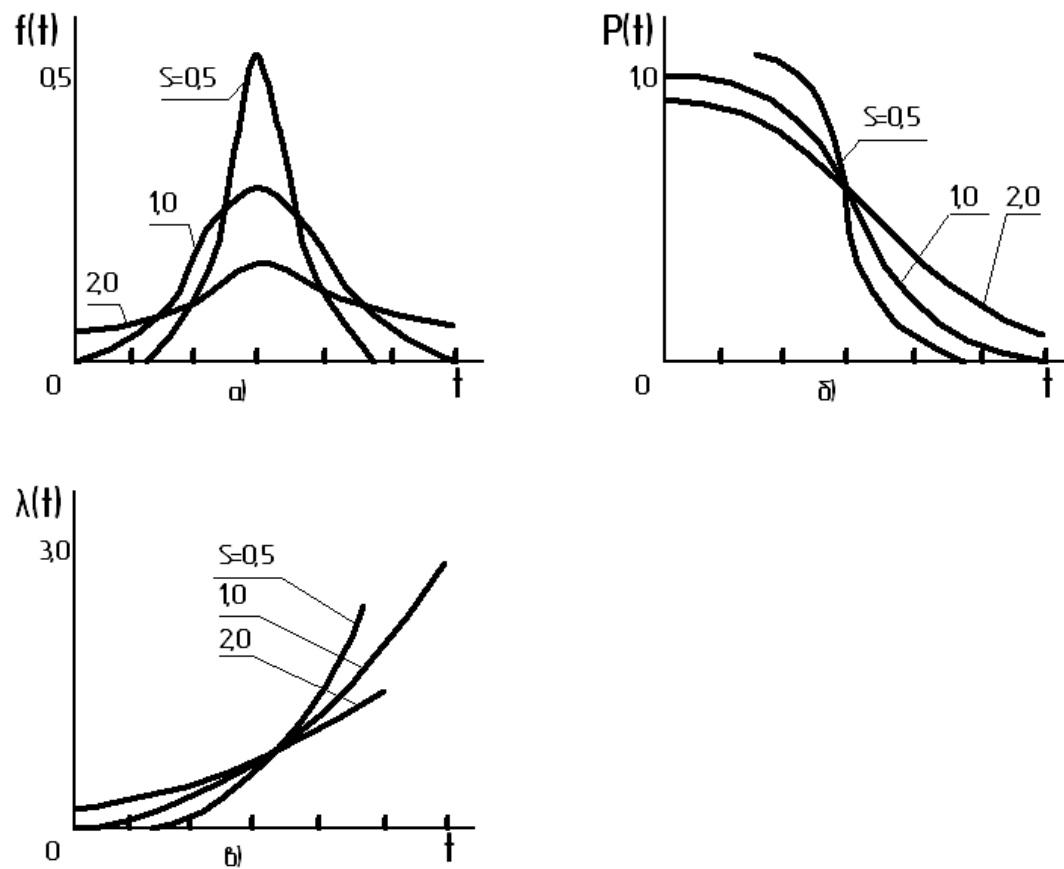


Рис. 3.15 Основні характеристики нормального розподілу випадкової величини при різних значеннях середнього квадратичного відхилення: а – густина імовірності $f(t)$; б – імовірність безвідмовної роботи $P(t)$; в – інтенсивність відмов $\lambda(t)$

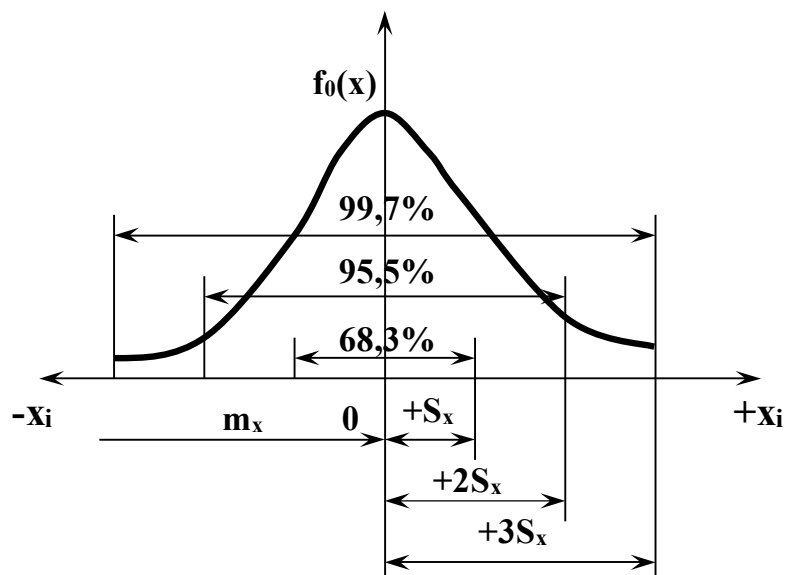


Рис. 3.16 Диференціальна функція нормованого розподілу випадкової величини

Інтегральна функція у цьому випадку описується формулою:

$$F_0(t) = \int_{-\infty}^x f_0(x) dx \quad (3.71)$$

Очевидно, що

$$F_0(x) + F_0(-x) = 1 \quad (3.72)$$

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x) \quad (3.73)$$

Для використання таблиць треба робити підстановку $x = (t - m_t)/S$. При цьому x називається квантиллю нормованого нормального розподілу і позначається U_p .

Густина розподілу, імовірність відмови та імовірність безвідмовної роботи відповідно визначаються так:

$$f(t) = \frac{f_0(x)}{S}; \quad Q(t) = F_0(x); \quad P(t) = 1 - F_0(x) \quad (3.74)$$

значення $f_0(x)$ і $F_0(x)$ беруть з таблиць (наприклад, табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Вихідні дані для розрахунку показників надійності

x	0	1	2	3	4
$f_0(x)$	0,3989	0,2420	0,0540	0,0044	0,0001
$F_0(x)$	0,5	0,8413	0,9772	0,9986	0,9999

В табл. 3.8 приведені безпосередньо значення $P(t)$ в залежності від квантилі:

$$x = U_p = (t - m_t) / S \quad (3.75)$$

Часто замість інтегральної функції використовують функцію Лапласа:

$$\Phi(x) = \int_0^x f_0(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (3.76)$$

Очевидно, що

$$F_0(t) = \int_{-\infty}^0 f_0(x) dx + \int_0^x f_0(x) dx = 0,5 + \Phi(x) \quad (3.77)$$

Таблиця 3.8

Залежність імовірності безвідмовної роботи від квантилі

Нормальний розподіл				Розподіл Вейбулла				
Квантиль, U_p	Імовірність безвідмовної роботи, $P(t)$	Квантиль, U_p	Імовірність безвідмовної роботи, $P(t)$	Параметр форми, m	l/m	B_m	C_m	Коефіцієнт варіації, $V=C_m/B_m$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.000	0.5	-2.054	0.98	0.4	2.5	3.32	10.4	3.14
-0.1	0.5398	-2.1	0.9821	0.417	2.4	2.98	8.74	2.93
-0.126	0.55	-2.170	0.985	0.435	2.3	2.68	7.38	
-0.2	0.5793	-2.2	0.9861	0.455	2.2	2.42	6.22	2.57
-0.253	0.6	-2.3	0.9893	0.476	2.1	2.2	5.27	2.4
-0.3	0.6179	-2.326	0.99	0.5	2.0	2.0	4.47	2.24
-0.385	0.65	-2.4	0.9918	0.526	1.9	1.83	3.81	2.08
-0.4	0.6554	-2.409	0.992	0.556	1.8	1.68	3.26	1.94
-0.5	0.6915	-2.5	0.9938	0.588	1.7	1.54	2.78	1.8
-0.524	0.70	-2.576	0.995	0.625	1.6	1.43	2.39	1.67
-0.6	0.7257	-2.6	0.9953	0.667	1.5	1.33	2.06	1.55
-0.674	0.75	-2.652	0.996	0.714	1.4	1.24	1.78	1.43
-0.8	0.7881	-2.748	0.997	0.833	1.2	1.1	1.33	1.21

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

-0.842	0.8	-2.8	0.9974	0.909	1.1	1.05	1.15	M
-0.9	0.8159	-2.878	0.998	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
-1.0	0.8413	-2.9	0.9981	1.1	0.909	0.965	0.878	0.910
-1.036	0.85	-3.0	0.9986	1.2	0.833	0.941	0.787	0.837
-1.1	0.8643	-3.090	0.999	1.3	0.769	0.924	0.716	0.775
-1.2	0.8849	-3.291	0.9995	1.4	0.714	0.911	0.659	0.723
-1.282	0.9	-3.5	0.9998	1.5	0.667	0.903	0.615	0.681
-1.3	0.9032	-3.719	0.9999	1.6	0.625	0.897	0.574	0.640
-1.4	0.9192			1.7	0.588	0.892	0.54	0.605
-1.5	0.9332			1.8	0.556	0.889	0.512	0.575
-1.6	0.9452			1.9	0.526	0.887	0.485	0.547
-1.645	0.95			2.0	0.5	0.886	0.463	0.523
-1.7	0.9554			2.1	0.476	0.886	0.439	0.496
-1.751	0.96			2.2	0.455	0.886	0.425	0.480
-1.8	0.9641			2.3	0.435	0.886	0.409	0.461
-1.881	0.97			2.4	0.417	0.887	0.394	0.444
-2.0	0.9772			2.5	0.4	0.887	0.380	0.428

Примітка: Для логарифмічно нормального розподілу $U_p = (\ln t - \mu)/S$

Імовірність відмови та імовірність безвідмовної роботи, виражені через функцію $\Phi(x)$ Лапласа, відрізняються межами інтегрування і мають вигляд:

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - m_t}{S}\right); P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{S}\right) \quad (3.78)$$

Треба відмітити, що чим менші величини S , тим вироби кращі, бо в статистичному плані вони мають більш стабільні показники, що дозволяє з більшою надійністю планувати їх експлуатацію.

У вирішенні проблем надійності виникають і зворотні задачі – визначення наробітку, що відповідає заданій імовірності безвідмовної роботи виробу. Такі задачі розв'язують за допомогою квантилей нормованого нормального розподілу за формулою:

$$t = m_t + U_p \cdot S_t \quad (3.79)$$

При цьому також використовують табл. 4.2.

За умови малих коефіцієнтів варіації S/m_t нормальний розподіл добре замінює біноміальний, пуассонів і логарифмічно нормальний.

Розподіл суми незалежних випадкових величин $U=X+Y+Z$, що називається композицією розподілів, при нормальному розподілі складових, також є нормальним розподілом. Математичне сподівання і дисперсію такої композиції розраховують так:

$$m_u = m_x + m_y + m_z; S_u^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2, \quad (3.80)$$

де m_x, m_y, m_z – математичні сподівання складових суми, а S_x^2, S_y^2, S_z^2 – їх дисперсії.

При нормальному розподілі випадкова величина може набувати будь-яких значень, включаючи від'ємні. Оскільки наробіток до відмови T не може бути від'ємним числом, то розподіл T можна обмежити і назвати зрізаним.

Зрізаним нормальним розподілом випадкової величини є розподіл, отриманий з нормального при обмеженні інтервалу можливих значень цієї величини. Після проведення зрізання розподілу в точці $t = 0$ густину зрізаного розподілу можна визначити за формулою:

$$\bar{f}(t) = \frac{C}{S_t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - m_t)^2}{2S_t^2} \right], \quad (3.81)$$

де C - нормуючий множник; m_t, S_t — математичне сподівання наробітку до відмови і його середнє квадратичне відхилення; m_t і S_t є параметрами нормального розподілу, а тому він є двохпараметричним.

Риска над позначенням показників надійності для нормального розподілу означає, що він зрізаний.

Значення C обирають з умови $C \int_0^{\infty} f(t) dt = 1$ і, коли можливі значення випадкової величини T лежать в інтервалі $(0, \infty)$, обчислюють за формулою:

$$C = C_0 = \frac{1}{\int_0^{\infty} f(t) dt} = \frac{1}{1/2 + \Phi\left(\frac{m_t}{S_t}\right)}, \quad (3.82)$$

де $\Phi(x)$ – нормована функція Лапласа.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx. \quad (3.83)$$

Нормуючий множник $C=1$, якщо $m_t / S_t > 2,5$.

Криві зміни показників надійності при зрізаному нормальному розподілі наведені на рис. 3.17.

Імовірність безвідмовної роботи об'єкта визначається за формулою:

$$\bar{P}(t) = C \left[\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{t - m_t}{S_t}\right) \right] \quad (3.84)$$

Очевидно (рис. 4.5), що інтенсивність відмов круто зростає від нуля

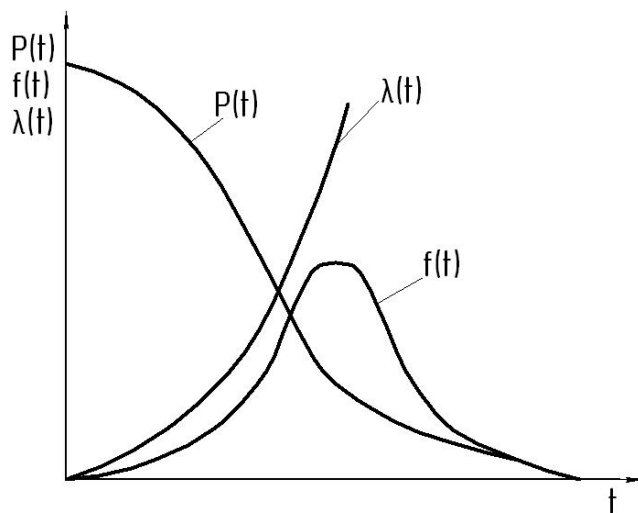


Рис. 3.17 Зміна показників надійності з часом для зрізаного нормального розподілу

до нескінченності. В області малих значень t деградація і старіння елементів об'єкта мало впливають на надійність а тому імовірність безвідмовної роботи зменшується повільно. При тривалій експлуатації об'єкта, відмови елементів якого мають нормальний розподіл, показники його надійності швидко

погіршуються, а тому імовірність безвідмовної роботи раптово падає. Такий розподіл характерний для поступових відмов електричних і механічних елементів технічних об'єктів та широко застосовується для аналізу надійності з урахуванням виходу параметрів елементів за допустимі межі.

Приклад 1. Визначити імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ підшипника ковзання тістоділильної машини, ресурс якого підкоряється нормальному розподілу з параметрами $m_t=3 \times 10^4$ год і $S_t=0,5 \times 10^4$ год для наробітку $t=2 \times 10^4$ год.

Розв'язок. Знаходимо квантиль:

$$U_p = \frac{t - m_t}{S_t} = \frac{2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 10^4} = -2,5$$

За таблицею 4.2 знаходимо, що $P(t)=0,9772$

Приклад 2. Визначити γ -відсотковий ресурс t_γ відцентрового насоса для $\gamma=80\%$, якщо ресурс роботи цього насоса підкоряється нормальному розподіленню з параметрами $m_t=0,3 \times 10^4$ год; $S=2 \times 10^3$ год

Розв'язок. Згідно з табл.4.2 при $P(t) = 0,842$

$$t_{0,8} = m_t + u_p S = 0,3 \times 10^4 - 0,842 \times 2 \times 10^3 = 1,316 \times 10^3 \text{ год}$$

3.3.2.2 Логарифмічно нормальний розподіл

Розподіл випадкової величини набуває характеру логарифмічно нормального, коли за нормальним законом змінюється логарифм цієї величини. Цим законом описується наробіток до відмови більшості деталей, особливо якщо відмови настають із-за втомлюваності і старіння (наприклад, підшипників кочення).

Густина розподілу (рис. 3.18) описується залежністю:

$$f(t) = \frac{1}{S(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2S^2}} \quad (3.85)$$

де μ і S - параметри, які оцінюють за результатами спостережень чи випробувань. Так, якщо ми випробовуємо N виробів до відмови, то

$$\mu \approx \mu^* = \frac{\sum \ln t_i}{N}; \quad S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\ln t_i - \mu^*)^2} \quad (3.86)$$

де μ^* і s – статичні оцінка параметрів μ та s .

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ визначається за табл.4.2 в залежності від значень квантилів:

$$U_p = (\ln t - \mu) / S \quad (3.87)$$

Математичне сподівання напрацювання до відмови:

$$m_t = e^{u+s^2/2} \quad (3.88)$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$S_t = \sqrt{e^{2\mu+S^2}(e^{S^2}-1)} \quad (3.89)$$

Коефіцієнт варіації:

$$V_t = S_t / m_t = \sqrt{e^{S^2}-1} \quad (3.90)$$

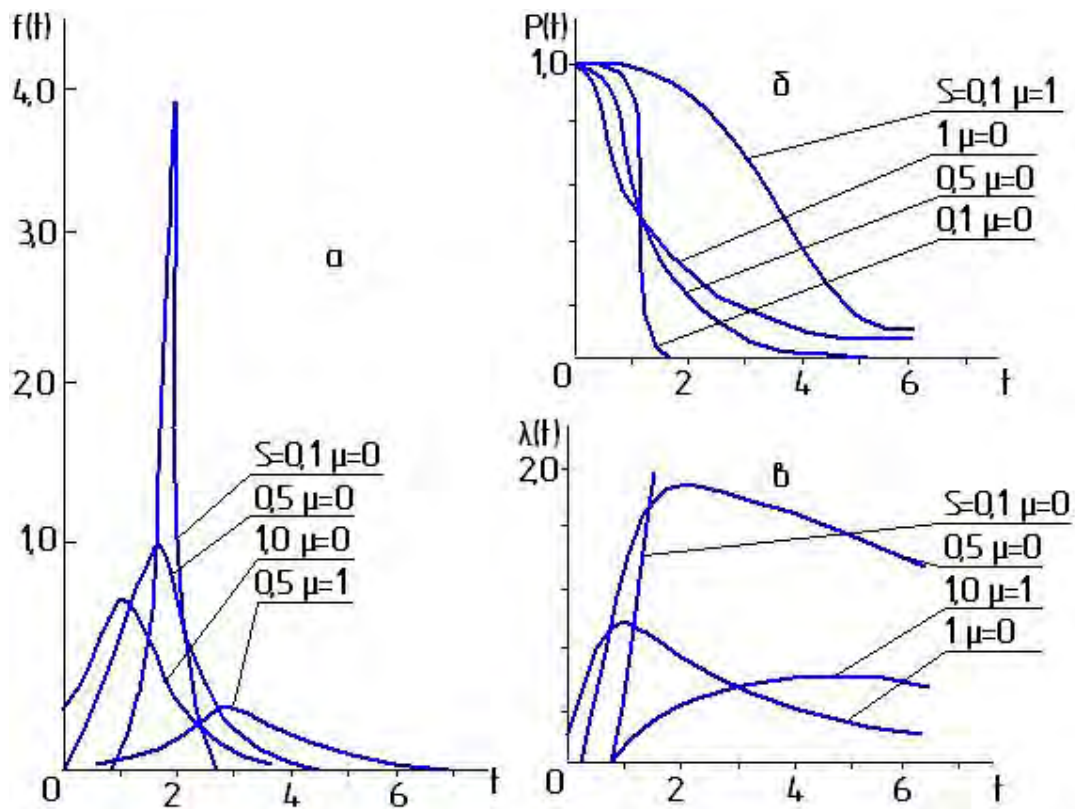


Рис.3.18 Основні характеристики логарифмічно нормального розподілу:
 а – густина імовірності $f(t)$; б – імовірність безвідмовної роботи $P(t)$; в – інтенсивність відмов $\lambda(t)$

Для $V_t \leq 0,3$ приймають $V_t \approx S$ і при цьому похибка $\leq 1\%$.

Якщо використати залежності для логарифмічно нормального розподілу в десяткових логарифмах, то одержимо:

$$f(t) = \frac{0,4343}{St\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg t - \lg t_0)^2}{2S^2}} \quad (3.91)$$

Причому, для визначення густини розподілу $f(t)$ $\lg t_0$ і S визначають за результатами спостережень чи випробувань:

$$\lg t_0 \approx \lg t_0^* = \frac{\sum \lg t_i}{N}; \quad S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\lg t_i - \lg t_0^*)^2} \quad (3.92)$$

Математичне сподівання:

$$m_t = t_0 \cdot e^{2,651S^2} \quad (3.93)$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$S_t = m_t \sqrt{\left(\frac{m_t}{t_0}\right)^2 - 1} \quad (3.94)$$

коефіцієнт варіації:

$$V_t = \sqrt{\left(\frac{m_t}{t_0}\right)^2 - 1} \quad (3.95)$$

При $V_t \leq 0,3$ $V_t = 2,3 S$

Логарифмічно нормальний розподіл для імовірності безвідмовної роботи $P(t) \leq 0,99$ і при $V_t \leq 0,3$ може замінюватись нормальним розподілом з параметрами m_t і S_t та густиною розподілу

$$f(t) = \frac{1}{S(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t - m_t)^2}{2S_t^2}} \quad (3.96)$$

Імовірність безвідмовної роботи знаходять за допомогою спеціальних таблиць для цього розподілу або таблиць для нормального розподілу (див. табл. 3.8) з урахуванням того, що квантиль розраховують за формулою:

$$U_p = (\ln t - \mu) / S \quad (3.97)$$

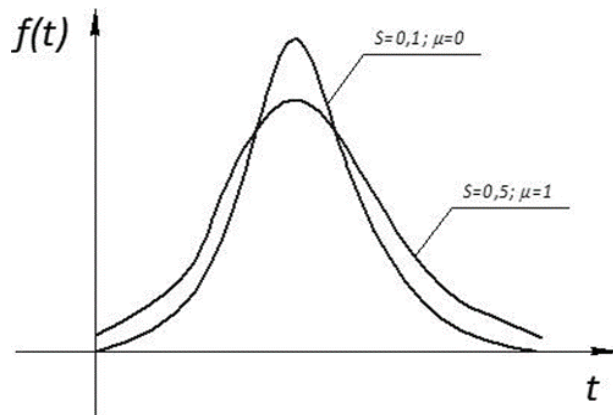


Рис. 3.19 Щільність (густина випадкової величини)

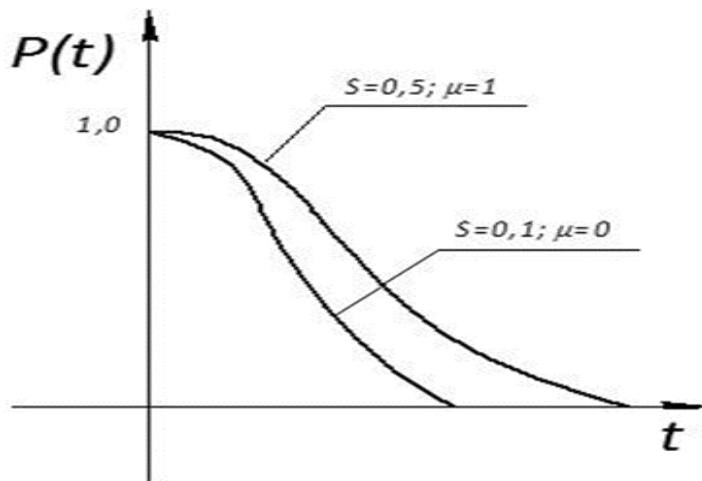


Рис. 3.20 Функція розподілу (ймовірність) випадкової величини

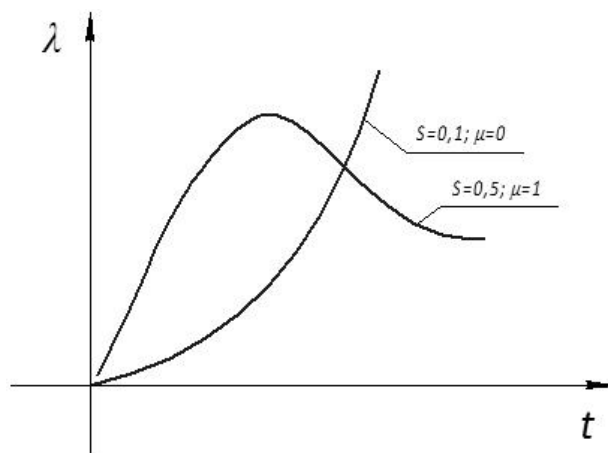


Рис. 3.21 Функція розподілу (ймовірність) випадкової величини

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - M)^2}{2S^2}}$$

Сутність: за нормальним законом змінюється логарифм випадкової величини та є одним із основних статистичних розподілів при обмеженнях випадкової величини з одного боку.

Аналогії до надійності систем: час напрацювання до відмови через втому або старіння, зокрема підшипників кочення.

3.3.2.3 Розподіл Пуассона

У дослідженнях потоків відмов технічних об'єктів деяких харчових і переробних підприємств за, наприклад, тижневі чи одноденні інтервали часу для опису їх закономірностей застосовують закон Пуассона, функція якого визначає імовірність виникнення n -ї кількості відмов ($n=0, 1, 2, \dots$):

$$P_n(t) = \left[(\omega t)^n / n! \right] \cdot e^{-\omega t} \quad (3.98)$$

де ω – параметр потоку відмов досліджуваних об'єктів.

Оскільки розглядаються одиничні інтервали часу, то $t=1$, $a=\omega$ - це не що інше як середня кількість відмов об'єктів, які виникають протягом часу t . Тобто $\omega t = a$, тоді

$$P_n = (a^n / n!) e^{-a} \quad (3.99)$$

Графічно закон Пуассона зображується ламаними кривими, оскільки випадкові величини (у даному разі це відмови об'єктів) є дискретними (рис. 3.22).

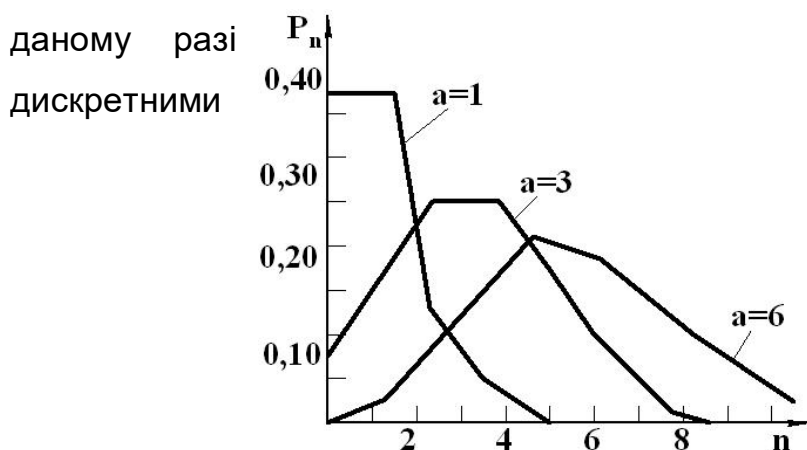


Рис. 3.22 Розподіли імовірностей виникнення відмов об'єктів з різними середніми інтенсивностями згідно із законом Пуассона

3.3.2.4 Гамма-розподіл

Густина гамма-розподілу

$$f(t) = \frac{\lambda_0^r}{\Gamma(r)} t^{r-1} \exp(-\lambda_0 t) \quad (3.100)$$

де $\Gamma(r) = \int_0^{\infty} t^{r-1} e^{-t} dt$ - гамма-функція; r - параметр форми;

λ_0 - параметр масштабу.

У теорії надійності гамма-розподіл використовується при цілому r . При $r=1$ отримуємо показниковий розподіл. У цьому випадку показниковий розподіл - це розподіл наробітку до першої відмови. При цілому $r>1$ гамма-розподіл є розподілом суми r незалежних випадкових величин, кожна з яких має показниковий розподіл з параметром $\lambda_0 = 1/m_{t_0}$. Гамма-розподіл при цілому r називають розподілом Ерланга. Для такого розподілу характерні співвідношення:

$$\Gamma(r) = (r-1)!; f(t) = \lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{r-1}}{(r-1)!} \exp(-\lambda_0 t); \quad (3.101)$$

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t) \sum_{i=1}^{r-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}; \quad (3.102)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{r-1}}{(r-1)! \sum_{i=0}^{r-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}} \quad (3.103)$$

Математичне сподівання наробітку до відмови:

$$m_t = r / \lambda_0, \quad (3.104)$$

Дисперсія:

$$D_t = S_t^2 = r / \lambda_0^2. \quad (3.105)$$

Графіки гамма-розподілу наведені на рис. 3.23. При великих r гамма-розподіл наближається до нормального розподілу з параметрами:

$$m_{t0} = r m_t; \quad S_{t0}^2 = r S_t^2.$$

Параметром розподілу є λ_0 , отже гамма-розподіл є однопараметричним. Параметр r характеризує асиметрію та ексцес гамма-розподілу. Його значення суттєво впливає (рис. 3.23) на значення основних кількісних показників надійності.

Гамма-розподіл дозволяє описати час виникнення відмов резервованих систем з увімкненням резерву способом заміщення та за умови, що потоки відмов основної та всіх резервних систем є найпростішими. У цьому випадку параметр розподілу r дорівнює кількості всіх систем (основної та резервних).

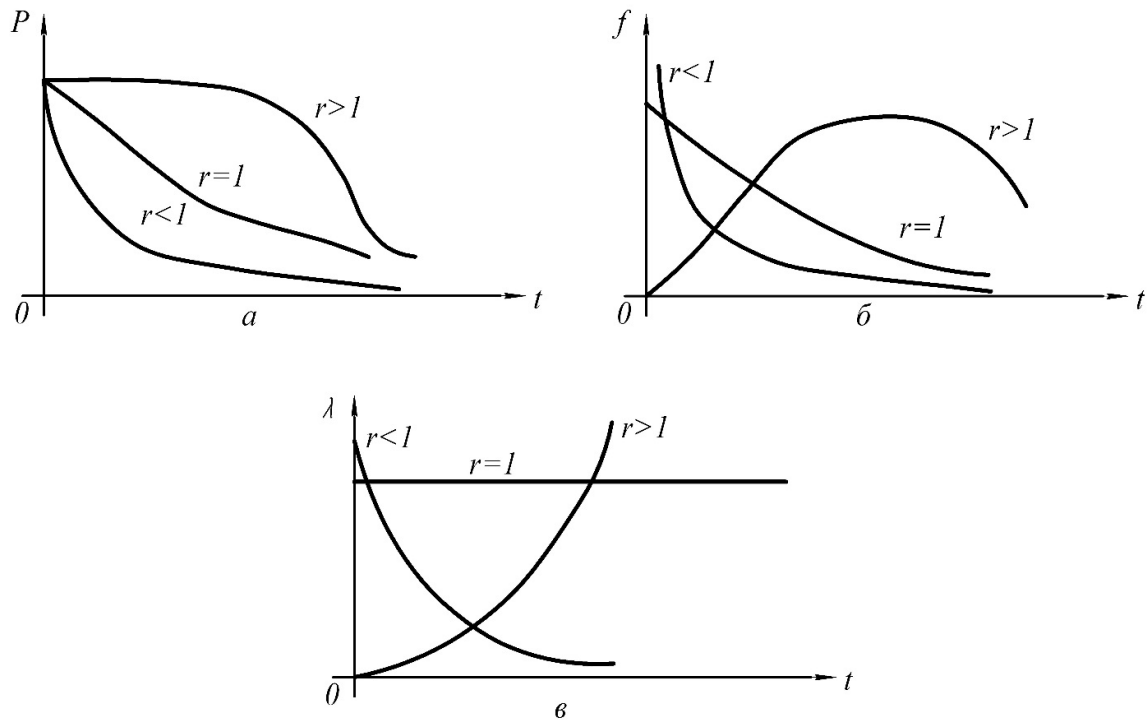


Рис. 3.23 Графіки гамма-розподілу: а - функції надійності; б - криві розподілу наробітку до появи відмов; в - інтенсивності відмов

Цей розподіл також може бути характеристикою часу виникнення відмов складних електромеханічних систем, якщо мають місце раптові відмови елементів на початковому етапі експлуатації або в процесі припрацювання приробу системи. Тобто при $r < 1$ гамма-розподіл є зручною характеристикою часу виникнення відмов об'єктів протягом їхнього приробу.

3.3.2.5 Розподіл Вейбулла

Цей розподіл характеризується такими функціями (рис. 3.24):

- імовірністю безвідмовної роботи $P(t) = e^{-t^m/t_0}$; (3.106)

- інтенсивністю відмов $\lambda(t) = (m/t_0) \cdot t^{m-1}$; (3.107)

- густиною розподілу $f(t) = \frac{m}{t_0} \cdot t^{m-1} \cdot e^{-t^m/t_0}$; (3.108)

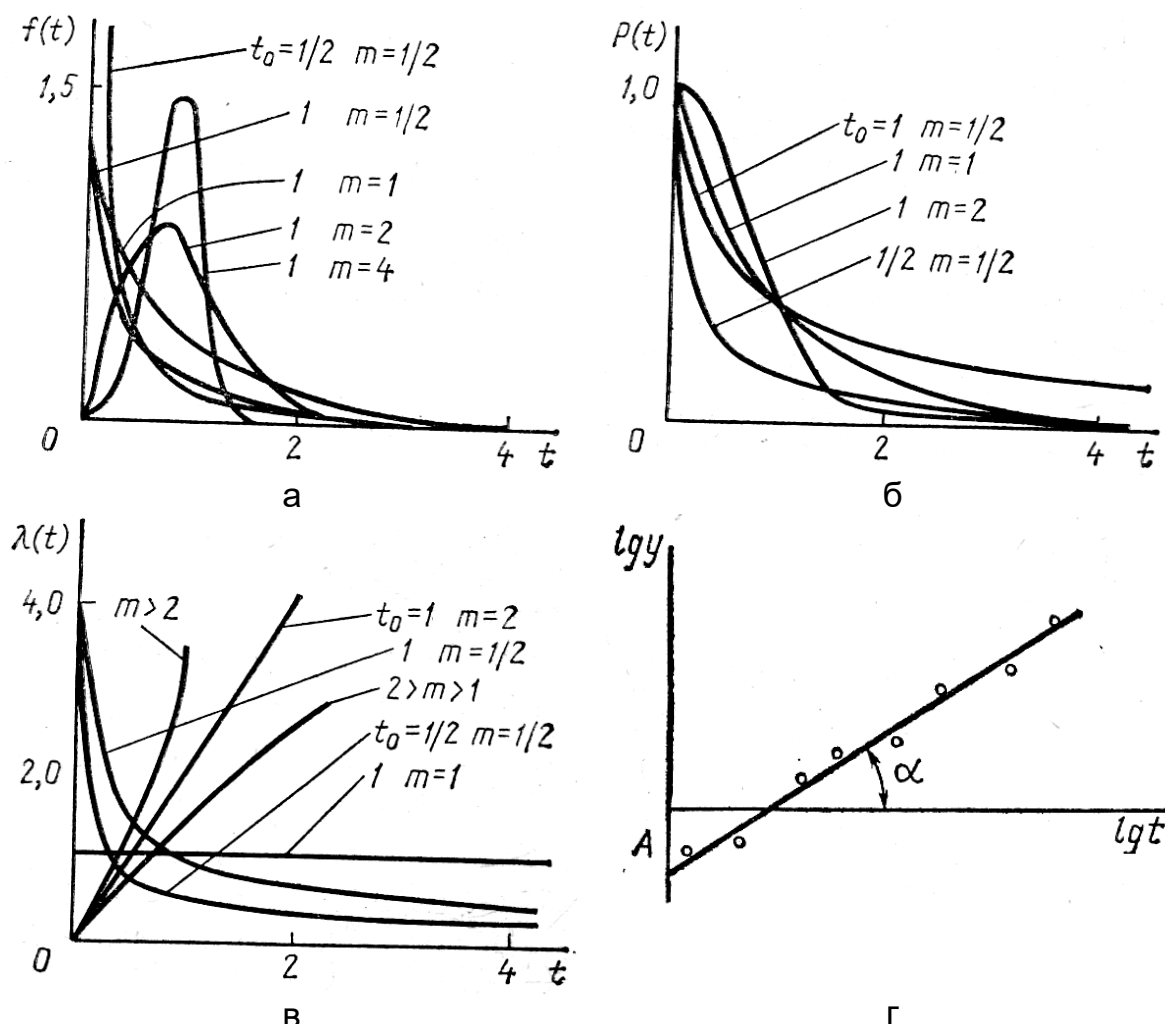


Рис. 3.24 Характеристики розподілу Вейбулла: а – густина розподілу; б – функція надійності; в – інтенсивність відмов; г – графічне визначення параметрів розподілу

Розподіл Вейбулла також має два параметри: параметр форми $m > 0$ і масштабний параметр $t_0 > 0$.

Математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення визначаються відповідно так:

$$m_t = b_m \cdot t_0^{1/m}; \quad S_t = c_m \cdot t_0^{1/m} \quad (3.109)$$

де b_m і c_m - коефіцієнти (див. табл. 3.8).

Якщо на протязі певного часу t' відмови не відбуваються, то формула для визначення імовірності безвідмовної роботи визначається за формулою:

$$P(t) = e^{-(t-t')^m/t_0} \quad (3.110)$$

Іноді характеристики розподілу Вейбулла записуються з використанням інших позначень. Наприклад, імовірність безвідмовної роботи може бути подана так:

$$P(t) = e^{-(t/a)^b} \quad (3.110)$$

де $b = m$ і $a = t_0^{1/m}$

Можливості та універсальність закону Вейбулла очевидні з рис. 4.9

При $m < 1$ функції $\lambda(t)$ і $f(t)$ спадаючі.

При $m = 1$ розподіл перетворюється в експоненційний з $\lambda(t) = const$ і $f(t)$ - спадаюча функція.

Якщо $m > 1$ функція $f(t)$ має вершину, як в логарифмічно нормальному розподілі, а функція $\lambda(t)$ є безперервно зростаючою і при $1 < m < 2$ випуклою, а при $m > 2$ – увігнутою.

За умови $m = 2$ функція $\lambda(t)$ лінійна у розподіл Вейбулла перетворюється у відомий розподіл Релея.

Якщо $m = 3,3$ розподіл Вейбула близький до нормального.

Графічна обробка результатів випробувань з використанням розподілу Вейбула проводиться у такому порядку:

- логарифмується функція надійності $\lg P(t) = -t^m/t_0 \cdot 0,4343$;
- вводиться позначення $y = -\lg P(t)$;
- логарифмується $\lg y = -m \cdot \lg t - A$,

де $A = \lg t_0 + 0,362$

Відкладавши результати випробувань на графік з координатами $\lg t - \lg y$ (див. рис.4.9) і, з'єднавши отримані точки прямою, будемо мати $m = tg\alpha$; $\lg t_0 = A - 0,362$, де α - кут нахилу прямої до вісі абсцис; A - відрізок, який відсікає пряма на вісі ординат.

Таким чином видно, що розподіл Вейбула досить універсальний. Він задовільно описує наробітки до відмови підшипників та інших деталей машин, які руйнуються від втоми. Його застосовують також для оцінки надійності вузлів підіймально-транспортних машин і механізмів.

Приклад. Оцінити імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ роликпідшипника на протязі $t=10^4$ год, якщо його ресурс описується розподілом Вейбулла з параметрами $t_0=10^7$ год, $m=1,5$.

Розв'язок. $P(t) = e^{-t^m/t_0} = e^{-10^{41,5}/10^7} = 0,905$.

3.3.2.6 Експоненційний розподіл

Для експоненційного закону (рис. 3.25) постійною величиною є інтенсивність відмов, тобто:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const} \quad (3.111)$$

$$\lambda = 1/m_t, \quad (3.112)$$

де - m_t - математичне сподівання наробітку до відмови, що визначається на підставі обробки результатів спостережень чи випробувань:

$$m_t \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i, \quad (3.113)$$

де $\bar{t}$ - середнє значення наробітку; t_i - поточне значення наробітку.

Якщо наробіток виразити в годинах, то λ виразиться кількістю відмов за годину. В цьому випадку загальний вираз для ймовірності безвідмовної роботи приймає вигляд:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t} \quad (3.114)$$

Для $\lambda t \leq 0,1$ формула імовірності безвідмовної роботи спрощується за рахунок розкладення в ряд та врахування тільки значимих його членів:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t \quad (3.115)$$

Для умов роботи виробу в різних режимах з різною інтенсивністю відмов λ_1 (за період t_1) і λ_2 (за період t_2), з урахуванням теореми множення імовірностей, отримаємо:

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} \quad (3.116)$$

Густина розподілу випадкових наробітків визначається так:

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.117)$$

Залежність імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ від $\lambda(t)t \approx t/m_t$ подано у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Залежність імовірності безвідмовної роботи від інтенсивності відмов

$\lambda(t)t$	0,1	0,01	0,001	0,0001
$P(t)$	0,9	0,99	0,999	0,9999

При $t/m_t = 1$ імовірність $P(t) \approx 0,37$, а значить 63 % відмов виникне за час $t < m_t$ і лише 37% пізніше. Із цього виходить, що для забезпечення імовірності безвідмовної роботи 0,9 чи 0,99 може бути використана лише невелика доля середнього строку служби об'єкта (відповідно 0,1 і 0,01).

Нанісши експериментальні дані в координатах t та $-\lg P(t) < 1$, можна розв'язувати задачі графічно (рис. 3.26). Логарифм від'ємний, тому що $P(t) < 1$. Логарифмуючи вираз для імовірності безвідмовної роботи $\ln P(t) = -$

$\lambda t, \lg e^{-\lambda t} = -0,4343 \cdot \lambda t$, приходимо до висновку, що тангенс кута прямої, проведеної через експериментальні точки, дорівнює $\operatorname{tg} \alpha = 0,4343 \cdot \lambda$, звідки $\lambda = 2,3 \cdot \operatorname{tg} \alpha$.

Використання цього способу позбавляє необхідності вести спостереження за експлуатацією або випробуванням до виходу з ладу всіх об'єктів.

Експоненційний розподіл характерний для раптових відмов і проявляється в період роботи виробу, коли ще не настали відмови зносові чи за рахунок старіння.

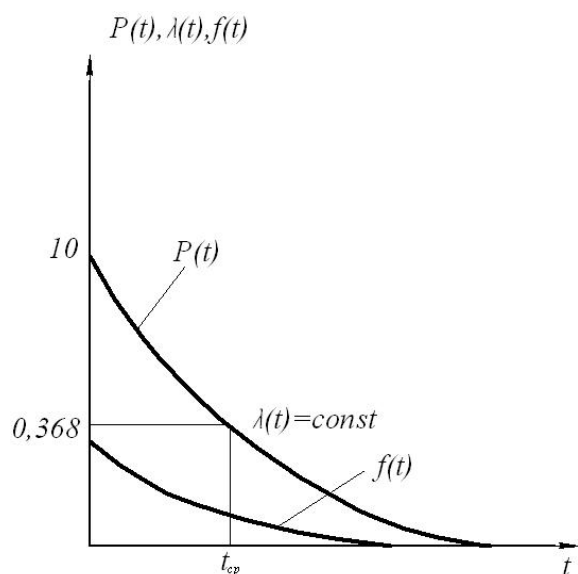


Рис. 3.25 Характеристики експоненційного розподілу

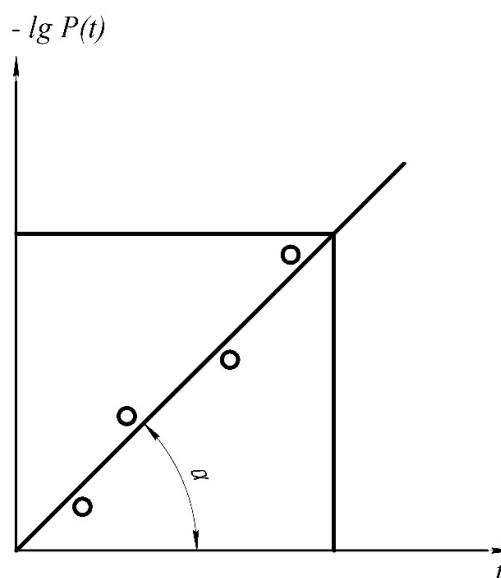


Рис.3.26 Схема графічного розв'язування задач

Приклад. Визначити імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ механізму протягом $t=10^4$ годин, якщо при експоненційному розподілі інтенсивність відмов складає:

$$\lambda = t/m_t = 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

Розв'язок:

$\lambda t = 10^{-6} \cdot 10^4 = 10^{-2}$ год. $\lambda t < 0,1$, тому використовуємо приблизну залежність:

$$P(t) = 1 - \lambda t = 1 - 10^{-2} = 0,99.$$

Експоненційний (показниковий) закон застосовується частіше від інших у дослідженнях надійності. На те існує декілька причин.

По-перше, цей закон розподілу наробітку до відмови типовий для складних об'єктів, що об'єднують багато елементів з різними моделями надійності.

По-друге, він є справедливим для ряду об'єктів, для яких можна не враховувати періоди приробу та старіння (наприклад, засоби обчислювальної техніки і керування).

По-третє, внаслідок незмінності величини λ , розрахунки показників надійності значно спрощуються.

Експоненційний закон надійності можна застосовувати для оцінки надійності об'єктів одноразового тривалого використання, які працюють в режимі заміни елементів, що відмовили.

Приклад. Нехай в експлуатації знаходиться 100 однотипних невідновлюваних технічних об'єктів, відмови яких розподілені так, як показано в табл. 3.9. Треба визначити статистичний закон надійності: $\lambda^*(t)$, $P^*(t)$ та m_t^* .

Таблиця 3.9

Вихідні дані для визначення показників надійності **

$\Delta t,$ $год$	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
n	10	9	9	8	7	5	6
$\lambda,$ $1/год$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$0,92 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$

$\Delta t,$ $год$	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120
n	4	5	3	3	3
$\lambda,$ $1/год$	$0,93 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$0,95 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$

**У таблиці Δt - інтервали часу; n — кількість відмов об'єктів на даному інтервалі часу.

Розв'язок. Визначимо інтенсивність відмов об'єктів $\lambda^*(t)$ на кожному інтервалі Δt . З урахуванням (2.26) запишемо:

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

$$\lambda^*(t) = \frac{f^*(t)}{p^*(t)} = \frac{n(t - \Delta t / 2, t + \Delta t / 2)}{N \cdot \Delta t} \frac{N}{N - n(t)} = \frac{n(t - \Delta t / 2, t + \Delta t / 2)}{\Delta t(N - n(t))} = \frac{n(t - \Delta t / 2, t + \Delta t / 2)}{\Delta t N_c},$$

де n -кількість відмов в заданому інтервалі часу; N_c -середня кількість працездатних об'єктів в інтервалі часу Δt .

Тоді отримаємо:

$$\lambda^*(5) = \frac{10}{\frac{(100+90)}{2} \cdot 10} = 1,05 \cdot 10^{-2} \quad 1/\text{год};$$

$$\lambda^*(15) = \frac{9}{\frac{(100+81)}{2} \cdot 10} = 1,05 \cdot 10^{-2} \quad 1/\text{год}$$

.....

$$\lambda^*(5) = \frac{3}{\frac{(31+28)}{2} \cdot 10} = 1,02 \cdot 10^{-2} \quad 1/\text{год}$$

Визначимо середнє значення статистичної оцінки інтенсивності відмов:

$$\lambda_c^* = \sum_{i=1}^{N_t} \lambda_i^* / N_t = 1,09 \cdot 10^{-2} \quad 1/\text{год},$$

де N_t - кількість інтервалів.

З отриманих і занесених до табл. 4.3. даних видно, що відхилення інтенсивностей відмов від їх середнього значення λ_c^* є незначними. Тому, з достатньою для практики точністю, можна вважати $\lambda = \text{const}$, що відповідає експоненційному закону розподілу. Тоді згідно з (4.43; 4.46; 4.49) матимемо такі показники надійності:

$$P(t) = e^{-1,09 \cdot 10^{-2} t}; \quad f(t) = 1,09 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,09 \cdot 10^{-2} t}; \quad m_t = \frac{1}{1,09 \cdot 10^{-2}} \approx 92.$$

3.3.2.7 Об'єднані розподіли

Моделі відмов можуть, в ряді випадків, характеризувати надійність складного об'єкта або технічної системи тільки на обмежених ділянках часу їхньої роботи. Так, наприклад, на етапі приробу час виникнення відмов може підпорядковуватися гамма-розподілу або Вейбулла, на етапі нормальної роботи - експоненційному, а на етапі старіння - нормальному. Тому, для оцінки надійності складного об'єкта на тривалій

ділянці його експлуатації, доцільно об'єднувати різні закони розподілу випадкових величин. Щоб отримати теоретичний розподіл, близький до експериментального, іноді густину розподілу наробітку до відмови подають у вигляді

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i f_i(t) \quad (3.118)$$

де $f_i(t)$ - i -й теоретичний розподіл; n - кількість розподілів у інтегрованому розподілі;

c_i - коефіцієнт ваги i -го доданка за умови, що $\sum_{i=1}^n c_i = 1$.

Розглянемо, наприклад, суперпозицію двох експоненційних розподілів. Нехай:

$$f(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (3.119)$$

де $\lambda_1 < \lambda_2$; c_1, c_2 - сталі, що визначаються з умови $c_1 + c_2 = 1$ і залежать від співвідношення λ_1 і λ_2 . Для цього випадку показники надійності матимуть вигляд:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}; \quad (3.120)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}}. \quad (3.121)$$

Оскільки $\lambda_2 > \lambda_1$, то в області великих значень t член у виразі для інтенсивності відмов, що має множник $e^{-\lambda_2 t}$, наближається до нуля швидше, ніж $e^{-\lambda_1 t}$ і тоді $\lambda(\infty) \cong \lambda_1$. При малих t $e^{-\lambda_1 t}$ і $e^{-\lambda_2 t}$ наближаються до одиниці, а значить отримаємо:

$$\lambda(t) \cong \frac{c_1 \lambda_1 \cdot 1 + c_2 \lambda_2 \cdot 1}{c_1 \cdot 1 + c_2 \cdot 1} \cong c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2, \quad c_1 + c_2 = 1. \quad (3.122)$$

Отже, інтенсивність відмов протягом деякого часу зменшується з величини $\lambda(t) = c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2$ при $t=0$ до λ_1 при $t \rightarrow \infty$. Залежність $\lambda(t)$ для суперпозиції двох експоненційних законів при $\lambda_2 > \lambda_1$ наведена на рис. 3.27. З рисунка видно, що закон розподілу, який є суперпозицією двох експоненційних законів, може характеризувати надійність складної системи з урахуванням етапу приробу. Такого ж висновку можна дійти для суперпозиції експоненційного закону з гамма-розподілом або розподілом Вейбулла при $v < 1$.

У загальному випадку для суперпозиції розподілів математичне сподівання наробітку до відмови визначиться так:

$$m_t = \sum_{i=1}^n c_i m_{ti} \quad (3.123)$$

Вплив поступових відмов, наприклад, міг би бути врахований суперпозицією експоненційного та зрізаного нормального законів розподілу. Тоді частота відмов мала б вигляд:

$$f(t) = c_1 \lambda e^{-\lambda t} + c_2 \left[-\frac{(t - m_t)^2}{2S_t^2} \right] \frac{1}{S_t \sqrt{2\pi}}, \quad (3.124)$$

де c_1, c_2 - коефіцієнти, що враховують ступінь впливу раптових та поступових відмов; інтенсивність відмов змінювалася б з часом так, як показано на рис. 3.28.

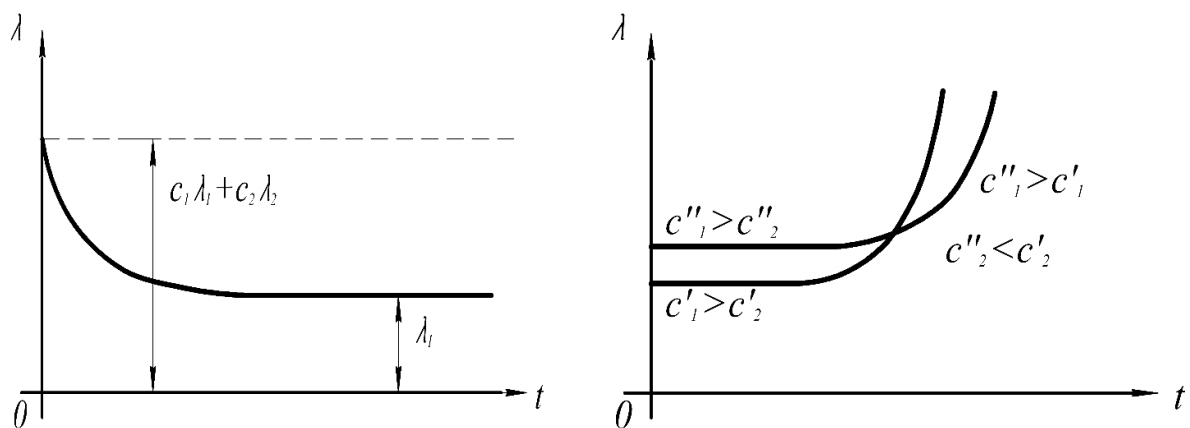


Рис. 3.27 Залежність $\lambda(t)$ для двох об'єднаних експоненційних законів

Рис. 3.28 Залежність $\lambda(t)$ для об'єднаних експоненційного та зрізаного нормального законів

З рисунка видно, що в області малих значень t інтенсивність відмов є величиною сталою, а в області великих t вона зростає, що свідчить про появу ефектів старіння об'єктів і, як наслідок, виникнення поступових відмов.

3.3.3 Ймовірнісно-фізичні моделі відмов

Крім описаних вище суто ймовірнісних моделей відмов, ДСТУ 3433-96(ГОСТ 27.05-7) передбачає застосування ймовірнісно-фізичних моделей надійності, в яких фізичні процеси деградації об'єктів апроксимуються α , DM і DN розподілами.

Ймовірнісно-фізичні моделі відмов отримують на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які відбуваються в об'єкті і спричиняють виникнення відмов. Типові (найбільш розповсюджені) моделі випадкових фізичних процесів деградації подано на рисунку 4.14, де показано реалізації визначальних параметрів (найслабкіших складових об'єкта) для сукупності однотипових об'єктів. Під об'єктом можна розуміти як елемент, так і будь-яку ненадлишкову систему, які подано єдиними реалізаціями визначальних параметрів своїх найслабкіших складових. У цьому випадку схема формалізації закону розподілу відмов елементів і систем та сама.

Наведені моделі відповідають широкому класу фізичних процесів деградації (втоми, зношування, корозії, старіння тощо). Усі зовнішні чинники, які визначають надійність та пов'язані з конструкцією, властивостями використовуваних матеріалів, технологією виготовлення, рівнем виробництва й експлуатації у кінцевому підсумку впливають на нахил (середню швидкість процесів деградації) і розсіяння реалізацій, не змінюючи схеми формалізації і типу розподілу. Тип же розподілу у схемі

формалізації, яка розглядається, визначається характером фізичного процесу деградації, зокрема, детермінованим, монотонним чи немонотонним видом його реалізацій.

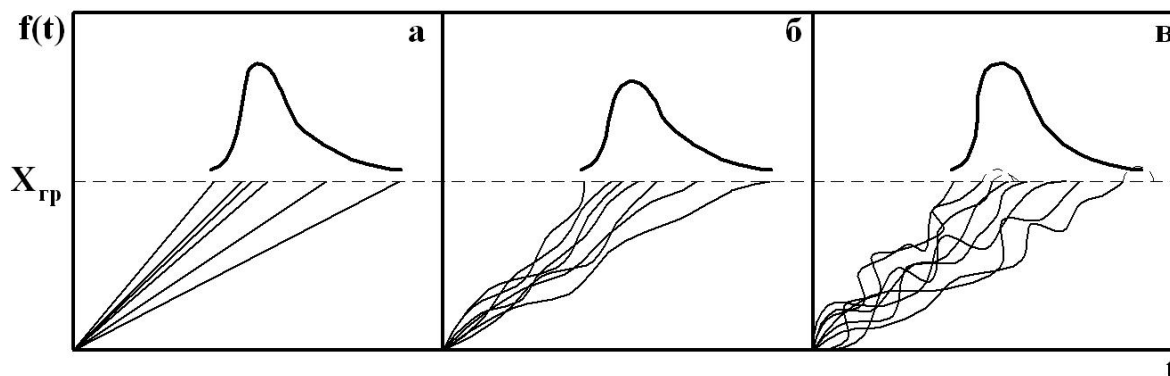


Рис. 3.29 *Моделі випадкових процесів деградації і схеми формування розподілу наробітку до відмови: а - віяловий процес (α -розподіл); б - марковський монотонний процес (DM-розподіл); в - марковський немонотонний процес (DN- розподіл)*

3.3.3.1 α -розподіл

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим віяловим процесом типу моделі а (рис. 3.29), то у такому випадку розподіл відмов буде апроксимуватися α -розподілом. Віяловий процес, який розглядається, являє собою ідеалізацію процесів б і в (рис. 3.29) у вигляді детермінованих реалізацій, що мають випадковий нахил (швидкість змінювання визначального параметра). Ця обставина засвідчує те, що характеристики процесу деградації повністю визначаються початковим станом об'єкта(якістю вироблення зразків) і не залежать від механо-фізико-хімічних процесів деградації, які відбуваються в об'єктах під впливом зовнішніх умов та часу.

Властивості α -розподілу:

- 1) α -розподіл має позитивну асиметрію, помітно збільшену у порівнянні з іншими розподілами, які розглядаються;
- 2) α -розподіл має медіану $t = \beta / \alpha$;

3) інтенсивність відмов α - розподілу має немонотонний характер, в асимптотиці ($t \rightarrow \infty$) рине до нуля;

4) параметри α -розподілу, як імовірісно-фізичної моделі, мають фізичну інтерпретацію і можуть бути оцінені як на підставі статистики відмов, так і на підставі аналізу фізичних процесів, які спричиняють відмови, а також на підставі сумісного використання статистичної інформації обох згаданих типів;

5) відсутність точних аналітичних виразів для основних характеристик розподілів (математичного сподівання, дисперсії тощо) ускладнює використання цієї моделі на практиці.

Основні характеристики α -розподілу наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Характеристики α -розподілу*

Характеристика α -розподілу	Розрахункова формула
Густина імовірності	$f(t) = \frac{\beta}{t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\alpha t - \beta)^2}{2t^2} \right]$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = \Phi \left(\frac{\alpha t - \beta}{t} \right)$
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi \left(\frac{\beta - \alpha t}{t} \right)$
Математичне сподівання	$M(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(1 + 1/\alpha^2 \right)$
Дисперсія	$D(t) = \frac{\beta^2}{\alpha^4} \left(1 + 8/\alpha^2 \right)$
Коефіцієнт варіації	$V(t) = (\alpha^2 + 8)^{1/2} \cdot (\alpha^2 + 1)^{-1}$

* У таблиці прийняті такі позначення: α -параметр форми, β -параметр масштабу, t -випадкова тривалість(наробіток до відмови., наробіток між відмовами, ресурс та ін.)

Оцінка параметрів α -розподілу проводиться за ГОСТ 3433-96.

3.3.3.2 DM-розподіл

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим процесом з монотонними (незворотними) реалізаціями (модель б, рис.

1), то розподіл відмов буде апроксимуватися дифузійним монотонним розподілом (*DM*- розподіл). Незворотний характер мають процеси руйнування у разі втоми, механічного зношування, корозії та старіння, тобто процеси, притаманні механічним об'єктам.

Основні характеристики *DM*-розподілу наведено у табл. 3.11.

Таблиця 3.11

Характеристики *DM*-розподілу*

Характеристика <i>DM</i> -розподілу	Розрахункова формула
Густина імовірності	$f(t) = \frac{(t + \mu)}{2vt\sqrt{2\pi\mu t}} \exp \left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2\mu t} \right]$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = DM(t; \mu; v) = \Phi \left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}} \right)$
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi \left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}} \right)$
Математичне сподівання	$M(t) = \mu(1 + v^2 / 2)$
Дисперсія	$D(t) = \mu^2 v^2 (1 + 5v^2 / 4)$
Коефіцієнт варіації	$V(t) = v(4 + 5v^2)^{1/2} / (2 + v^2)$
Коефіцієнт асиметрії	$A_s = 4v(6 + 11v^2) / (4 + 5v^2)^{3/2}$
Коефіцієнт ексцесу	$E_k = 6v^2(40 + 93v^2) / (4 + 5v^2)^2$

* У таблиці прийняті такі позначення: μ -параметр масштабу; v -параметр форми; t -випадкова тривалість(наробіток до відмови, наробіток між відмовами, ресурс та ін.)

Властивості *DM*-розподілу:

1) *DM*-розподіл має позитивну асиметрію. Незважаючи на помітно асиметричний вид (за значень параметра форми чи коефіцієнта варіації розподілу більших 0,3), *DM*-розподіл асимптотично(при $v^2 \rightarrow 0$) збігається до нормального розподілу. Це свідчить про універсальність цього розподілу;

2) *DM*-розподіл має медіану $t = \mu$;

3) інтенсивність відмов *DM*-розподілу має немонотонний характер, в асимптотиці ($t \rightarrow \infty$) рине до константи, яка дорівнює $(2v^2\mu)^{-1}$;

4) випадкова величина, обернена DM -розподіленій величині $(x=1/t)$, також описується DM -розподілом виду $DM(x; \frac{1}{\mu}; \nu)$;

5) параметри DM -розподілу можуть бути оцінені як на підставі статистики відмов, так і на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які спричиняють відмови, а також на підставі сумісного використання статистичної інформації обох згаданих типів;

6) параметр форми DM -розподілу практично збігається з коефіцієнтом варіації розподілу відмов.

Оцінки параметрів DM -розподілу проводяться за ДСТУ 3433-96.

3.3.3.3 DN -розподіл

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим процесом з немонотонними реалізаціями (див. модель в, рис. 4.14), чи у загальному випадку з монотонними і немонотонними реалізаціями, то розподіл відмов буде апроксимуватися дифузійним немонотонним розподілом (DN -розподілом).

Немонотонний характер зміни деяких фізичних параметрів спостерігається у виробках електронної техніки, наприклад, у випадку електроміграції у тонкоплівковій металізації, у випадку генерації та пересування зарядів на поверхні кристалу напівпровідникових структур тощо. Таким чином, процеси деградації виробів електронної техніки поряд з монотонними реалізаціями (скупчення дислокацій, пластичні деформації, втомне механічне руйнування) внаслідок електричних явищ мають і немонотонні реалізації. Тому, у загальному випадку, прийнято розглядами деградацію виробів електронної техніки як процес з немонотонними реалізаціями.

Властивості DN -розподілу:

1) DN -розподіл має позитивну асиметрію. Незважаючи на помітно асиметричний вид (за значень параметра форми чи коефіцієнта варіації

розподілу більших 0,3), DN -розподіл асимптотично (за $v^2 \rightarrow 0$) збігається до нормального розподілу. Це свідчить про універсальність цього розподілу;

2) інтенсивність відмов DN - розподілу має немонотонний характер, в асимптотиці ($t \rightarrow \infty$) рине до константи (кінцевої межі), яка дорівнює $(2v^2 \mu)^{-1}$.

Основні характеристики DN -розподілу наведено у табл. 3.12.

Таблиця 3.12

Характеристики DN -розподілу*

Характеристика DM -розподілу	Розрахункова формула
Густина імовірності	$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp \left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2 \mu t} \right]$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = DM(t; \mu; v) = \Phi \left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}} \right) + e^{2v^{-2}} \cdot \Phi \left(-\frac{t + \mu}{v\sqrt{\mu t}} \right)$
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi \left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}} \right) - e^{2v^{-2}} \cdot \Phi \left(-\frac{\mu + t}{v\sqrt{\mu t}} \right)$
Математичне сподівання	$M(t) = \mu$
Дисперсія	$D(t) = \mu^2 v^2$
Коефіцієнт варіації	$V(t) = v$
Коефіцієнт асиметрії	$A_s = 3v$
Коефіцієнт ексцесу	$E_k = 15v^2$

* У таблиці прийняті такі позначення: μ -параметр масштабу; v -параметр форми; t -випадкова тривалість(наробіток до відмови, наробіток між відмовами, ресурс та ін.)

3) параметри DN - розподілу можуть бути оцінені як на підставі статистики відмов, так і на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які спричиняють відмови, а також на підставі сумісного використання статистичної інформації обох згаданих типів;

4) сума n випадкових величин, які підпорядковуються DN -

розподілу виду $DN(t; \mu; \nu)$, описується також DN - розподілом виду $DN(t; n\mu, \nu / \sqrt{n})$;

5) вибіркове середнє $S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ випадкової величини t з DN - розподілом виду $(t; \mu; \nu)$ також описується DN - розподілом виду $DN(t; n\mu, \nu / \sqrt{n})$;

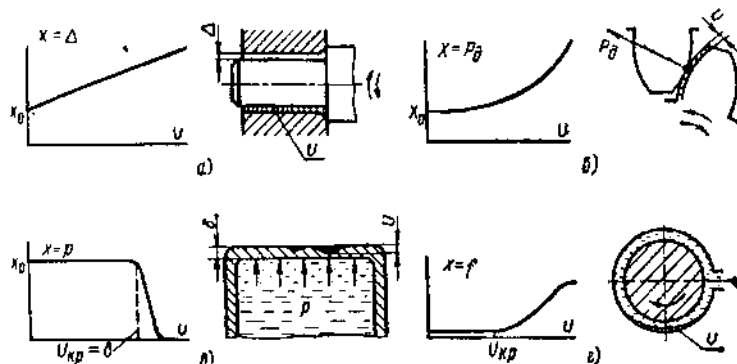
6) DN - розподіл володіє властивістю операції згортання розподілів. Оцінки параметрів DN - розподілу проводять за ДСТУ 3433-96.

3.3.4 Моделі формування відмови елементів системи

3.3.4.1 Зв'язок між ступенем пошкодження і вихідними параметрами виробу

Різні види і ступінь пошкодження матеріалу впливають на вихідні параметри виробу і, відповідно, визначають його надійність. Наведемо приклади функціонування зв'язків між ступенем пошкодження U і вихідним параметром X . Необхідно мати на увазі, що ця залежність, як правило, є не випадковою або її стохастична природа проявляється дуже слабо.

Найтиповіша лінійна залежність (рис. 3.30, а), коли U та X пов'язані передавальним U коефіцієнтом. Наприклад, при зношуванні спряжень проміжок Δ , як правило, збільшується, тобто $\Delta = \Delta_0 + U$, де $X_0 = \Delta_0$ -



початковий проміжок.

Рис. 3.30 Приклади функціональних залежностей між ступенем пошкодження виробу U і вихідним параметром X :

а – зношення – збільшення проміжку;

б – зношення – динамічні навантаження;

в – корозія – тиск;

г – зношення – коефіцієнт тертя

Прикладом нелінійної залежності між X та U є виникнення динамічних навантажень P_d , якщо виникли проміжки у спряженні внаслідок його зношення (рис. 3.30, б). Сила співударянь двох пружних тіл нелінійно залежить від розмірів проміжку і може бути отримана із розв'язку відповідних диференціальних рівнянь динаміки.

У багатьох випадках залежність вихідного параметра від ступеня пошкодження може мати зону нечуттєвості із наступною різкою зміною значення X (рис. 3.30, в). Прикладом може бути вплив ступеня корозії резервуара на його здатність витримувати необхідний тиск вміщеної в ньому рідини. Спочатку корозія не впливає на вихідний параметр - тиск в резервуарі, але після будь-якого локального пошкодження стінки на глибину $U=\delta$ резервуар втрачає здатність навіть витримувати рідину. Аналогічні залежності між X та U при зміні умов роботи виробу після досягнення певного (критичного) ступеня пошкодження $U_{кр}$.

Наприклад, підшипник ковзання, що працює із змащенням (рис. 3.30, г), за певних розмірів діаметрального проміжку забезпечує рідинне тертя, і, якщо вихідним параметром є коефіцієнт тертя, то його значення є мінімальним. В міру зношення підшипника (у момент пуску або реверсу, коли порушується рідинне тертя) діаметральний проміжок збільшується і досягає критичного значення, тому умови гідродинамічного змащення порушуються, характер тертя змінюється, внаслідок чого коефіцієнт тертя зростає.

Отже, в загальному випадку тимчасову залежність для вихідного

параметра визначають як

$$X = f(u) = f[U(t)] \quad (3.125)$$

де, зазвичай, функція $U(t)$ є випадковою, а функція f описує детерміновану залежність.

У загальному випадку залежності для вихідних параметрів можуть бути записані системою рівнянь:

$$\begin{aligned} X_1 &= f_1[U_{11}(t) \dots U_{k1}(t)] \\ &\dots\dots\dots \\ X_n &= f_n[U_{1n}(t) \dots U_{kn}(t)] \end{aligned} \quad (3.126)$$

3.3.4.2 Модель формування відмов харчового обладнання

Закономірності старіння, які оцінюють ступінь пошкодження деталей машин і обладнання в функції часу, є основою для рішення задач надійності. Вони дозволяють прогнозувати хід процесу старіння, оцінювати можливі шляхи його реалізації і виявити найбільш суттєві фактори, які впливають на інтенсивність процесу. Типовим прикладом таких залежностей є закони зношування і корозії матеріалів, які, на основі розкриття фізичної картини взаємодії поверхонь, дають методи для розрахунку інтенсивності цих процесів в часі і оцінюють параметри, впливаючі на хід процесу.

На вихідні параметри машин чи апаратів впливають всі діючі процеси старіння, які характеризуються наступними видами їх взаємодії:

1. Одночасно протікаючі процеси взаємно не впливають і визначають зміну вихідних параметрів незалежно один від одного. Наприклад, завдяки пошкодженню поверхні тертя завдяки попаданню абразиву і через дефект литва.

2. Одночасно протікаючі процеси взаємно не впливають, але їх дія на вихідний параметр сумується. Наприклад, температурна і силова

деформація складуються, якщо процеси не супроводжуються незворотними явищами (наприклад, пластичною деформацією).

3. Одночасно протікаючі процеси взаємодіють і утворюють більш складний процес (найбільш характерний випадок). Типовим прикладом можуть служити процеси корозійно-механічного зношування металів і сплавів, коли результат не є простою сумою корозії і механічного зносу, а є більш складним фізико-хімічним процесом, інтенсивність якого вища за суму інтенсивностей кожного з чинників. При деяких взаємодіях реалізується ведучий вид процесу, коли його особливості найбільше впливають на вихідні параметри технічного об'єкта. В цьому випадку пошук закономірностей, які описують дане явище, дещо полегшується.

Для більшості процесів деградації технічних об'єкта та їх старіння характерна якраз одночасна дія деформаційних, теплових, хімічних та інших процесів, які приводять до виникнення складної фізико-хімічної картини зміни початкових властивостей і стану виробів.

Вихідні параметри любого виробу є його основними характеристиками, а їх зміна при експлуатації повинна бути зв'язана з ступенем пошкодження окремих елементів і пояснена типовими процесами старіння.

Для виробів, працюючих в контакті з корозійно-активними харчовими середовищами, основними процесами старіння є корозія і зношування. Вони і визначають (найчастіше) момент втрати виробом працездатності.

Таким чином, знання часових залежностей, описуючих процес пошкодження і використання показників, оцінюючих ступінь пошкодження, матеріалу виробу, є необхідною умовою для забезпечення розв'язку задач надійності. Найбільш перспективними є аналітичні залежності, які базуються на проникненні у фізику явищ і оцінюють вплив основних чинників на швидкість процесу.

Всі види відмов машин і апаратів харчових виробництв можна поділити на дві групи: відмови через руйнування елементів та відмови внаслідок порушення якостей функціонування.

До першої групи відносяться поломки, недопустимі деформації, знос і корозія елементів системи тощо. До другої — порушення регулювання, залипання і забивання робочих органів оброблюваним середовищем, послабленням кріплень під дією вібрації та ін.

При розробленні моделі відмов машини звичайно задаються часом безперервної роботи T_0 , протягом якого не проводиться технічне обслуговування (рис. 3.31).

Нехай X — один із параметрів, які характеризують працездатність машини, або апарата, а δ — та його частина, на яку параметр може бути змінений без виходу його за допустимі межі. Значення δ враховує запас на спрацювання і визначає ті допустимі похибки в роботі машини, чи апарата, які не приводять до порушення її працездатності. Процес зміни параметру X з плином часу t (зміна стану об'єкта) є моделлю поступової втрати машиною працездатності, яка проходить при її експлуатації.

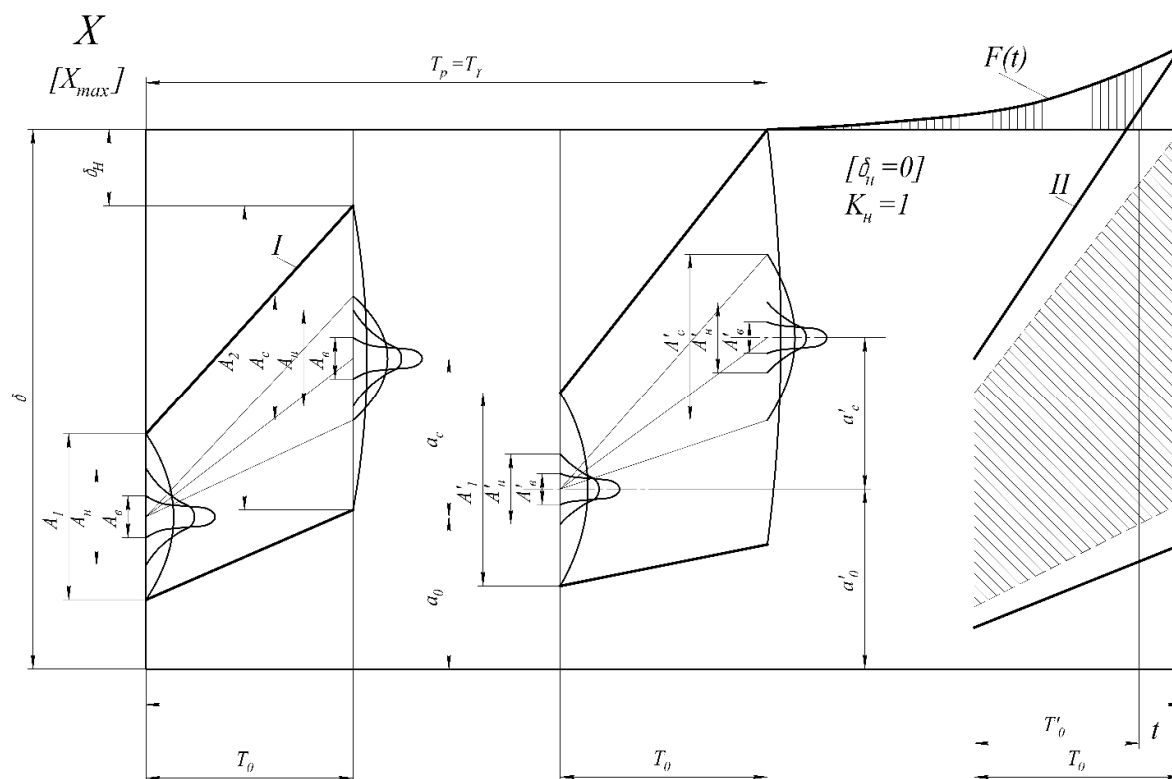


Рис.3.31 Схема втрати машиною (апаратом) працездатності

Кожний вид харчового обладнання або машин має початкові похибки, які залежать від його конструкції, якості виготовлення і визначають початкову неточність функціонування a_0 . З початком роботи машини або апарата різні процеси приводять до збільшення похибок функціонування. Так, в результаті вібрації обладнання, корозії, зношування і деформації його елементів параметр X розсіюється в межах поля A_v , а за рахунок похибок виготовлення і налагодження виробів — в межах поля A_n . Загальне поле розсіювання може бути оцінене імовірнісним методом складання дисперсій:

$$A_1 = \sqrt{A_H^2 + A_B^2} \quad (3.127)$$

Причому, розсіювання проходить відносно центру групування, який визначається координатою a_0 .

При подальшій роботі машини центр групування зміщується за період T_0 на величину a_c . Зона розсіювання A_2 відносно зміщеного центру групування складається з A_I і A_c :

$$A_2 = \sqrt{A_H^2 + A_B^2 + A_C^2} \quad (3.128)$$

Таким чином, до кінця періоду T_0 залишається невичерпаним резерв δ_n по параметру X :

$$\delta_n = \delta - \left[a_0 + a_c + 0,5\sqrt{A_H^2 + A_B^2 + A_C^2} \right] \quad (3.129)$$

Поле розсіювання параметру X за цей період визначається областю станів I.

Запас надійності K_n визначається, як відношення максимально допустимого значення параметру $X = X_{max} = \delta$ до експериментального його значення для даних умов

$$X_{ек} = \delta - \delta_n \quad (3.130)$$

$$K_n = \frac{\delta}{\delta - \delta_n} = \frac{X_{max}}{X_{ек}} \quad (3.131)$$

За наявності резерву δ_n надійність машини досить висока, тому що імовірність виходу параметру X за межі δ мала. Небезпечними є лише раптові відмови від зовнішніх дій, які не зв'язані з станом самої машини (наприклад, попадання каменя в бурякорізку).

При експлуатації машини чи апарату починають проявлятися повільно протікаючі процеси — знос, корозія, втома, руйнування та ін., які приводять до зменшення запасу надійності. При подальшій експлуатації виробу відбувається збільшення зони розсіювання його параметрів (область II), що приводить до зменшення ймовірності безвідмовної роботи. Граничний стан для технічного об'єкта наступить в момент часу, при якому запас надійності буде вичерпаний ($K_n = 1$, або $\delta_n = 0$).

Час роботи $T_p = T_\gamma$ до втрати виробом працездатності і буде ресурсом за даним параметром. Починаючи з $T_p = T_\gamma$ технічний об'єкт потребує ремонту для повного або часткового відновлення втраченої працездатності. Якщо ж, за деяких причин, експлуатація об'єкта продовжується, а імовірність відмови $F(t)$ перевищує допустиме значення, то можна прийняти одне з наступних рішень:

- зменшити допустимий час безперервної роботи до значень, при яких $\delta_n = 0$;
- зменшити навантаження машини чи апарата для забезпечення $\delta_n = 0$ (заштрихована зона);
- допустити збільшення можливості відмови технічного об'єкта, збільшивши контроль за його експлуатацією.

Звичайно, всі ці заходи є тимчасовими, оскільки приводять до зниження ефективності роботи машини і до збільшення витрат на обслуговування.

Тому ресурс об'єкта $T_p = T_\gamma$ визначається напрацюванням до $K_n=1$, при якому його подальша експлуатація не забезпечує регламентованого значення імовірності безвідмовної роботи за період безперервного функціонування протягом заданого часу.

В машинах, працюючих в харчовій і переробних галузях АПК в контакт з корозійно-активними середовищами, процес зміни початкових параметрів характеризується великою кількістю взаємозв'язків і виникненням неоднакових за природою процесів старіння, що, в першу чергу, впливає на показники надійності і ступінь віддаленості технічного об'єкта від граничного стану (рис. 3.32). Проявляючись у вигляді механічної, теплової, хімічної енергії визначає умови роботи об'єкта і його елементів: навантаження, напруження, температуру, швидкості і прискорення, хімічні дії та ін., які сприяють виникненню процесів зносу,

корозії, деформації і таке інше. Пошкодження окремих деталей (згідно відповідних моделей відмов) формують показники надійності всієї машини. Їх фізична інтерпретація є складним процесом, тому багато дослідників спираються на стохастичні залежності і вивчають поведінку складної системи лише методами теорії імовірностей і математичної статистики. Але такий підхід є одностороннім. Тільки спираючись на функціональні зв'язки з врахуванням стохастичної природи процесів і явищ, можна оцінювати плин змін в технічній системі, прогнозувати її надійність, моделювати ці зміни за різних умов експлуатації.

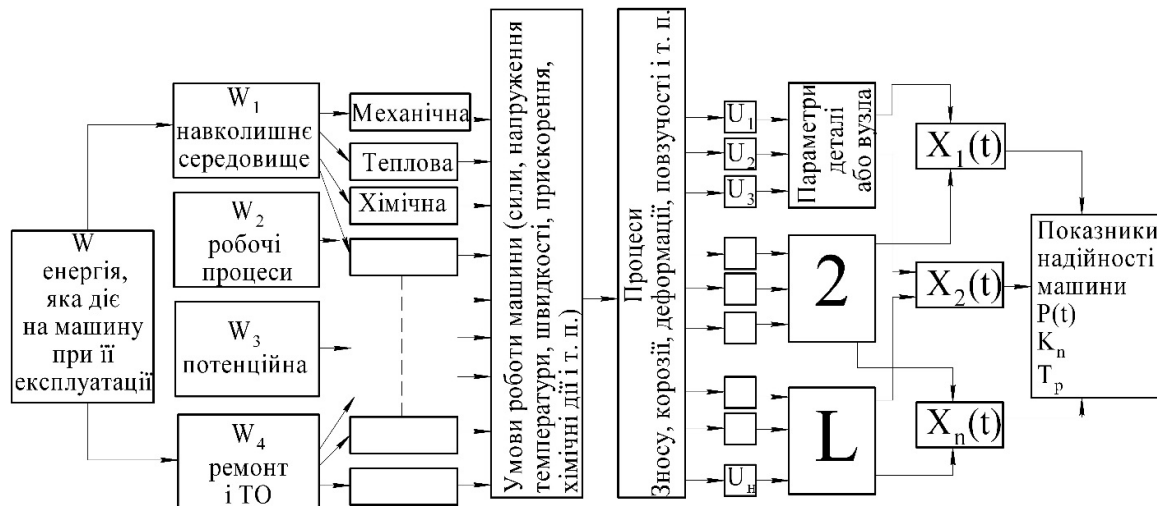


Рис. 3.32 *Схема формування показників надійності машини (апарата)*

Машина чи апарат в харчових виробництвах не може працювати і змінювати свій стан по строго детермінованих законах, тому що швидкість процесів старіння є випадковою величиною. Не можна поставити задачу про розкриття всіх зв'язків технічних систем, тому що на практиці це навіть теоретично неможливо. Необхідно виявити ті основні зв'язки і залежності, які з достатньою достовірністю описують процеси деградації об'єкта, його коронування, зношування і старіння.

Розкриття складних взаємозв'язків, показаних на рис. 3.32 спрощується завдяки використанню наступних обставин: при аналізі

вибираються лише ті зв'язки, які відіграють основну роль у формуванні показників надійності; вихідні параметри є часто незалежними; не всі процеси проявляються одночасно; наслідки відмови виробу з різних причин нерівнозначні; присутні обмежуючі параметри, які є предметом інженерного аналізу при розрахунках параметричної надійності виробу.

При прогнозуванні надійності машин або апаратів, працюючих в агресивних харчових середовищах можна виділити три області (рис. 3.33):

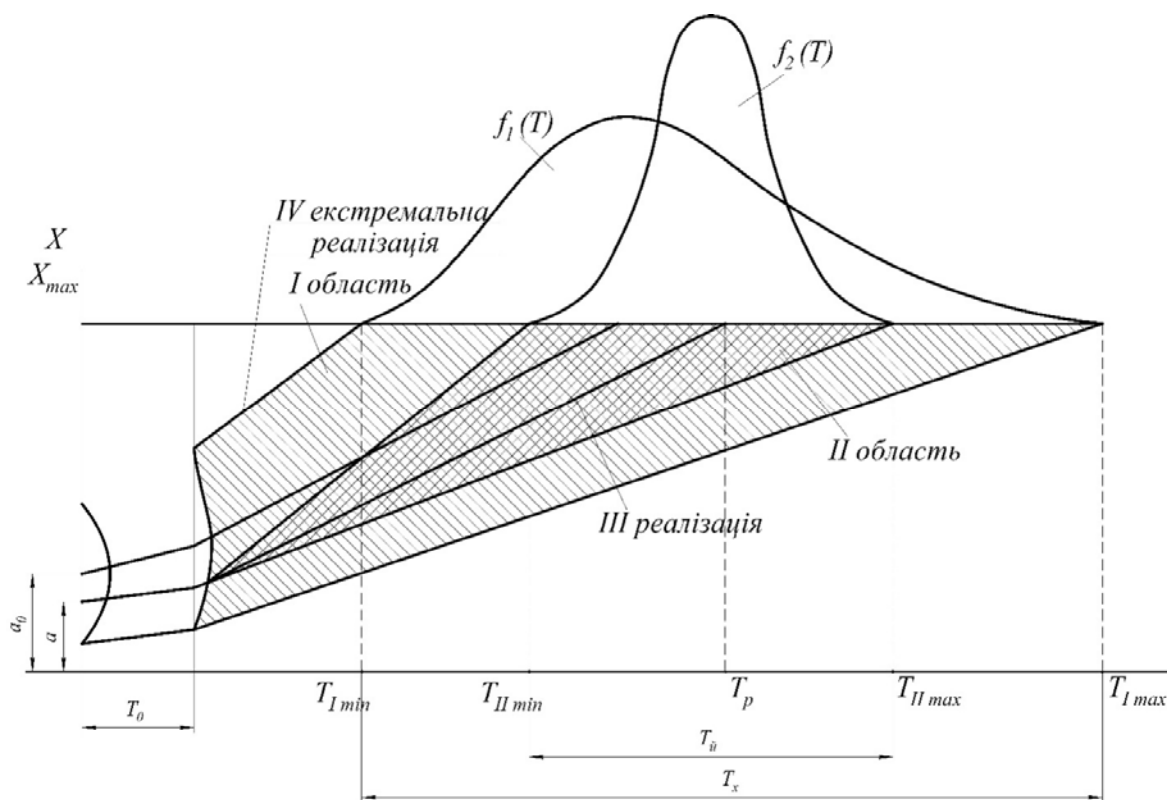


Рис. 3.33 Области прогнозування надійності машин і апаратів харчових і переробних виробництв

1. Прогнозується поведінка всієї генеральної сукупності конкретних об'єктів і, таким чином, враховується і варіація їх вихідних характеристик і можливих умов експлуатації (область I).
2. Прогнозується поведінка конкретного зразка технічного об'єкта і, таким чином, початкові параметри стають не випадковими величинами, а

режим експлуатації може змінюватися у відповідному діапазоні. У цьому випадку область станів звужується (область II).

3. Прогнозується поведінка заданого об'єкта у визначених умовах експлуатації при постійних режимах роботи. В цьому випадку реалізується випадковий процес III, який відповідає заданим умовам роботи виробу.

У третьому випадку відсутня невизначеність в умовах роботи машини чи апарата, а прогноз пов'язаний лише з виявленням тих закономірностей, які описують процес зміни вихідного параметру у часі.

На підґрунті приведених викладок, можлива розробка методики визначення терміну служби та імовірності безвідмовної роботи машин і апаратів харчових виробництв за критеріями корозії і зношування, які є визначальними для обладнання галузі.

3.4 Методики оцінки параметрів надійності

3.4.1 Вимірювання параметрів зношування

3.4.1.1 Класифікація методів вимірювання зношування

Існують різноманітні методи вимірювання зношування - від найпростіших, коли звичайними засобами вимірюють розміри деталей, що зношуються, до таких, які використовують ядерно-фізичні процеси. Класифікація методів вимірювання зношування поверхонь тертя наведена у табл. 3.13.

Розглянемо деякі методи вимірювання зношування.

Метод визначення зношування за вмістом продуктів зношування в мастил часто називають "методом визначення вмісту заліза в мастилі", що полягає у відбиранні проб відпрацьованого мастила, в якому нагромадилися продукти зношування: металеві частинки, окисли металів і продукти хімічної взаємодії металів із активними компонентами

змащування,

Метод мікрометричних вимірювань базується на вимірюванні деталі до і після зношування за допомогою мікрометра, індикатора або інших приладів, точність яких зазвичай знаходиться в межах 1-10 мкм. На точність вимірювання впливає контакт досліджуваної поверхні із вимірювальним наконечником приладу, а також якість очищення деталі від мастила і забруднень.

Таблиця 3.13

**Класифікація методів вимірювання зношування поверхонь
тертя**

Метод вимірювання		Різновиди методу
Інтегральний	Оцінка сумарного зношування	За зміною маси зразка За зміною об'єму зразка Зміна зазору спряження
	Вміст продуктів зношування в мастилі	Хімічний аналіз Спектральний аналіз За допомогою радіоактивних ізотопів
Диференційний	Мікрометрування	Вимірювання розмірів Профілографування
	Метод штучних баз	Метод відбитка Метод лунок Метод зліпків
	Метод поверхневої активації	Активація дільниці Застосування вставок
Зміна вихідних параметрів спряження		Вимірювання: коефіцієнта тертя, протікання або витрати мастила; температури

Метод штучних баз полягає в тому, що на поверхні, яка

зношується, роблять заглиблення точно визначеної форми у вигляді конуса, піраміди тощо і за зменшенням розмірів заглиблення (відбитка) оцінюють зношування. Він використовується для визначення місцевого лінійного зношування поверхні в тих місцях, де нанесені бази, тому ним можливо оцінити форму зношеної поверхні. Застосовуються різні варіанти цього методу (рис. 3.34).

Метод поверхневої активації полягає у вимірюванні зниження радіоактивності при зношуванні досліджуваної деталі, в якій на заданій ділянці утворено радіоактивний шар глибиною 0,05-0,4 мм шляхом опромінення ділянки зарядженими частинками (дейтронами, протонами, альфа-частинками).

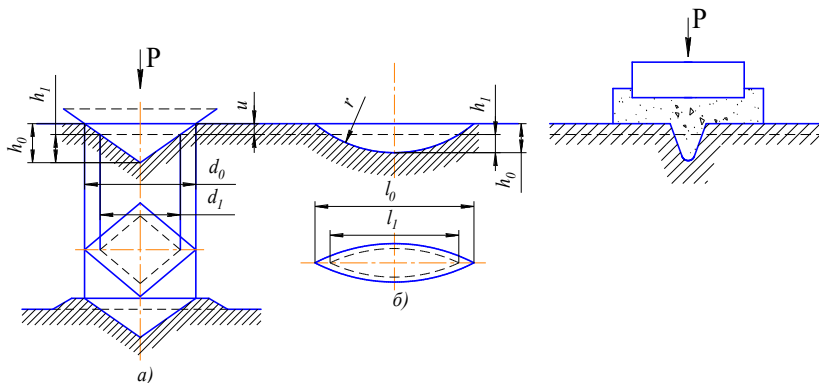


Рис. 3.34 Вимірювання зношування методом штучних баз:
а - метод відбитка, б - метод лунок; в - метод зліпка

Величина зношування деталі визначається згідно з тарувальним графіком порівнянням зниження радіоактивності деталі зі зниженням радіоактивності зразків, активізованих в однакових умовах із деталлю. Схема вимірювання зношування методом поверхневої активації приведена на рис. 3.35.

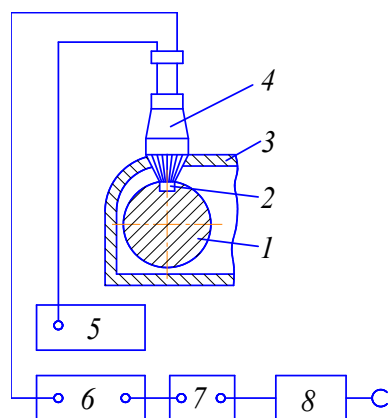


Рис. 3.35 *Схема вимірювання зношування методом поверхневої активації: 1 - деталь, 2 - вставка, 3 - захисний корпус, 4 – лічильник, 5 – випрямляч, 6 - інтегральний або амплітудний дискримінатор, 7 - пристрій обліку, 8 - реєструючий пристрій*

3.4.1.2 Принципи вибору зносостійких матеріалів

При виборі матеріалів для пар тертя, окрім їх високої зносостійкості, до них ставиться і ряд вимог, які входять у поняті антифрикційності матеріалу.

До цих вимог, в першу чергу, належать: легка припрацьовуваність, висока зносостійкість при нормальних умовах роботи, низький коефіцієнт тертя при нормальних умовах роботи, який мало змінюється залежно від швидкості ковзання та часу нерухомого контакту, плавність повільних переміщень, низький коефіцієнт тертя і відсутність молекулярного схоплювання в умовах недосконалого змащування і при перервах в змащенні, достатня жорсткість стику.

В багатьох випадках від матеріалів вимагається також висока теплопровідність, низький коефіцієнт теплового розширення, хороша змочуваність мастилом.

Коли відомі закони зношування, то вибір матеріалів полягає в аналізі впливу різних факторів на швидкість зношування і регламентації фізичних параметрів для одержання необхідної зносостійкості.

Так, при терті однорідних матеріалів в умовах недосконалого змащування для запобігання молекулярного схоплювання необхідно,

щоб їх твердість відрізнялася не менше ніж на 10 одиниць за Брінелем.

Для антифрикційних підшипникових сплавів широко відоме правило Шарлі, яке полягає в тому, що сплави повинні мати структуру, що складається із твердих включень в пластичній масі (типовим представником таких сплавів є баббіт). За певних умов це гарантує хорошу припрацьовуваність матеріалу до форми спряженого вала і високу несучу здатність.

Велике значення для одержання зносостійкості має утворення на поверхні захисних окисних плівок, плівок перенесеного м'якого металу із структурних складових, а також нанесення на поверхню твердого матеріалу спеціальних легкоплавких покриттів, менш міцних, ніж основний матеріал.

Однак досвід експлуатування різних машин дає можливість виділити групи типових поєднань матеріалів для різних пар тертя. Нижче коротко перераховані основні із них.

1. Сталь - антифрикційний кольоровий сплав. Поєднання термообробленої, наприклад, цементованої та загартованої сталі у парі із бронзами на основі олова, цинку, алюмінію, свинцю, а також із баббітами широко застосовується для підшипників ковзання різних типів, черв'ячних пар, спряжень ходовий гвинт-гайка та інших відповідальних спряжень.

2. Сталь - антифрикційний чавун - загартована сталь - антифрикційний чавун, сталь по сталі, чавун по чавуну. Часто застосовується при порівняно невисоких швидкостях ковзання для таких пар тертя, як напрямні ковзання верстатів, пари тертя гідросистем, гільзи циліндра, поршневі кільця двигунів, зубчасті та ланцюгові передачі, диски фрикційних муфт і гальмів, підшипники і напрямні кочення.

3. Метал-полімерний матеріал. Таке поєднання (зазвичай в парі із сталлю або чавуном) застосовується для зубчастих і черв'ячних передач, підшипників і напрямних ковзання, гвинтових передач.

4. Спеціальна сталь-абразивне середовище. Спеціальні хромисті, марганцеві та інші високоміцні сталі застосовуються для деталей, що працюють в контакті із ґрунтом, породою, потоком газу або рідини, таких, як леміші плугів, ланки гусениць тракторів, зуби ковшів екскаваторів, лопатки турбін.

5. Сталь або чавун-фрикційний сплав. Для гальмівних та інших пристроїв, де є необхідним забезпечення значного тертя на спряжених поверхнях, застосовують поєднання спеціальних чавунів або сталей із металевими, азбокаучуковими, азбосмоляними і металокерамічними фрикційними матеріалами. Застосовують також поєднання сталь-сірий чавун, наприклад, при роботі залізничних гальмівних колодок. Від цих матеріалів вимагається, в першу чергу, висока теплостійкість, оскільки під час гальмування температури можуть досягати 1000°C і вище.

6. Сталь-самозмащувальний матеріал. Це поєднання застосовують для спряжень типу підшипників ковзання, шарнірів та ін. із обмеженим зовнішнім змащуванням і при відносно невеликих швидкостях ковзання, коли матеріал повинен забезпечувати подавання змащення (рідкого або твердого) за рахунок своєї структури. Такими матеріалами можуть бути пористі спечені псевдосплави, що містять мідь, свинець, графіт, а також різні типи пластмас і металопластмас, Застосовують також різного роду покриття (в тому числі біметалеві та полімерні) в поєднанні із спеціальним рельєфом поверхні.

3.4.2 Оцінка корозійності стійкості матеріалу

Відомі методи визначення і оцінки корозійної стійкості металів та сплавів розділяються на якісні і кількісні.

Якісні методи не дають повної характеристики стійкості металів і є допоміжними, але важливими, тому що у багатьох випадках заздалегідь неможливо установити характер та інтенсивність корозійного процесу. Використовують такі якісні методи визначення корозії:

- зовнішній огляд зразків після впливу агресивного середовища, що дає можливість визначити характер і вид корозії, глибину ушкоджених ділянок, форму і місце їх розташування;

- спостереження за змінами, що відбуваються в розчині (зафарбування, скаламучування, поява продуктів корозії у вигляді осаду тощо);

- мікроскопічне дослідження зразків після корозії. Застосовується цей метод якщо передбачається міжкристалітна корозія або руйнування від спільної дії середовища та механічних напружень.

До числа найбільш поширених кількісних методів відносяться:

- визначення швидкості корозії ваговим способом;
- визначення швидкості корозії об'ємним способом;
- визначення зміни механічних показників після дії середовища;
- електрохімічні вимірювання.

Ваговим способом визначають різницю маси зразка до і після випробувань. Залежно від виду продуктів корозії, що утворюються, маса дослідного зразка може зменшуватися або збільшуватися. При утворенні на поверхні продуктів корозії буде приріст маси зразків, а коли продукти корозії видаляються, то маса зразків буде зменшуватись.

Оцінка корозійної стійкості за держстандартами проводиться за глибинним показником проникнення корозії (мм/рік) і визначається за 10-бальною шкалою. Для невідповідальних деталей машин і апаратів

застосовують метали і сплави, швидкість корозії яких не перевищує 1 мм/рік.

Дані про втрату маси зразків характеризують лише рівномірну корозію. При міжкристалітній і місцевій корозії технологічний апарат може вийти з ладу навіть за відсутності втрати маси.

Оцінка зміни механічних властивостей матеріалу після впливу на нього агресивних середовищ дуже важлива при розрахунках апаратури харчових і переробних виробництв. При статичному розтягуванні зразка після корозійних випробувань можна встановити зменшення межі міцності і відносного подовження. Чим більший перетин зразка, тим менше знижується межа міцності. Тому цей вид випробувань варто використовувати для визначення впливу корозії на зміну механічних властивостей листових матеріалів і тонкостінних труб. Особливо він цінний за наявності міжкристалітної корозії. Схильність легованих сталей до міжкристалітної корозії можна виявити за зміною металевого звуку зразка, електричного опору і металографічним способом.

Електрохімічні вимірювання дозволяють визначити потенціал металевої поверхні в агресивному середовищі, її схильність до пасивації, що робить можливим прогнозування корозійної стійкості. Порядок їх проведення досить детально описаний у курсах електрохімії.

3.4.3 Випробування стійкості матеріалу

Випробування стійкості матеріалів, тобто їх опору руйнуванню, зношуванню, корозії, кавітації тощо, є вихідним для забезпечення надійності тих виробів, де ці процеси відіграють важливу роль у втраті працездатності. В результаті цих випробувань повинні бути одержані дані про швидкість проходження цих процесів, дії різних чинників або про критичні значення параметрів, за яких виникають небажані форми руйнування. Основною метою випробувань стійкості матеріалу є

встановлення залежностей, що зв'язують його характеристики із впливами (діями), що призводять до руйнування.

Загальними вимогами, що ставляться до випробувань матеріалів на той чи інший вид руйнування, є такі:

- умови випробувань повинні бути якомога ближчими до реальних умов експлуатації матеріалів і, відповідно, необхідно вибрати вид навантаження зразків, діючі навантаження, швидкості, температури, умови змащення тощо;
- конструкція випробувальної машини повинна забезпечувати весь необхідний діапазон умов випробування;
- випробування (методи, випробувальні машини, зразки) мають бути стандартними і давати змогу зіставити результати, одержані різними дослідниками;
- умови і метод випробування повинні забезпечити одержання характеристик, що оцінюють працездатність матеріалу в даних умовах з найменшим впливом конструктивних особливостей зразків. Це дасть змогу використати дані випробування для оцінки надійності різних деталей, додатково враховуючи особливості їх конструктивних форм;
- тривалість випробувань пов'язана як із характером перебігу процесу (наприклад, наявністю періодів із різною фізикою процесу), так із точністю вимірювання його ходу. Чим вищою є точність методів оцінки ступеня пошкодження, тим, в цілому, меншою може бути тривалість випробувань.

Досліджують опір матеріалів циклічному руйнуванню у наступних напрямках.

1. Встановлення механічних критеріїв втомного руйнування і визначення силових деформаційних та енергетичних характеристик.

2. Вивчення накопичення пошкоджень, у зв'язку з чим моделюється програмне (блокове і довільне за різних спектрів навантажень) і

випадкове навантаження.

3. Одержання статистичних характеристик втоми для стаціонарного, програмного або випадкового навантажень із побудовою діаграми втоми.

4. Дослідження кінетики розвитку тріщин під час дії стаціонарних і нестаціонарних навантажень.

5. Розвиток фізичних методів виявлення пошкоджень від втоми (рентгеноскопія, ультразвукова дефектоскопія, магнітна дефектоскопія тощо).

6. Визначення характеристик втомної міцності за різної концентрації напружень, асиметрії циклу, дії середовища тощо.

Граничної міцності при циклічних навантаженнях досягають раніше ніж при статичних. Втомне руйнування може виникати, якщо напруження нижчі від межі текучості. Особливість багатоциклової втоми полягає в тому, що макродеформація об'єму металу, як правило, відсутня. Деталь в цілому пружно деформується з виникненням місцевої повторної пружно-пластичної деформації окремих найневдаліше орієнтованих щодо силового поля кристалів, що супроводжується циклічним наклепуванням. Після досягнення критичного ступеня спотворення ґратки розриваються міжатомні зв'язки.

Основними характеристиками змінного навантаження є наступні.

Цикл напружень - сукупність послідовних значень змінних напружень за один період їх зміни.

Період циклу T , с - тривалість одного циклу напружень.

Максимальне напруження циклу, $\sigma_{\max}$ Мн/м² (кгс/мм²) - найбільше за алгебраїчним значенням напруження циклу, що дорівнює алгебраїчній сумі середнього напруження та амплітуди.

Мінімальне напруження циклу, $\sigma_{\min}$, Мн/м² (кгс/мм²) - найменше за алгебраїчним значенням напруження циклу, що дорівнює алгебраїчній

різниці середнього напруження та амплітуди.

Середнє напруження циклу, σ_m Мн/м² (кгс/мм²) - статична (додатна чи від'ємна) складова циклу напружень, що дорівнює алгебраїчній півсумі його максимального та мінімального напружень.

Амплітуда напруження циклу, σ_a , Мн/м² (кгс/мм²) - найбільше (додатне) значення змінної складової циклу напружень, що дорівнює алгебраїчній піврізниці його максимального та мінімального напружень.

Симетричний цикл напружень - цикл, в якого максимальне та мінімальне напруження однакові за значенням, але протилежні за знаком.

Асиметричний цикл - цикл, в якого максимальне та мінімальне напруження мають різні абсолютні значення.

Знакозмінний цикл - цикл напружень, що змінюються за значенням та знаком.

Знакосталий цикл - цикл напружень, що змінюються тільки за значенням.

Частота навантажень, f , Гц, с⁻¹ - кількість зміни циклів напружень за одиницю часу.

Для побудови кривої втоми та визначення межі витривалості досліджують не менше ніж 10-15 однакових зразків із деформівних сплавів і не менше ніж 15 із ливарних. Кількість досліджень для встановлення межі витривалості приймається такою, що дорівнює:

а) 10×10^6 циклів для металів і сплавів, що мають практично горизонтальну ділянку на кривій втоми;

б) 100×10^6 циклів для легких та інших сплавів металів, ординати кривих втоми яких по всій довжині безперервно зменшуються із зростанням кількості циклів.

Для порівняльних досліджень і визначення межі витривалості для чорних та кольорових металів відповідно необхідно 5×10^6 та 20×10^6

циклів.

Криві втоми за результатами досліджень невеликої кількості зразків (10-15 шт.) будують графічно, інтерполюючи експериментальні результати або за способом найменших квадратів.

Для першого зразка напруження зазвичай становить $2/3\sigma_B$. Нижня межа напружень вибирається із розрахунку $(0,45-0,50)\sigma_B$, а для високоміцних сталей $(0,3-0,4)\sigma_B$. Напруження для наступних зразків вибирають залежно від кількості зразків. За способом прискореного одержання кривої втоми напруження на перший зразок вибирають для сталей із $\sigma_B < 800 \text{ МН/м}^2$ (80 кгс/мм^2) із розрахунку $\sigma_1 = 1,25\sigma_{-1} = 1,25 \times 0,5\sigma_B$, а для сталей із $\sigma_B > 800 \text{ МН/м}^2$ (80 кгс/мм^2) за формулою $\sigma_1 = 1,12\sigma_{-1} = 1,12 \times 0,45\sigma_B$.

Напруження на другий зразок вибирають залежно від кількості циклів до руйнування першого зразка N_1 .

При $N_1 < 2 \times 10^5$ циклів, напруження на другому зразку $\sigma_2 = \sigma_1 - 20 \text{ МН/м}^2$ (2 кгс/мм^2), при $N_1 > 2 \times 10^5$ циклів $\sigma_2 = \sigma_1 + 20 \text{ МН/м}^2$ (2 кгс/мм^2). Отже, дослідженням перших двох зразків визначають розташування верхньої частини кривої втоми.

Напруження на третій зразок вибирають залежно від кількості циклів, які викликали руйнування перших зразків: при N_1 (або N_2) $= 1 \times 10^5 \dots 3,5 \times 10^5$ циклів $\sigma_3 = 0,8\sigma_1$ (або σ_2); при N_1 (або N_2) $= 3,5 \times 10^5 \dots 10^6$ циклів $\sigma_3 = 0,88\sigma_1$ (або σ_2). Напруження на четвертий зразок встановлюється:

1) якщо третій зразок не зламався за $N_3 = 10^7$ циклів $\sigma_4 = (\sigma_3 + \sigma_1)/2$, якщо $\sigma_1 < \sigma_2$ або $\sigma_4 = (\sigma_3 + \sigma_2)/2$, якщо $\sigma_2 < \sigma_1$;

2) якщо третій зразок зламався за $N_3 < 10^7$ циклів, то $\sigma_4 = \sigma_3$ ($20 \dots 30 \text{ МН/м}^2$), ($2 \dots 3 \text{ кгс/мм}^2$).

Оскільки напруження вибирають із розрахунку кількості циклів $10^6 < N_3 < 10^7$, то воно має бути близьким до межі витривалості для бази $N_6 = 10^7$

циклів.

Уточнюють межу витривалості на п'ятому зразку, напруження на який призначається $\sigma_5 = (\sigma_4 + \sigma_3)/2$, причому необхідно, щоб при одному із сумованих напружень (σ_4 або σ_3) зразок зламався, а при іншому не зламався після (10^7) циклів.

Різниця між максимальними (номінальними) напруженнями циклів для останніх двох етапів навантаження зазвичай не перевищує 3 МН/м² (0,3 кгс/мм²), при межі витривалості до 100 МН/м² (10 кгс/мм²); 5 МН/м² (0,5 кгс/мм²) при межі витривалості від 100 до 200 МН/м² (від 10 до 20 кгс/мм²); 10 МН/м² (1,0 кгс/мм²) при межі витривалості від 200 до 400 МН/м² (від 20 до 40 кгс/мм²); 15 МН/м² (1,5 кгс/мм²) при межі витривалості більше ніж 400 МН/м² (40 кгс/мм²).

На рівні межі витривалості повинно бути досліджено не менше від двох зразків (або один на межі витривалості, другий - точка "підтримки"). Враховуючи статистичну природу втомної міцності, зокрема межі витривалості, яка в даному випадку визначається із 50 %-ою ймовірністю, пропонується зміна вказаної послідовності дослідження зразків на рівні межі витривалості. Якщо напруження, дорівнюють 0,95-1,05 від межі витривалості, необхідно випробувати не менше від трьох зразків, причому половина із них не повинна руйнуватися до базової кількості циклів.

Якщо цикли симетричні, всі зразки досліджують при однаковій зміні максимальних та мінімальних їх напружень.

Досліджують серію однакових зразків під час асиметричних циклів:

а) за однакових коефіцієнтів асиметрії; .

б) за однакових для всіх зразків середніх напруженнях;

в) під час віднульового циклу із зміною середніх та амплітудних напружень (якщо зберігається сталим мінімальне напруження на нульовому значенні чи близькому до нього).

Вихідні дані та результати дослідження серії однакових зразків фіксують у протоколі дослідження.

Для побудови сімейства кривих втоми дослідження виконують на чотирьох-шести рівнях напруження. Максимальний вибирають так, щоб до базової кількості циклів зруйнувалось приблизно від 5 до 15% зразків, досліджуваних на цьому рівні. На наступному рівні у послідовності зростання напруження повинно зруйнуватися біля 40-60% зразків. Максимальний рівень напруження вибирають із врахуванням вимог до довжини лівої гілки кривої втоми ($N \geq 10^4$ циклів).

Результати досліджень для кожного із рівнів напруження розміщують у варіаційні ряди, на основі яких викреслюють сімейство кривих розподілу довговічності у координатах P-N на логарифмічно нормальному імовірному папері. Задаючись значеннями імовірності руйнування, на основі кривих розподілу довговічності будують сім'ї кривих втоми однакової імовірності.

3.5 Випробування на надійність елементів технічних систем

3.5.1 Мета та види випробувань

Основною метою досліджень на надійність є визначення рівня надійності виробу і оцінка його числовими показниками.

Випробування на надійність можуть бути *дослідними*, які проводяться для вивчення чинників, що впливають на надійність і *контрольними*, мета яких - оцінка рівня надійності даного виробу (ГОСТ 16504-74). За місцем проведення випробувань вони можуть бути *стендовими*, *полігонними* та *експлуатаційними*.

Стенові випробування забезпечують постійне спостереження за втратою машиною, вузлом або спряженням працездатності. На стендах випробовують як окремі вузли і механізми, так і всю машину.

Експлуатаційні та полігонні випробування дослідних та серійних зразків машин широко застосовують для отримання даних про надійність та довговічність виробів. При цьому прагнуть створити важкі умови експлуатації, щоб найретельніше перевірити працездатність всіх вузлів та механізмів. Експлуатаційні випробування дають змогу виявити недовговічні елементи машини, правильність взаємодії вузлів та механізмів і їх працездатність в реальних умовах.

Під час контрольних випробувань на надійність часто рекомендується їх розділити на випробування на безвідмовність, ремонтпридатність, збереженість та довговічність (ГОСТ 20699-75).

Випробування виробів на безвідмовність зводять до контролю імовірності безвідмовної роботи за певний час або до визначення напрацювання на відмову (середнього напрацювання до першої відмови). Випробування на ремонтпридатність зазвичай проводять для визначення середнього часу відновлення або імовірності відновлення працездатності виробу за заданий час. Випробування на довговічність призначаються для контролю середнього або гамма-відсоткового ресурсу. Випробування на збереженість передбачаються для контролю імовірності збереження показників виробу протягом заданого терміну.

Часто необхідна інформація про всі основні показники надійності виробу і контрольні випробування повинні одночасно дати дані про безвідмовність, довговічність, збереженість, ремонтпридатність та інші параметри.

Об'єктами випробувань можуть бути:

- *зразки*, коли випробовуються властивості матеріалів, що визначають довговічність виробів (випробування на зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо);

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

- *деталі, спряження, кінематичні пари* - коли вивчається вплив конструктивних і технологічних чинників на їх термін служби (випробування підшипників, зубчастих коліс, напрямних, шарнірів тощо);
- *вузли машини*, коли звертають увагу на взаємодію окремих механізмів елементів конструкції та їх вплив на показники працездатності (випробування коробок швидкостей, редукторів, двигунів, гідроагрегатів, систем управління тощо);
- *вся машина*, коли досліджується взаємодія всіх механізмів та вузлів у машині, умови її експлуатації і режими роботи (стендові та експлуатаційні випробування верстатів, автомобілів, обладнання тощо);
- *система машин*, коли показники надійності враховують взаємодію окремих машин, зв'язаних в єдиний виробничий комплекс (надійність роботи технологічних автоматичних ліній або цехів на заводі, літаків із врахуванням обладнання аеродромів, машин та агрегатів корабля тощо).

Існують дві основні групи характеристик виробу, які є об'єктом вимірювань та оцінки під час випробувань на надійність.

1. Характеристики процесів старіння та руйнування і визначення відповідного їм ступеня пошкодження виробу. Так, під час випробувань вивчають зношування, корозію, деформацію, втомні руйнування, нагароутворення тощо, що є основними причинами втрати виробом працездатності.

2. Характеристики зміни вихідних параметрів виробу (точності, ККД, несучої здатності тощо), вихід яких за допустимі межі призводить до відмови.

3.5.2 Технологічні аспекти реалізації випробувань

Випробування стійкості матеріалів, тобто їх опору руйнуванню, зношуванню, корозії, кавітації тощо, є вихідним для забезпечення

надійності тих виробів, де ці процеси відіграють важливу роль у втраті працездатності. В результаті цих випробувань повинні бути одержані дані про швидкість проходження цих процесів, дії різних чинників або про критичні значення параметрів, за яких виникають небажані форми руйнування. Основною метою випробувань стійкості матеріалу є встановлення залежностей, що зв'язують його характеристики із впливами (діями), що призводять до руйнування.

Загальними вимогами, що ставляться до випробувань матеріалів на той чи інший вид руйнування, є такі:

- умови випробувань повинні бути якомога ближчими до реальних умов експлуатації матеріалів і, відповідно, необхідно вибрати вид навантаження зразків, діючі навантаження, швидкості, температури, умови змащення тощо;
- конструкція випробувальної машини повинна забезпечувати весь необхідний діапазон умов випробування;
- випробування (методи, випробувальні машини, зразки) мають бути стандартними і давати змогу зіставити результати, одержані різними дослідниками;
- умови і метод випробування повинні забезпечити одержання характеристик, що оцінюють працездатність матеріалу в даних умовах з найменшим впливом конструктивних особливостей зразків. Це дасть змогу використати дані випробування для оцінки надійності різних деталей, додатково враховуючи особливості їх конструктивних форм;
- тривалість випробувань пов'язана як із характером перебігу процесу (наприклад, наявністю періодів із різною фізикою процесу), так із точністю вимірювання його ходу.

Чим вищою є точність методів оцінки ступеня пошкодження, тим, в цілому, меншою може бути тривалість випробувань.

Досліджують опір матеріалів циклічному руйнуванню за такими

напрямами.

1. Встановлення механічних критеріїв втомного руйнування і визначення силових деформаційних та енергетичних характеристик.

2. Вивчення накопичення пошкоджень у зв'язку з чим моделюється програмне (блокове і довільне за різних спектрів навантажень) і випадкове навантаження.

3. Одержання статистичних характеристик втоми для стаціонарного, програмного або випадкового навантажень із побудовою діаграми втоми.

4. Дослідження кінетики розвитку тріщин під час дії стаціонарних і нестаціонарних навантажень.

5. Розвиток фізичних методів виявлення пошкоджень від втоми (рентгеноскопія, ультразвукова дефектоскопія, магнітна дефектоскопія тощо).

6. Визначення характеристик втомної міцності за різної концентрації напружень, асиметрії циклу, дії середовища тощо.

Граничної міцності при циклічних навантаженнях досягають раніше ніж при статичних. Втомне руйнування може виникати, якщо напруження нижчі від межі текучості. Особливість багатоциклової втоми полягає в тому, що макродеформація об'єму металу, як правило, відсутня. Деталь в цілому пружно деформується з виникненням місцевої повторної пружно-пластичної деформації окремих найневдаліше орієнтованих щодо силового поля кристалів, що супроводжується циклічним наклепуванням. Після досягнення критичного ступеня спотворення ґратки розриваються міжатомні зв'язки.

3.5.3 Класифікація випробувань

Традиційні технічні розрахунки не дають точних кількісних показників надійності виробів. Визначення їх шляхом аналізу структурних

схем об'єктів за табульованими значеннями показників надійності елементів носить приблизний характер, тому що базується на усереднених статистичних даних без урахування впливу різноманітного поєднання діючих чинників. Більш точні, але теж невичерпні прогнози дають імовірнісні поелементні розрахунки надійності, але вони розроблені для обмеженої кількості елементів. Тому, в кінцевому випадку, показники надійності виробів визначають і підтверджують експериментально. Для цього використовують такі *три шляхи*: збір і обробка статистичних даних (анкетування), випробування і підконтрольна експлуатація. Досвід показує, що *анкетування* може давати цінні відомості про перебіг експлуатації виробів, але практично непридатне для повної оцінки їх якості.

В більшості випадків остаточно показники надійності виробів *визначаються або підтверджуються випробуваннями*, які, в залежності від поставлених цілей, бувають *визначальні і контрольні*. *Визначальні випробування* більш характерні для стадій проектування виробів. Вони проводяться для початкового визначення або уточнення розрахованих оцінок показників надійності і виконуються безпосередньо конструкторами разом із замовниками, або спеціальними випробувальними центрами.

В процесі серійного виробництва технічних об'єктів існує постійна потреба підтверджувати рівень їх надійності. Для цього проводяться *контрольні випробування*, які бувають приймальними і періодичними. Приймальні випробування проводять стовідсотково або вибірково. Їх тривалість, як правило, не перевищує тривалості періоду приробу виробу. Періодичним контрольним випробуванням підлягають вибірки з серії технічних об'єктів, об'єм і строки випробувань яких залежать від серійності виробництва і складності виробів.

Частіше випробовують об'єкт в цілому, але прибігають і до повузлових і поелементних випробувань, особливо коли вирішуються проблеми вузьких з точки зору надійності елементів виробів.

Точні оцінки показників надійності вимагають випробування великої кількості зразків виробів протягом тривалого часу, що спричиняє великі матеріальні затрати. Щоб зменшити затрати і прискорити одержання результатів, прибігають до обґрунтованого скорочення об'ємів випробувань за кількістю зразків і тривалістю їх випробувань. Об'єми випробувань скорочують також завдяки форсуванню їх режимів, зменшенню кількості випробуваних зразків за рахунок тривалості випробувань, або за рахунок підвищення точності вимірів, використання і всебічного аналізу всіх видів інформації про надійність технічного об'єкта. Скоротити і прискорити випробування можна, використавши метод наукового планування експериментів.

Значення показників надійності, одержані при випробуванні вибірок можуть відрізнитись від реальних значень у зв'язку з тим, що до них попадає обмежена кількість довільно вибраних зразків. Для підтвердження адекватності результатів випробувань і реальних величин показників надійності установлюються верхня P_v і нижня P_n *границі довірчої імовірності*, в межах яких знаходиться значення показника властивості надійності P за результатами випробувань, прийнятих для оцінки показників надійності конкретного виробу.

Імовірність того, що дійсне значення показника, який оцінюється, знаходиться у довірчому інтервалі $I_m \cdot (P_n \leq P \leq P_v) = \beta$ називається *довірчою імовірністю*. Таким чином можуть оцінюватись будь-які показники надійності і, відповідно, існують верхні і нижні імовірнісні межі показників безвідмовної роботи P_v і P_n , наробітків на відмову T_v і T_n , середньої тривалості відновлення $\bar{T}_{BB}, \bar{T}_{BH}$ та ін.

Символ β означає *двохсторонню довірчу імовірність*, тобто імовірність попадання параметру в інтервал, обмежений зверху і знизу. Для практичних потреб найбільш придатна одностороння оцінка α , коли кількісна величина показника не менша нижньої границі $I_m(\Pi_n \leq \Pi) = \alpha$ (наприклад, для імовірності безвідмовної роботи, середнього наробітку на відмову), або не більша верхньої границі $I_m(\Pi \leq \Pi_e) = \alpha$ (наприклад, для середньої тривалості відновлення дієздатності виробу). Оцінка α — це *одностороння довірча імовірність* знаходження параметру з необхідної сторони установлені довірчої границі. Величину α приймають на стадії випробувань експериментальних зразків виробів рівною 0,7...0,8, а на стадії передачі у серійне виробництво — 0,9...0,95. Менші значення приймають для дрібносерійного виробництва і великозатратних випробувань. При двохсторонній довірчій імовірності, коли зони поза довірчим інтервалом зверху і знизу однакові і дорівнюють α , то $(1 + \alpha) - (1 - \alpha) = 1 - \beta$, і $\alpha = (1 + \beta)/2$. Тоді значенням $\alpha = 0,8; 0,9; 0,95$ відповідають значення $\beta = 0,6; 0,8; 0,9$.

Верхні і нижні довірчі границі показників надійності для невідновлюваних і відновлюваних виробів визначаються по-різному.

3.5.4 Оцінка параметрів процесів деградації

3.5.4.1 Випробування невідновлюваних виробів

Для невідновлюваних виробів розглядають *два варіанти* оцінки нижньої Π_n і верхньої Π_v довірчих границь нормованих показників надійності: при вибірках менше однієї десятої генеральної сукупності виробів по біноміальному закону розподілу, а для більших вибірок — по нормальному.

У першому варіанті виходять з того, що при випробуваннях n виробів вихід за кожну з довірчих границь приймають рівним імовірності

появи в одному випадку не більше m відмов, а в іншому - не менше m відмов. Довірчу імовірність $(1 - \alpha)$ визначають за формулами:

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_H)^i \cdot \Pi_H^{n-i} = 1 - \alpha; \quad (3.132)$$

$$\sum_{i=m}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_B)^i \cdot \Pi_B^{n-i} = 1 - \alpha. \quad (3.133)$$

Для безвідмовних випробувань, коли $m = 0$.

$$1 - \alpha = \sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_H)^i \cdot \Pi_H^{n-i} = \Pi_H^n, \quad (3.134)$$

де n – кількість випробуваних виробів, m – кількість відмов.

$$\text{Тобто,} \quad \Pi_H = \sqrt[n]{1 - \alpha}. \quad (3.135)$$

Розглянуті формули незручні для великої кількості випробувань, а тому у другому варіанті прибігають до наближених обчислень, замінюючи біноміальне розподілення нормальним, і результати по кожному випробуванню виробу розглядають як окрему вибірку з $n = 1$, що має два виходи: $x_1=0$ — об'єкт відмовив, або $x_2=1$ — об'єкт не відмовив. Тоді середнє значення випадкової величини буде рівним сумі добутку всіх можливих значень випадкової величини на частоти їх виникнення:

$$x = \sum_{i=1}^2 x_i \cdot \Pi_i = 0 \cdot \frac{m}{n} + 1 \cdot \frac{n-m}{n} = \frac{n-m}{n} = P^*, \quad (3.136)$$

P^* — це частість збереження дієздатності. При збільшенні n частість наближається до імовірності події P .

Середнє квадратичне відхилення S_{IX} випадкової величини при випробуваннях одного виробу складає:

$$S_{IX} = \sqrt{\sum (x_i - x)^2 \Pi_i} = \sqrt{(0-x)^2 \cdot \frac{m}{n} + (1-x)^2 \cdot \frac{n-m}{n}} = \sqrt{x(1-x)} \quad (3.137)$$

а для n виробів воно в $\sqrt{n}$ раз менше. А тому

$$Sn_x = \sqrt{\frac{x(1-x)}{n}} \quad (3.138)$$

Тоді нижня і верхня довірчі границі показника надійності визначаються за формулами:

$$P_H = x + U_\alpha Sn_x = x + U_\alpha \sqrt{\frac{x(1-x)}{n}}, \quad (3.139)$$

$$P_B = x - U_\alpha Sn_x = x - U_\alpha \sqrt{\frac{x(1-x)}{n}}, \quad (3.140)$$

де U_α — квантиль нормального розподілу, що відповідає вибраній довірчій імовірності α .

Наближення до нормального розподілення прийнятне, якщо виконуються дві умови: $n \cdot x > 10$ і $n(1-x) > 10$.

На основі поданих вище формул побудовані графіки, по яких можна знайти P_H і P_B для різної кількості n випробуваних об'єктів при різних рівнях α і β (рис. 3.36).

3.5.4.2 Випробування відновлюваних виробів

Випробування відновлюваних виробів проводяться з їх заміною або відновленням у них елементів, що відмовили. Їх *метою* найчастіше буває визначення наробітку на відмову, для якого найбільш справедливим буває експоненційний закон розподілу випадкових величин.

Середній наробіток на відмову визначається співвідношенням

$$T = t_\Sigma / m, \quad (3.141)$$

де $t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_i$ — сумарна тривалість випробувань n об'єктів з

тривалістю t_i ; кожного m — загальна кількість відмов протягом випробувань.

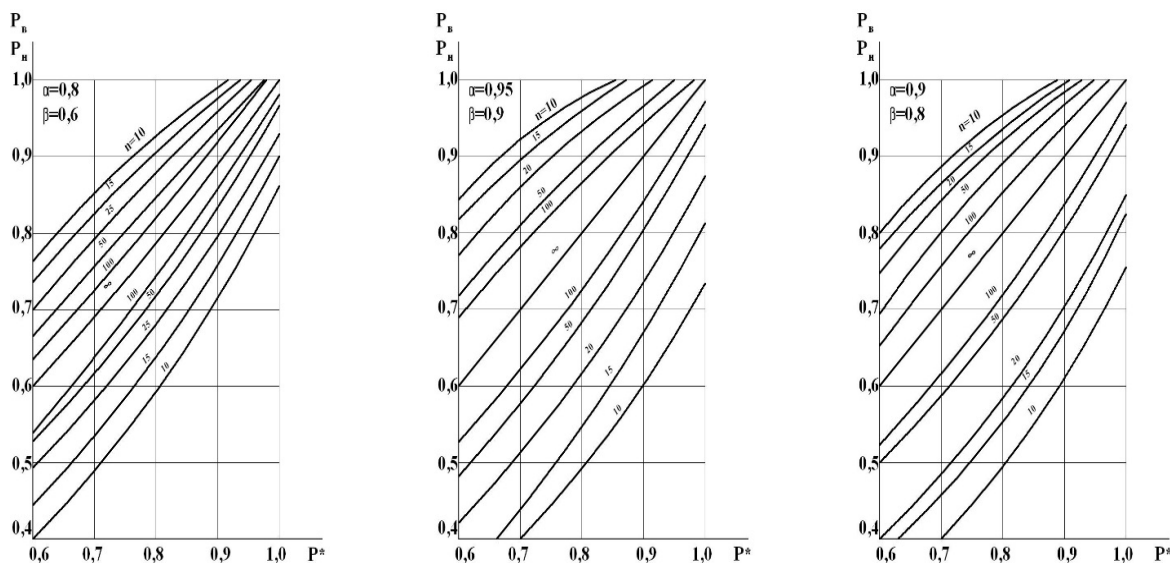


Рис. 3.36 Залежність нижньої P_n і верхньої P_v довірчих границь імовірності безвідмовної роботи від об'єму і результатів випробувань об'єктів:

α — одностороння довірка імовірність; β — двостороння довірка імовірність;

$P^* = x$ — частість збереження дієздатності; $P^* = 1 - m/n$, де n — кількість випробуваних виробів, m — кількість відмов

Довірчі границі середнього наробітку на відмову знаходять, використовуючи відношення $2t_{\Sigma} / T$, яке знаходиться через розподіл χ^2 (табл. 3.14) з степенями вільності $2m$, якщо випробування припиняються після настання чергової відмови, або $2 \cdot (m+1)$, якщо випробування припиняються після закінчення передбаченого часу випробувань. Для одностороннього довірчого інтервалу імовірнісні співвідношення виразу $2t_{\Sigma} / T$ мають вигляд:

$$\alpha = Im(\chi^2_{\alpha; 2m} \geq 2t_{\Sigma} / T); \quad (3.142)$$

$$\alpha = Im(\chi^2_{1-\alpha; 2(m+1)} \leq 2t_{\Sigma} / T), \quad (3.143)$$

$$\text{звідки} \quad T_H = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{(1-\alpha); 2(m+1)}}; \quad T_B = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{\alpha; 2m}} \quad (3.144)$$

Для двохстороннього довірчого інтервалу:

$$T_H = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{(1+\beta)/2; 2(m+1)}}; \quad T_B = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{(1-\beta)/2; 2m}}, \quad (3.145)$$

Таблиця 3.14

Характеристика розподілу χ^2

К-сть відмов	Значення параметра							
	$\chi^2_{1-\alpha; 2(m+1)}$ при α				$\chi^2_{\alpha; 2m}$ при α			
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,7	0,8	0,9	0,95
0	2,41	3,22	4,6	6,0	-	-	-	-
1	4,9	6,0	7,8	9,5	0,713	0,446	0,221	0,103
2	7,2	8,6	10,6	12,6	2,19	1,65	1,06	0,71
3	9,5	11,0	13,4	15,5	3,83	3,07	2,20	1,63
4	11,8	13,4	16,0	18,3	5,53	4,59	3,49	2,73
5	14,0	15,8	18,5	21,0	7,27	7,8	4,86	3,94
6	16,2	18,2	21,1	23,7	9,0	8,18	6,3	5,2
7	18,4	20,5	23,5	26,3	10,8	9,5	7,8	6,6
8	20,6	22,8	26,0	28,9	12,6	11,2	9,3	8,0
9	22,8	25,0	28,4	31,4	14,4	12,9	10,9	9,4
10	24,9	27,3	30,8	33,9	16,3	14,6	12,4	10,9

Розглянемо *порядок* використання табл. 3.14.

Приклад. Випробувано 3 вироби, кожний протягом 600 год. В процесі випробувань відбулося 4 відмови. Після відмов працездатність виробів поновлювали. Потрібно оцінити нижню границю середнього наробітку на відмову з односторонньою довірчою імовірністю $\alpha = 0,8$.

Розв'язок: $t_{\Sigma} = nt = 3 \cdot 600 = 1800 \text{ год.}$

Використавши табл. 6.1, при $\alpha = 0,8$ маємо $\chi^2_{1-\alpha; 2(m+1)} = 13,4$.

$$T_H = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{(1-\alpha); 2(m+1)}} = \frac{2 \cdot 1800}{13,4} \approx 269 \text{ год.}$$

3.5.5 Форсування випробувань

Найточніші дані дають випробування з максимальним наближенням умов їх проведення до умов використання випробуваних виробів. Але такі випробування відзначаються великою тривалістю, в

результаті чого затримуються висновки і заходи за їх результатами. Тому застосовують різні методи форсування випробувань.

Найчастіше використовують спосіб форсування за рахунок *підсилення режимів випробувань*, чим досягають скорочення тривалості випробувань у декілька разів. Для цього випадку оцінюваний показник надійності P для нормальних умов роботи технічного об'єкта обчислюється через *коефіцієнт підсилення K_p* (або критерій подібності) і значення фактичного показника P_f , одержаного при випробуваннях в форсованому режимі, корегується:

$$p = P_f \cdot K_p \quad (3.146)$$

Пряме підсилення режиму можливе тільки в межах, коли не міняється характер співвідношення між оцінюваними параметрами і показником, по якому форсується режим. Тобто форсування повинно змінювати лише інтенсивність процесів, що відбуваються в об'єкті випробувань, але не замінювати одні процеси іншими. Наприклад, форсування режимів випробувань деталей, які працюють в умовах пружної деформації, може здійснюватись тільки у межах пружної деформації. Для вузлів тертя граничними умовами випробувань можуть бути режими, які не приводять до схоплювання деталей.

Для деяких чинників співвідношення значень показників для нормального P і форсованого P_f режимів, за якими визначають коефіцієнт K_p , відомі. У загальній формі вони мають вигляд:

$$K_p = (P_f / P)^m \quad (3.147)$$

Показник степені m у цьому рівнянні, наприклад, для співвідношення меж міцності для форсованого σ_f і нормального σ режимів при випробуваннях об'єктів на втомлюваність дорівнює: для деталей з покращеної і нормалізованої сталі — 6, для деталей із загартованих сталей — 9...12. При контактних навантаженнях деталей $m = 6$, а при зношуванні в умовах недостатнього мащення $m = 1...2$. При

визначенні ресурсу мастил з форсуванням випробувань за рахунок температури приймають m для різних мастил таким: для органічних — 7, неорганічних — 4...6.

Для виробів, які працюють зі змінним режимом, випробування можна форсувати за рахунок зменшення тривалості, виключаючи періоди незначного і малозначного навантаження.

Графіки (див. рис. 6.1) показують можливість зменшення кількості випробуваних зразків для невідновлюваних виробів за рахунок оцінки надійності за відсутності або при малій кількості відмов. З графіків видно, що один і той же нижній довірчий рівень справедливий для різної кількості випробуваних зразків об'єктів, бо $x = 1 - m/n$ і для підтвердження будь-якого нижнього рівня показника надійності, наприклад, імовірності безвідмовної роботи P_H , можна використати всі значення n . Причому, для $n = 50$ можна задавати найбільшу граничну кількість відмов, а для $n = 10$ - найменшу. Хоча такий шлях форсування випробувань підвищує ризик не підтвердити (зменшити) показники надійності, виготовлювачі виробів ідуть на нього, вигравши на об'ємах і тривалості випробувань. Мінімальну кількість зразків для випробування невідновлюваних виробів знаходять із умови, що відмови не відбудуться ($m = 0$) за значенням нижнього довірчого рівня показника надійності:

$$\Pi_H = \sqrt[n]{1 - \alpha}, \quad (3.148)$$

де n - кількість випробувань, α - одностороння довірна імовірність.

Після логарифмування цього рівняння, отримаємо:

$$n_{\min} = \frac{\lg(1 - \alpha)}{\lg \Pi_H} \quad (3.149)$$

Найменшу сумарну тривалість випробувань відновлюваних виробів, виходячи з тих же умов ($m = 0$), можна знайти з формули.

$$T_H = \frac{2t_\Sigma}{\chi_{1-\alpha; 2(m+1)}^2}, \quad (3.150)$$

Тоді

$$t_{\Sigma \min} = \frac{T_H \cdot \chi_{1-\alpha; 2(m+1)}^2}{2} \quad (3.151)$$

Зменшити кількість випробуваних зразків відновлюваних виробів можна і за рахунок збільшення тривалості періоду випробувань. У цьому випадку, визначаючи показники, що мають експоненційний розподіл, сумарний об'єм випробувань $t_\Sigma = n \cdot T$ залишають постійним, пропорційно зменшуючи кількість випробувань n , а результати випробувань перераховують на заданий час.

При інших розподілах (нормальному, логарифмічно нормальному, Вейбулла) призначений ресурс t і параметри наробітку на відмову пов'язані відповідними рівняннями:

$$t = \bar{t} + Up \cdot S_t; \quad (3.152)$$

$$\lg t = \lg \bar{t} - Up \cdot S_{\lg t}; \quad (3.153)$$

$$P = \exp(-kt^\nu), \quad (3.154)$$

де $\bar{t}, \lg \bar{t}$ - середнє значення ресурсу і його логарифму;

$S_t, S_{\lg t}$ - середнє квадратичне відхилення ресурсу і його логарифму;

Up - квантиль нормального розподілу, що відповідає імовірності безвідмовної роботи P ;

k, ν - відповідно параметри масштабу і форми розподілу Вейбулла.

Виходячи з цього, формули для перерахування часу випробувань t_B на заданий ресурс t для названих трьох законів розподілу приймуть вигляд:

$$Up = \frac{t - t_B}{V_t \cdot t_B} + Up_B \frac{t}{t_B}; \quad (3.155)$$

$$Up = \frac{\lg t - \lg t_B}{S_{\lg t}} + Up_B; \quad (3.156)$$

$$\ln P = (kt^v) \ln P_{H_B}, \quad (3.157)$$

де $V_t = S_t / \bar{t}$ — коефіцієнт варіації ресурсу; P_{H_B} , Up_B — імовірність безвідмовної роботи протягом часу випробувань і відповідна їй квантиль.

У процесі випробування виробу протягом $t_B > t$ та оцінки за графіками (рис. 3.36) значення нижньої довірчої границі імовірності безвідмовної роботи протягом часу випробувань. При використанні формул (3.155 - 3.157) перераховують на час t .

Для великогабаритного обладнання харчових виробництв, яке найчастіше випускається дрібними серіями, випробування бувають пов'язаними з використанням продукту переробки. Тому визначальні і контрольні випробування такого обладнання не проводять, а замінюють їх *підконтрольною експлуатацією* безпосередньо в технологічних лініях, під час якої ведеться систематичне спостереження за роботою виробу з участю виробника.

3.5.6 Періодичні контрольні випробування

Задані параметри надійності при виробництві виробів підлягають перевірці з проведенням періодичних контрольних випробувань, які проводяться з вибіркою виробів. Таким випробуванням підлягають зразки нового і модернізованого серійного обладнання при зміні конструкції і технології виготовлення, або при заміні матеріалів та комплектуючих елементів.

Основною задачею при плануванні контрольних випробувань є визначення виду плану (методу) випробувань, кількості випробуваних зразків і тривалості випробувань, обґрунтування приймальної та бракувальної границь для конкретних об'єктів.

Найбільш просто проводити контрольні випробування за *одноступінчастим методом*, а остаточні висновки про рівень надійності об'єкта робити після повного закінчення призначеної тривалості випробувань. Цей метод доцільно застосовувати для контролю показників надійності невідновлюваних виробів і для контролю середньої тривалості відновлення відновлюваних виробів. Широко також використовується *послідовний метод* контрольних випробувань, за яким оцінюються показники надійності після кожної чергової відмови, результати кожної ступені випробувань порівнюються з вимогами технічної документації, а після цього приймається рішення забракувати, прийняти вироби чи продовжити випробування. Послідовний метод ефективний для контролю середнього наробітку на відмову відновлюваних виробів.

Вихідними даними для визначення кількості випробувальних зразків і тривалості їх випробувань служать: ризик виготовлювача $\alpha_в$, ризик споживача $\beta_с$, приймальний і бракувальний рівень контролюваного показника.

Ризик виготовлювача — це імовірність того, що за результатами випробувань вибірки бракується партія якісних виробів, рівень надійності яких співрозмірний або перевищує заданий технічною документацією.

Ризик споживача — це імовірність того, що за результатами випробувань вибірки приймається партія виробів, рівень надійності яких нижче заданого.

Значення $\alpha_в$ і $\beta_с$ вибирають із ряду чисел 0,05, 0,1, 0,2. Найсприйнятнішою є умова, коли $\alpha_в = \beta_с$. В загальному машинобудуванні,

у тому числі при виробництві обладнання харчових виробництв найчастіше приймають $\alpha_c = \beta_c = 0,2$.

Бракувальний рівень Π_β контрольованого показника надійності, як правило, приймають рівним нижчому за якістю граничному значенню, заданому в технічних умовах на об'єкт : ($\Pi_\beta = \Pi_H$). *Прийманий же рівень* Π_α вибирають вищим за бракувальний у певному співвідношенні. Для імовірнісних показників надійності прийнятним може бути співвідношення:

$$\Pi_\alpha \geq \Pi_\beta + 1/2; \quad (3.158)$$

Для показників надійності, заданих у фізичних одиницях, користуються ще таким співвідношенням:

$$\Pi_\alpha = (1,5 \dots 15) \Pi_\beta \quad (3.159)$$

При виборі рівнів показників враховують техніко-економічні чинники: вартість технічних об'єктів, розмір партії виробів, складність випробувань, тип контрольованого показника надійності. Найзручніше приймати співвідношення (3.159) з коефіцієнтом 2 або 4.

Результати контрольних випробувань, нижчі за якістю бракувального рівня, дають підстави для безумовного бракування партії виробів. При отриманні результатів випробувань, рівних або вищих приймального рівня, їх визнають позитивними для приймання виробів. Якщо за результатами випробувань показники надійності знаходяться між приймальними і бракувальним рівнями, приймають рішення про продовження випробувань і остаточні висновки щодо якості виробів роблять за сумарними результатами.

Для невідновлюваних виробів, що випробовуються за одноступінчастим планом, величину вибірки n і допустиму кількість відмов m протягом заданого часу випробувань знаходять, використовуючи формули:

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_{\alpha})^i \cdot \Pi_{\alpha}^{n-i} = 1 - \alpha_{\text{в}}; \quad (3.160)$$

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_{\beta})^i \cdot \Pi_{\beta}^{n-i} = \beta_{\text{с}}. \quad (3.161)$$

Планування одноступінчастих випробувань для контролю імовірностних показників надійності спрощується при застосуванні даних табл. 3.15.

Таблиця 3.15

Планування одноступінчастих випробувань для контролю показників типу Р

При $\alpha_{\text{в}} = \beta_{\text{с}} = 0,1$				При $\alpha_{\text{в}} = 0,1; \beta_{\text{с}} = 0,2$			
P_{α}	P_{β}	План		P_{α}	P_{β}	План	
		m	n			m	n
0,9	0,8	11	81	0,9	0,80	8	56
	0,7	4	25		0,75	4	26
	0,6	2	12		0,70	3	17
	0,5	1	7		0,65	2	11
0,85	0,75	18	95	0,85	0,75	14	70
	0,65	6	28		0,65	4	18
	0,55	3	13		0,55	2	8

Приклад 1. Вибрати план одноступінчастого контролю імовірності безвідмовної роботи технічних об'єктів з невідомим розподілом відмов, якщо у технічній документації на вироби задано: $P_{\alpha}(600\text{год}) = 0,9$; $P_{\beta}(600\text{год}) = 0,7$ при $\alpha_{\text{в}} = \beta_{\text{с}} = 0,1$.

Розв'язок. З таблиці (6.2) видно, що для заданих умов $m = 4$ і $n = 25$. Тобто треба організувати 25 циклів випробувань протягом 600 годин. Випробування припиняються з негативним результатом, якщо до вичерпання об'єму випробувань настає 5-та відмова. Якщо протягом випробувань відбулося 4 і менше відмов, то результати випробувань визнаються позитивними.

Полегшити обчислення можуть і графіки див. рис.(6.1).

Приклад 2. Знайти об'єм вибірки n і допустиму кількість відмов m при заданій нижній границі імовірності безвідмовної роботи виробів $P_H(t) = 0,8$ (з довірчою імовірністю $\alpha = 0,9$).

Розв'язок. Приймаємо $\alpha_c = \beta_c = 0,2$; $P_\beta(t) = P_H(t) = 0,8$

$$P_\alpha(t)_{\min} = \frac{P_\beta(t) + 1}{2} = \frac{0,8 + 1}{2} = 0,9$$

Приймаємо $P_\alpha(t) = 0,95$.

Тоді згідно графіків (див. рис. 6.1) $n \approx 15$, $x = P^* = 0,925$. З формули $x = (n - m)/n$ знаходимо що $m = 1$. З тих же графіків видно, що для $P_\alpha(t) = 0,9$ при $n = 15$ приймальний рівень відмов $m = 0$. Тобто за заданий час t допускається відмова одного виробу з 15. При більшій кількості відмов партія бракується.

Послідовний контроль імовірнісних показників (типу P) реалізується з використанням планів випробувань, поданих в табл. 3.16.

Таблиця 3.16

**Планування послідовних випробувань для контролю
показників типу Р**

α_c	β_c	P_α	P_β	a	m_0	$m_{об}$	n_0	n'
0,1	0,1	0,9	0,8	0,145	2,71	12	18,6	48
			0,6	0,226	1,23	3	5,4	8
		0,85	0,7	0,219	2,48	12	11,3	30
			0,55	0,248	1,43	4	5,0	9
0,2	0,2	0,9	0,8	0,145	1,71	6	11,8	3
			0,6	0,226	0,77	1	3,4	4
		0,85	0,7	0,219	1,56	5	7,2	14
			0,55	0,284	0,90	2	3,2	4

За параметрами плану в системі координат mn (рис. 3.37) будують лінії, що розділяють бракувальну (Б) і приймальну (П) зони. Відповідно, $m = an + m_0$ і $m = a(n + n_0)$. Зона ж проміж ліній є зоною продовжених послідовних випробувань (В). Обмеження об'єму контролю проводиться за кількістю негативних результатів $m_{об}$ і по числу спостережень:

$$n_{об} = m_{об} / a. \quad (3.162)$$

Для контролю береться вибірка n' і піддається випробуванню.

Після проведення спостережень за всіма об'єктами підраховується кількість закінчених спостережень n і кількість відмов m . На графік наноситься точка з координатами n і m . В залежності від того, в яку зону

вона попадає, приймають одне з наступних рішень. Якщо точка попадає в зону В, то випробування повторюються, а заключне рішення приймається за результатами подвоєного об'єму випробувань. При перетинанні однієї з граничних ліній випробування припиняються. Якщо при повному завершенні плану випробувань перетину лінії випробувань з однією з граничних ліній не відбулося, то на випробування ставлять додатково об'єкти в кількості $n_{об} - n'$ і їх продовжують.

Приклад. Розробити план контрольних випробувань за послідовним методом при заданих $P_{\alpha}(600г) = 0,9$; $P_{\beta}(600г) = 0,6$; $\alpha_{в} = \alpha_{с} = 0,1$.

Розв'язок. За табл.6.3. для заданих умов виберемо вихідні дані: $a = 0,226$, $m_0 = 1,23$; $m_{об} = 3$; $n_0 = 5,4$; $n' = 8$. Обчислимо $n_{об} = m_{об} / a = 3 / 0,226 \approx 13,3$. На підставі цих даних побудуємо графік послідовного контролю з граничними лініями і організуємо 13 циклів спостережень по 600 годин кожний. По завершенню кожного циклу на графіку проставимо точки з координатами, що відповідають накопиченій кількості спостережень n і відмов m . Ступінчаста лінія, що з'єднує ці точки, є графіком послідовних випробувань (I — негативні результати; III — позитивні результати; II — додатково на випробування необхідно поставити $13 - 8 = 5$ виробів).

Послідовний контроль показників надійності типу “наробіток” ведеться за планами, поданими в табл. 3.17.

Таблиця 3.17

**Планування послідовного контролю показників типу
“наробіток” при експоненційному розподілі**

$\alpha_{в} = \beta_{с} = 0,1$						$\alpha_{в} = \beta_{с} = 0,2$					
T_{α} / T_{β}	План					T_{α} / T_{β}	План				
	a	m_0	t_0/T_{α}	$m_{об}$	t_{Σ}/T_{α}		a	m_0	t_0/T_{α}	$m_{об}$	t_{Σ}/T_{α}
5,0	2,5	1,4	0,55	3	0,73	5,0	2,5	7,1	0,35	1	0,35
3,0	1,8	2,0	1,10	6	1,95	3,0	1,8	1,3	0,69	2	0,92
2,0	1,4	3,2	2,19	15	5,69	2,0	1,6	1,5	0,92	4	1,42
1,0	1,2	5,4	4,39	40	18,60	1,0	1,4	2,0	1,39	7	2,71

По параметрах плану в системі координат m , t_{Σ}/T_{α} (рис. 3.38) відкладаються лінії $m = a \cdot t_{\Sigma}/T_{\alpha} + m_0$ і $m = a \cdot (t_{\Sigma}/T_{\alpha} - t_0/T_{\alpha})$, які відмежовують

відповідно бракувальну (Б) і приймальну (П) зони. Обмеження контролю m ведеться по умовах: $m_{об} \text{ і } t_{об}/T_{\alpha} = m_{об}/a$.

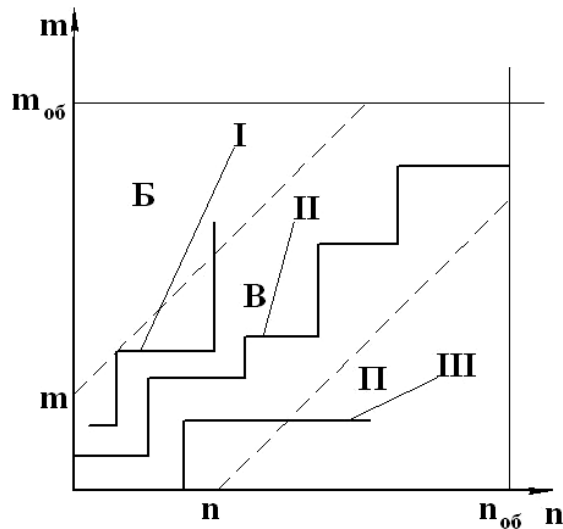


Рис. 3.37 Графік послідовних випробувань для контролю імовірнісних показників типу P

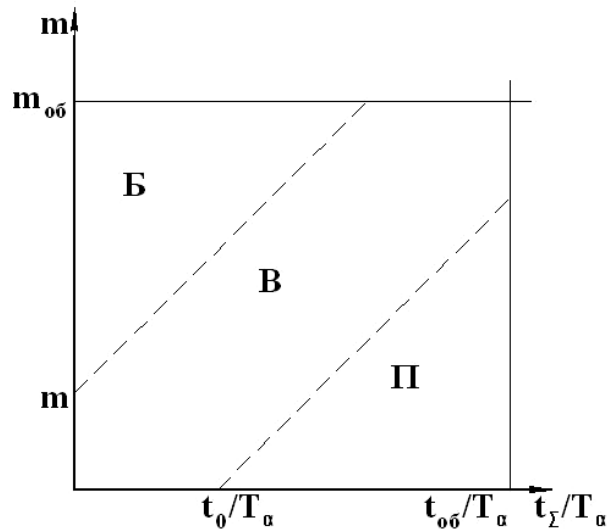


Рис. 3.38 Планування послідовних випробувань для контролю показників типу „наробіток”

Кількість зразків для випробувань без відновлення і заміни виробів, що відмовили, визначається так, щоб забезпечувалась реалізація вибраного обмеження, тобто $n \geq m_{об}$. При замінах і відновленнях виробів вибірка може бути будь-якою. Якщо контролюються вибірки, які під час випробувань не змінюються і не невідновлюються, то їх об'єм визначають за формулою: $n = t_{\Sigma}/T_{\alpha}(T_{\alpha}/t_e + 1)$, де t_e — тривалість випробувань. Під час випробувань на графік (рис.3.38) після кожної відмови наносяться точки з координатами $m, t_{\Sigma}/T_{\alpha}$ і за розташуванням чергової точки оцінюють результати випробувань. Попадання точки в зону П або Б дає підставу для завершення випробувань і партія виробів відповідно приймається або бракується. При попаданні точки в зону В випробування продовжуються.

Приклад. Для контролю надійності виробів задаються два рівні середнього наробітку на відмову $T_{\alpha} = 3000$ год і $T_{\beta} = 1500$ год, а також ризики $\alpha_{\beta} = \beta_{\alpha} = 0,2$.

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

Визначити план послідовного контролю, якщо відомо, що розподіл наробітку експоненціальний, а гранична тривалість випробувань $t_b = 600$ г.

Розв'язок. За табл.6.4. для $T_\alpha / T_\beta = 2$ при $\alpha_e = \beta_c = 0,2$. Знаходимо $a = 1,4$; $m_0 = 2,0$; $t_0/T_\alpha = 1,39$; $m_{00} = 7$; $t_\Sigma/T_\alpha = 2,71$. Тоді $t_{00}/T_\alpha = m_{00}/a = 7/1,4 = 5$. На підґрунті цих даних готують графік для послідовних випробувань. Кількість зразків виробів, які будуть поставлені на випробування, розраховують так:

$$n = t_\Sigma/T_\alpha (T_\alpha/t_b + 1) = 2,71(3000/600 + 1) = 16,26 \approx 16 \text{ шт.}$$

Відмітимо, що в літературних джерелах можна зустріти і інші методики випробувань.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Опишіть порядок визначення показників безвідмовності невідновлювальних виробів за результатами випробувань.
2. Як побудувати варіаційний ряд наробітків на відмову технічних об'єктів?
3. Якими параметрами характеризується густина розподілу випадкової величини?
4. Як визначаються основні параметри диференціальної функції густини розподілу випадкової величини: математичне сподівання, мода, квантиль, дисперсія і коефіцієнт варіації?
5. Як визначити інтенсивність відмов об'єктів за результатами спостережень?
6. Особливості визначення показників безвідмовності відновлювальних виробів із застосуванням параметру потоку відмов.
7. Опишіть основні показники ремонтпридатності об'єктів і способи їх визначення.
8. Охарактеризуйте комплексні показники надійності.
9. Які визначальні періоди в експлуатації виробів розрізняють за інтенсивністю відмов?
10. Чим відрізняються статистичні та імовірісно-фізичні моделі відмов?
11. Які моделі відмов відносяться до імовірісних?
12. Які моделі відмов відносяться до імовірісно-фізичних?
13. Як пов'язана між собою густина розподілу відмов та безвідмовність виробів?

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

14. Яка фізична сутність квантилей розподілу випадкових величин та їх різновидів?
15. У яких випадках моделі відмов описуються імовірнісними законами надійності нормальним, логарифмічно нормальним, гамма, Пуассона, Вейбула, експоненційним)?
16. Які переваги у застосуванні об'єднаних розподілів при оцінці надійності?
17. Які переваги при застосуванні імовірнісно-фізичних розподілів відмов (λ, DM, DN) у відповідності з ГОСТ 3433-96?
18. Які основні вимоги до функцій розподілу випадкових величин, що використовуються як моделі відмов?
19. Які завдання надійності вирішуються з використанням DM і DN -розподілів відмов?
20. Які завдання надійності вирішуються із застосуванням експоненційного розподілу відмов?
21. Які види випробувань технічних об'єктів застосовують для визначення показників надійності?
22. Назвіть переважні випадки застосування визначальних і контрольних випробувань.
23. У яких випадках застосовують приймальні і періодичні контрольні випробування виробів?
24. Чому сутність верхньої і нижньої границь довірчої імовірності для показників надійності?
25. У чому різниця між однобічною і двобічною довірчими ймовірностями при визначенні показників надійності та який між ними зв'язок?
26. Назвіть основні методи форсування випробувань.
27. Як визначити мінімальну кількість зразків для проведення випробувань невідновлюваних виробів за відомою односторонньою довірчою імовірністю?
28. У яких випадках застосовуються одноступінчастий та багаступінчастий методи випробувань виробів?
29. Як визначити приймальний і бракувальний рівень контрольованого показника надійності?
30. Який порядок проведення послідовних випробувань для контролю показників надійності?
31. Види і характеристика подій при випробуваннях технічних об'єктів.

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

- 32. Дискретні випадкові величини та їх основні характеристики.
- 33. Безперервні випадкові величини та їх основні характеристики.
- 34. Частота настання події і застосування цього поняття при визначенні показників надійності об'єктів.
- 35. Порядок застосування додавання та множення імовірностей подій для розв'язання задач надійності.

Розділ 4 ТЕХНОЛОГІЧНО-ОРГАНІЗАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

4.1 Резервування технічних систем

4.1.1 Сутність та класифікація

Проектування любого технічного об'єкта передбачає обрання такої конструкції, яка б мала найменшу кількість складових елементів, відмова яких не призводила б до невиконання об'єктами будь-якої з покладених на нього функцій. Разом з тим, такий спрощений об'єкт може мати низькі показники надійності, а тому потрібно застосовувати різні методи їх підвищення. Перш за все розглядаються можливості використання високонадійних елементів, зміни конструкції і принципу дії об'єкта. Якщо розв'язати проблему не вдається, то застосовують **резервування** - метод підвищення надійності об'єкта завдяки введенню **надмірної** кількості його елементів. У технічних об'єктах, і технологічних лініях застосовують структурне, функціональне, інформаційне і почасове резервування.

Структурне резервування передбачає введення надмірності. При цьому надмірні резервні структурні елементи виконують робочі функції при відмові відповідних основних або на протязі всього періоду функціонування об'єкта.

Функціональне резервування має місце тоді, коли різні об'єкти або системи виконують близькі функції. Такий вид резервування найчастіше використовують для багатофункціональних об'єктів і систем. Так, тиск пари на виході котлоагрегата можна визначити за показами реєструючих приладів та шляхом зчитування цього параметра з інформаційно-вимірювальної системи, що виконує розрахунки техніко-економічних та інших показників.

Інформаційне резервування пов'язане з використанням надмірної інформації і передбачає можливість компенсації втрати інформації за рахунок її повторення або за рахунок передачі інформації запасним каналом. На більшості технологічних об'єктів завдяки внутрішнім зв'язкам, має місце інформаційна надмірність, яку часто використовують для перевірки достовірності інформації. Наприклад, усереднена витрата пари на виході парового котла відповідає усередненій витраті води на його вході, а витрата газу у котлі визначає витрату повітря при фіксованому складі димових газів.

Погодинне резервування передбачає використання надмірного часу і передбачає перерви у роботі об'єкта при відмові його елемента. Таким чином, на виконання системою заданих функцій передбачений час, більший за необхідний. Часто погодинне резервування, яке забезпечує безперервність технологічного процесу, здійснюється завдяки введенню резервних технологічних ліній, акумуляторних ємностей, складів сировини та напівфабрикатів. Погодинне резервування можна реалізувати за рахунок акумулюючої здатності самого технологічного об'єкта. Так, наприклад, тимчасова перерва у подачі палива в паровий котел призведе до припинення генерації пари, тому що наявна акумуляція теплоти поверхнями нагрівання котлоагрегата.

На практиці найчастіше застосовується структурне резервування, тому розглянемо його більш детально.

4.1.2 Структурне резервування

Структурне резервування може бути загальним і по елементним (рис. 22). Розрізняють резервування систем і підсистем загальне, постійне, поелементне постійне, загальне заміщувальне, поелементне заміщу вальне і ковзне (з дробовою кратністю).

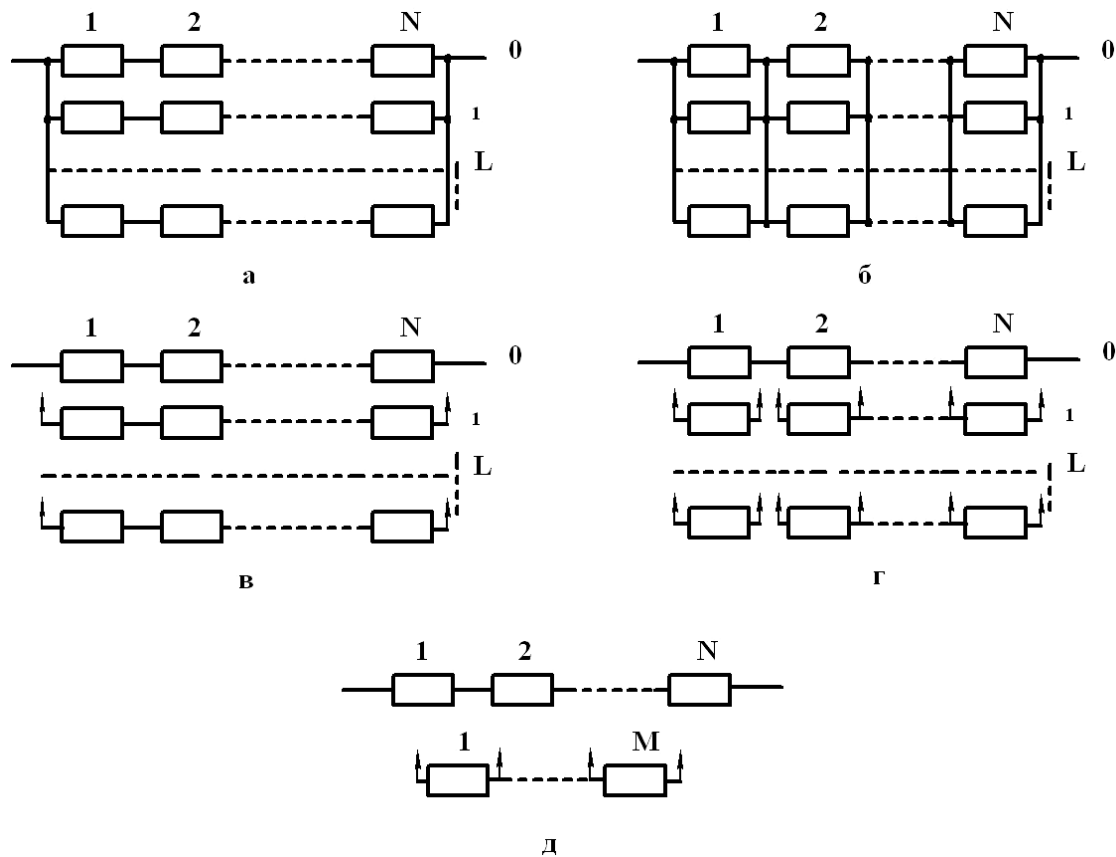


Рис. 4.1 Схема резервування: а - загального постійного; б - поелементного постійного; в - загального заміщувального; г - поелементного заміщувального; д - ковзного

При постійному резервуванні (рис. 4.1, а, б,) резервні елементи працюють нарівні з основними, а тому немає потреби у вмикаючих резерв пристроях. Такий вид резервування називають **пасивним**.

При заміщувальному резервуванні (рис. 4.1, в, г) у випадку відмови основного елемента вмикається резервний, а тому такий вид резервування називають **активним**.

Ковзне резервування (рис. 4.1, д) - окремий вид заміщувального застосовується, коли до складу системи входять однотипні елементи. Тоді група основних елементів може мати один або декілька резервних.

В залежності від режиму роботи резервних елементів розрізняють такі їх види:

- **навантажений (теплий)**, коли резервні елементи знаходяться у полегшених робочих умовах і вмикаються в робочий режим після відмови працюючого основного елемента;

- **ненавантажений (холодний)**, коли резервні елементи не навантажені і вмикаються в робочий режим після відмови працюючого основного елемента. На рис. 4.2 відрізки прямих зображують можливі наробітки основного T_0 і двох резервних T_1 і T_2 пристроїв. Очевидно, що при ненавантаженому резервуванні (рис. 4.2, б) наробіток завжди більший, ніж при навантаженому резерві, а тому, за інших рівних умов ненавантажений резерв дає більший виграш в надійності, ніж навантажений.

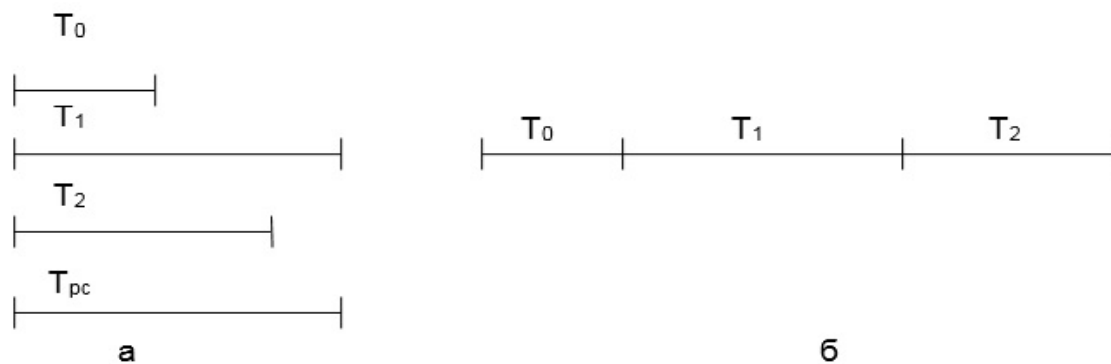


Рис. 4.2 Наробіток до відмови T_{pc} резервної системи, що складається з трьох пристроїв, при навантаженому (а) і ненавантаженому (б) резервах

Відмова резервованих систем, наведених на рис. 4.1, а, б настає лише тоді, коли відмовляють усі $L+1$ систем. Відмова резервованих систем, поданих на рис. 4.1, б, г, настає після відмови $L+1$ елементів, що належать до однієї з N резервних груп. Відмова системи при ковзаному резервуванні (рис. 4.1, д) настане лише тоді, коли кількість основних елементів, що відмовили, перевищить кількість резервних.

У підсистемах АСК ТП застосовується усі розглянуті схеми резервування. У системах автоматичного керування процесами харчової

технології здебільшого застосовують поелементне резервування заміщенням і ненавантаженим резервом (рис. 4.1, г).

4.1.3 Кратність резервування

Співвідношення між кількістю резервних і основних елементів називається **кратністю резервування**:

$$k = (n - r) / r, \quad (4.1)$$

де n – кількість однотипних елементів; r – кількість необхідних для функціонування системи працюючих елементів.

Зменшення k може бути цілим, якщо $r=1$, та дробовим, якщо $r>1$. В останньому випадку, яким би не вийшов дріб, скорочувати його не можна. Якщо, наприклад, $k=4/2$, то це означає, що застосоване резервування з дробовою кратністю, причому для нормальної роботи об'єкта потрібно не менше двох елементів, а кількість резервних дорівнює чотирьом. Якщо скоротити цей дріб і записати, що $k = 2$, це означатиме, що реалізоване резервування з цілою кратністю. Причому, кількість резервних елементів – два, а загальна кількість елементів з'єднання – три. Очевидно, що скорочення дробу змінило сутність резервування.

Приклад. Для живлення технологічного обладнання використовують п'ять генераторів, які працюють паралельно, причому любий з них витримує перевантаження в 25%.

При відмові будь-якого генератора та при нормальному навантаженні кожний з чотирьох справних генераторів матиме перевантаження в $100\% / 4 = 25\%$ і зможе виконувати свої функції, хоча і безвідмовності кожного зменшиться. При відмові ще одного генератора кожний з решти трьох буде мати перевантаження в $125\% / 3 + 25\% = 66,7\%$. На таке перевантаження генератори можуть бути не розраховані, а тому захисна апаратура вимкне їх. Якщо час відновлення дієздатності генератора невеликий, то резервний генератор скоро знову стане до роботи. Тому у розрахунках надійності розглянутої системи енергопостачання використане

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

резервування з дробовою кратністю $k = 1/4$. Тобто, для забезпечення її надійності достатньо мати чотири основних генератори та один резервний.

Структурне резервування пов'язане з додатковими витратами на резервні елементи. Вони повинні окупатися за рахунок збільшення надійності об'єкта і зниження на його технічне обслуговування.

Найпростіші показники ефективності резервування такі:

$$B_m = T_p/T; B_p = P_p/P; B_Q = Q/Q_p, \quad (4.2)$$

де B_m – коефіцієнт підвищення середнього наробітку до відмови резервованої системи T_p у порівнянні з наробітком нерезервованої T ; B_p , B_Q – відповідно коефіцієнти підвищення імовірності безвідмовної роботи P і зменшення імовірності відмови Q .

Резервування буде ефективним за умови, що B_m і B_p будуть більшими, а B_Q меншим за одиницю.

4.1.4 Оцінка надійності резервованих систем

4.1.4.1 Надійність послідовних систем

Послідовні системи у техніці складають більшість. Прикладом такої системи може бути привід будь-якого засобу механізації: (рис. 4.3.)



4.3

Приві

д засобу механізації (послідовна система): 1 – двигун; 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – запобіжна муфта; 5 – і-ий елемент системи; 6 – кінцевий (виконавчий) елемент системи

В послідовних системах відмова будь-якого зі складових елементів призводить до відмови всієї системи, а тому імовірність безвідмовної роботи системи в цьому випадку визначається множенням імовірностей безвідмовної роботи складових елементів:

$$P(t) = P_1(t) \cdot \dots \cdot P_2(t) \cdot P_i(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) \quad (4.3)$$

Якщо імовірність безвідмовної роботи всіх елементів однакова, то:

$$P(t) = P_i^n(t) \quad (4.4)$$

Отже, чим більша кількість складових елементів, тим надійність такої системи нижча. Наприклад, система з 10 послідовних елементів, імовірність безвідмовної роботи кожного з яких дорівнює 0,9, має загальну імовірність безвідмовної роботи: $P(t) = P_i^n(t) = 0,9^{10} = 0,35$, тобто дуже низьку.

Найчастіше імовірність безвідмовної роботи елементів досить висока, а тому буває простіше визначати її через імовірність відмов, використовуючи методи наближених обчислень:

$$P(t) = [1 - F_1(t)] \cdot [1 - F_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - F_i(t)] \cdot \dots \cdot [1 - F_n(t)] \approx 1 - \sum_{i=1}^n F_i(t), \quad (4.5)$$

тому що добутком двох малих величин можна знехтувати.

Приклад. Система складається з шести послідовних елементів з однаковою імовірністю безвідмовної роботи $P_i(t) = 0,99$. Визначити імовірність безвідмовної роботи системи.

$$F_i = 0,01 \quad ; \quad P(t) = 1 - n \cdot F_i(t) = 1 - 6 \cdot 0,01 = 0,94$$

4.1.4.2 Надійність паралельних систем

Для підвищення надійності складних відповідальних систем, де цього не вдається досягти за рахунок надійності складових елементів, застосовують резервування. Резервування, як метод підвищення надійності, часто зустрічається на практиці, особливо в системах, які забезпечують безпеку людей (наприклад, на транспорті, в енергетиці), або в системах, що працюють у безперервному режимі і відмова яких

може привести до відчутних втрат за рахунок якості і кількості вироблених продуктів чи товарів, оброблюваної сировини, або за рахунок побічних негативних ефектів. В харчовій промисловості це, наприклад, резервні лінії подачі технологічних рідин, резервні місткості, резервні елементи в засобах автоматизації, окремі ланки в лініях переробки продуктів і навіть повністю резервні технологічні лінії та цілі виробництва. Можна привести ряд інших відомих показових прикладів: використання в літаках 2-х – 4-х двигунів, кожний з яких здатний самостійно забезпечити політ, якщо інші двигуни не працюють; двох і багато кратно резервування системи гальмування транспортних засобів тощо. Використання запасних вузлів і деталей технічних об'єктів також може розглядатися як засіб резервування. Резервування дозволяє зменшити кількість відмов, але для того, щоб визначити в якій мірі, необхідно вміти виконувати спеціальні розрахунки. Такі розрахунки дозволяють не тільки визначити ступінь підвищення надійності, а й обґрунтувати рівень (кратність) резервування.

При постійному резервуванні з навантаженням («гарячим») резервом резервні елементи або ланцюги елементів підключають паралельно до основних (рис. 4.4). Імовірність відмови всієї системи визначається за теоремою множення імовірностей:

$$F(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_i(t) \cdot \dots \cdot F(t) \cdot \dots \cdot F(t) = \prod_1^n F_i(t), \quad (4.6)$$

де $F_i(t)$ - імовірність відмови i -го елемента.

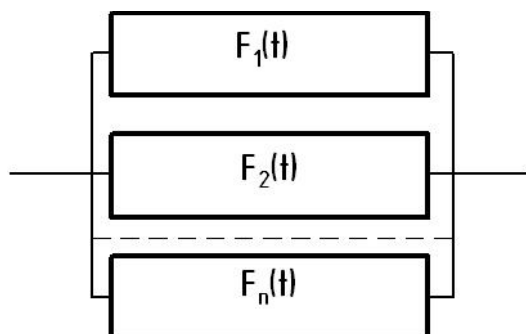


Рис. 4.4 Система з резервуванням

Тоді імовірність безвідмовної роботи системи буде

такою:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_1^n F_i(t) \quad (4.7)$$

Якщо елементи системи рівнозначні, то

$$F(t) = F_i^n(t), \text{ а } P(t) = 1 - F_i^n(t) \quad (4.8)$$

Ці залежності у загальному вигляді характеризують гаряче резервування. Наприклад, якщо при гарячому резервуванні $P_i(t) = 0,9$ і $n = 2$, тоді $P(t) = 1 - F_i^n(t) = 1 - 0,1^2 = 0,99$. А значить без відповідність системи підвищується.

Інші види резервування мають свої особливості, які впливають на розрахунки. При холодному резервуванні, тобто резервуванні заміщенням, резервні елементи вступають в дію тільки після відмови основних. Вмикання в дію резервних елементів може робитися автоматично або вручну, а ті елементи, що відновили, відновлюються або замінюються. У цьому випадку для основного експоненційного закону розподілу відмов (за високої надійності складових елементів) імовірність відмови системи дорівнює:

$$F(t) \approx \frac{\prod_{i=1}^n F_i(t)}{n!} \approx \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i \cdot t}{n!} = Q(t) \quad (4.9)$$

Для рівнозначних елементів:

$$F(t) \approx \frac{F_i^n(t)}{n!} \approx \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (4.10)$$

Формули (4.9, 4.10) справедливі за умови, що надійність вмикання резерву гарантується повністю.

Розглянемо надійність системи з резервуванням у період відновлення елемента, що відмовив. Такі періоди характерні і часто зустрічаються в роботі технологічних ліній, особливо тих, які працюють у безперервному режимі.

При інтенсивності відмов основного елементу λ і резервного λ_p та

середній тривалості ремонту $\bar{t}_p$ імовірність безвідмовної роботи системи можна розрахувати так:

$$P(t) = e^{\frac{-t}{T_0}}, \text{ де } T_0 = \frac{1}{\lambda} \left[1 + \frac{1}{(\lambda + \lambda_p) \cdot t_p} \right], \quad (4.11)$$

В технологічних лініях за резерв правлять також накопичувачі, які розділяють ці лінії на ділянки. Робота ліній на накопичувачі, або за їхній рахунок, дозволяє за період накопичення, тобто за час використання резерву, ліквідувати відмову на ділянках між накопичувачами. Безвідмовна робота лінії повністю забезпечується, якщо об'єму накопичувачів вистачає на період відновлення дієздатності ділянки, де відбулась відмова.

4.1.4.3 Надійність паралельних систем при «теплому» резервуванні

Прикладом такої системи може бути багатократна клинопасова передача, у якій декілька посів не повністю завантажені («тепле» резервування) і включаються в роботу тільки після руйнування деякої кількості робочих елементів.

Розрахунок, наведений нижче, прийнятий для резервування високонадійними елементами з експоненційним розподілом імовірності безвідмовної роботи.

Якщо інтенсивність відмови основного елемента λ і резервного, що працює в полегшеному режимі, λ_p то імовірність безвідмовної роботи системи при однократному резерві:

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p)}{2!} t; \quad (4.12)$$

при двохкратному:

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p) \cdot (\lambda + 2\lambda_p)}{3!} t; \quad (4.13)$$

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p) \cdot \dots \cdot (\lambda + n\lambda_p)}{(n+1)!} t$$

при n-кратному: (4.14)

4.1.4.4 Надійність комбінованих систем

Такі системи включають ділянки з послідовно і паралельно діючими складовими елементами. Якщо в системі, **a** елементів не дубльовані і **в** елементів дубльовані (рис. 4.5), то імовірність безвідмовної роботи системи визначають за формулою:

$$P(t) = P_a(t) \cdot P_v(t), \quad (4.15)$$

де $P_a(t)$ і $P_v(t)$ - відповідно, імовірність безвідмовної роботи ділянок з послідовно, і паралельно діючими елементами.

При послідовному з'єднанні елементів

$$P_a(t) = \prod_{i=1}^a P_i(t) \quad (4.16)$$

Для повного гарячого резервування:

$$P_v(t) = 1 - \prod_{j=1}^v F_j(t) \quad (4.17)$$

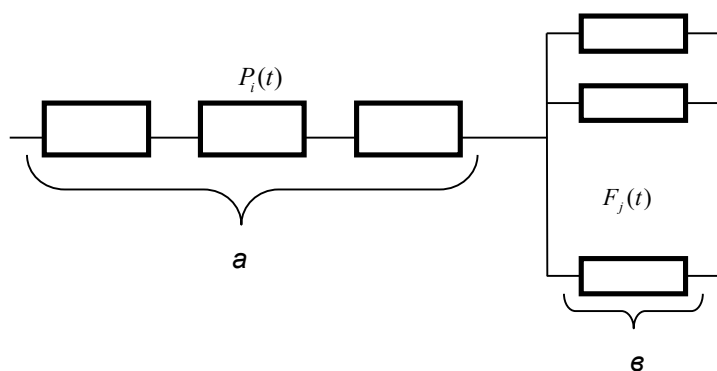


Рис. 4.5 Комбінована система з послідовним і паралельним поєднанням елементів

Для інших видів резервування надійність ділянок з діючими паралельно елементами в розраховуються методами, викладеними раніше.

В харчових виробництвах часто застосовують комбіновані системи, які в кінцевому рахунку не можуть бути віднесені ні до послідовних, ні до паралельних (складні комбіновані системи). Приклад такої системи можна зустріти в технологічній схемі цукрового виробництва, де інколи паралельні лінії перекачування технологічних рідин мають додаткову помпу, яка може, при необхідності, бути резервом для будь-якої лінії. Розглянемо такий випадок. Основна система (рис. 5.6) із елементів A, A_1 здубльована системою з елементів B, B_1 , для яких передбачений елемент C , що резервує елементи A і B .

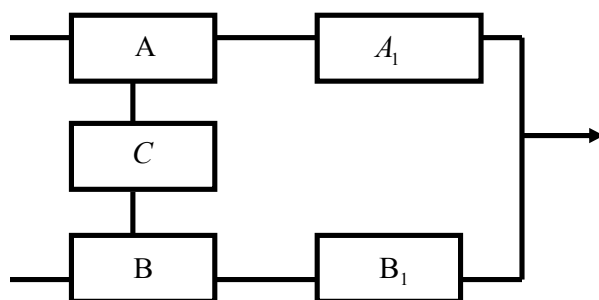


Рис. 4.6 Складна комбінована система

У розрахунках подібних складних систем використовується теорема Байєса, яка для визначення надійності формулюється так: імовірність відмови системи $F = F(C \text{ дієздатний}) P_c + F(C \text{ недієздатний}) F_c$, де P_c і F_c - відповідно, імовірності безвідмовної роботи і відмови резерву C .

Імовірність відмови системи при дієздатному резерві C визначають як добуток імовірностей відмови елементів A_1 і B_1 :

$$F(C \text{ дієздатний}) = F_{A_1} \cdot F_{B_1} = (1 - P_{A_1}) \cdot (1 - P_{B_1}) \quad (4.18)$$

Імовірність відмови системи при недієздатному резерві C :

$$F(C \text{ недієздатний}) = F_{AA_1} \cdot F_{BB_1} = (1 - P_A \cdot P_{A_1}) \cdot (1 - P_B \cdot P_{B_1}) \quad (4.19)$$

Тоді, у загальному вигляді, імовірність відмови такої складної системи може бути розрахована так:

$$F = (1 - P_{A_1}) \cdot (1 - P_{B_1}) \cdot P_c + (1 - P_A \cdot P_{A_1}) \cdot (1 - P_B \cdot P_{B_1}) \cdot F_c \quad (4.20)$$

Цей метод дозволяє обчислювати надійність комбінованих ділянок, що в складних системах можуть повторюватись багатократно.

4.2 Технологічні аспекти надійності систем

4.2.1 Технологічні відмови

Залежність показників надійності від рівня технологічного процесу можна зобразити такою схемою (рис. 4.7).

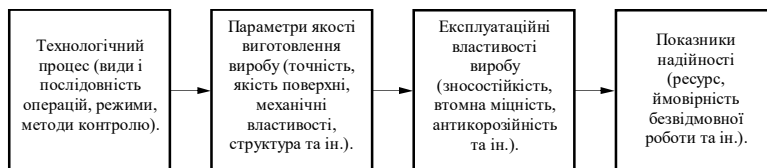


Рис. 4.7 *Схема залежності показників надійності від рівня технологічного процесу*

Всі компоненти технологічного процесу - метод оброблювання і застосовуване обладнання, послідовність операцій, режими оброблювання, методи контролю - визначають його вихідні параметри і, в першу чергу, показники якості виробу, вказані конструктором в ТУ: його точність, якість поверхні, механічні властивості тощо.

Дані відмови виробу пов'язані із технологією його виготовлення, оскільки вона визначає рівень якості та всі його властивості. Однак частина відмов належить до недопустимих, коли характер відмови або швидкість пошкодження не відповідає встановленим вимогам. Такі відмови є наслідком недосконалості технологічного процесу, його невідповідності потрібному рівню надійності. Класифікація причин, що викликають недопустимі відмови через технологію виготовлення, наведена на рис. 4.8.

Перша група причин пов'язана із необґрунтованістю технічних умов

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

на параметри виробу та на допуски його елементів, із недосконалістю прийнятої технологічної документації, із недоліками методів дослідження на надійність готового виробу та його механізмів.

Технічні умови на виріб повинні відображати основні вимоги надійності.

Технологічний процес визначає геометричні та фізико-хімічні параметри поверхневого шару - шорсткість поверхні, її топографію, твердість, залишкові напруження, структуру та інші показники. Вони, у свою чергу, обумовлюють експлуатаційні властивості виробів - зносостійкість та втомну міцність.

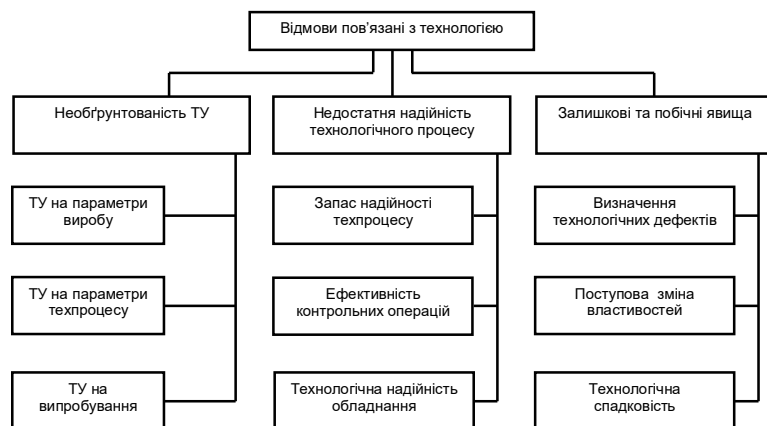


Рис. 4.8 Класифікація відмов, пов'язаних із недосконалістю технологічних процесів

Друга група причин, що призводить до недопустимих відмов через технологію, викликана недостатньою надійністю самого технологічного процесу, який є складною динамічною системою із великою кількістю взаємозв'язків і характеризується багатьма вихідними параметрами.

Щоб забезпечити випуск якісної та надійної продукції, ця система сама повинна бути надійною, що залежить від ступеня досконалості технологічного процесу, його стабільності, методів контролю та інших чинників.

Третя група причин виникнення недопустимих відмов пов'язана із

залишковими та побічними явищами, що породжені технологічним процесом. Сучасні технологічні процеси виготовлення виробів, починаючи від оброблювання заготовок і закінчуючи фінішними операціями, супроводжуються, як правило, значними силовими та температурними впливами на деталь при високих вимогах до точності та продуктивності процесу. Затрати енергії, необхідні для технологічного процесу, викликають цілу низку побічних явищ, які змінюють властивості виробів, створюють в них залишкові напруження, спотворюють структуру матеріалів, призводять, до появи найрізноманітніших дефектів.

4.2.2 Вплив експлуатаційних факторів на надійність

4.2.2.1 Вплив параметрів технологічного процесу виготовлення на зносостійкість поверхонь

Показники якості виготовлення виробів, як наслідки прийнятого технологічного процесу, безпосередньо впливають на таку експлуатаційну властивість, як зносостійкість поверхні. По-перше, на неї впливає хімічний склад, структура та механічні характеристики матеріалів, які залежать від металургійних або інших процесів одержання матеріалів, від виду оброблення (термічного чи термо-хімічного). По-друге, зносостійкість залежить від геометричних і фізико-хімічних параметрів поверхневого шару. Відхилення форми деталей збільшують період макроприпрацювання, а шорсткість поверхні впливає на період мікроприпрацювання, оскільки під час нормального зношування встановлюється оптимальна шорсткість, що відповідає даним умовам роботи спряження.

Треба мати на увазі, що зв'язки між технологічними та експлуатаційними параметрами мають стохастичну природу через розсіювання складових матеріалу, розташування деталі під час оброблювання, жорсткість технологічної системи та інші причини, які

визначають точність та стабільність оброблювання.

Наприклад, для багатьох видів зношування поверхонь параметром виробу, що впливає на швидкість зношування γ , буде твердість матеріалу $X=H_b$, вони пов'язані залежністю $\gamma=kH_b$, де k -коефіцієнт, що залежить від матеріалу та умов зношування.

Розсіювання значень твердості матеріалу приводить до відповідного розсіювання швидкостей зношування, а виріб із низькими значеннями H_b буде мати недопустимо високу швидкість зношування γ_n , що може призвести до передчасної відмови.

4.2.2.2 Вплив параметрів технологічного процесу оброблювання на втомну міцність та корозійну стійкість деталей

На втомну міцність впливають як характеристики матеріалу, так і стан його поверхневих шарів та наявність дефектів. Наприклад, розтягувальні залишкові напруження що виникають у поверхневому шарі під час механічного оброблювання, зазвичай знижують межу витривалості, стискальні, навпаки, можуть покращити характеристики витривалості. Цей вплив особливо помітний на деталях, що працюють при знакозмінних навантаженнях та високих температурах. Тому для них важливо вибрати оптимальний технологічний процес оброблювання, який забезпечить необхідні параметри поверхневого шару.

Відомо, що параметри шорсткості поверхні мають суттєвий вплив на опір втоми. В цілому, межа втоми підвищується із покращенням властивостей поверхневого шару. Крім того, на ці параметри впливає напрям слідів оброблювання: якщо вони збігаються із дією головного напруження, межа втоми є вищою. Фінішне оброблювання поверхні, яка в основному визначає конфігурацію мікроскопічних рисок і механічні властивості поверхонь, призводить до розсіювання початкових параметрів виробів що обумовлено їх суттєвою залежністю від режимів

оброблювання.

Складніші технологічні завдання виникають, якщо застосовуються покриття, що, окрім корозійної стійкості, повинні бути зносостійкими або забезпечувати опір втомному руйнуванню.

Інтенсивні корозійні руйнування є характерними для виробів, що працюють в рідких середовищах, які викликають електрохімічну корозію. Особливо небезпечний вид руйнування - корозійне розтріскування - виникає під час одночасного впливу корозійного середовища і статичних або повторно-статичних навантажень. При цьому властивості металу, що визначають його сприйняття до корозійного впливу середовища, безпосередньо пов'язані із параметрами технологічного процесу,

Технологічні операції, що застосовують під час виготовлення виробу можуть суттєво знизити початкову термодинамічну та електрохімічну стійкість металу внаслідок неоднорідності його структури, пружно-пластичного стану, зміни фізичних та інших властивостей. Наприклад, для зварних з'єднань і конструкцій визначальними є теплофізичні і хіміко-металургійні впливи зварювання. Як показали дослідження доктора технічних наук О.І. Стеклова, різниця в швидкостях корозійного розтріскування пов'язана із характеристикою полів залишкових пружно-пластичних деформацій і власною потенційною енергією, що притаманні кожному способів зварювання.

Визначальний вплив на інтенсивність розтріскування має отримання якісного зварного з'єднання без дефектів шва. Корозійному розтріскуванню можна запобігти зняттям залишкових напружень, наприклад, механічним деформуванням.

4.3 Формування властивостей матеріалу виробів при їх виготовленні

Переважає більшість деталей для додання необхідних розмірів,

форми і якості поверхні піддаються механічній обробці. При цьому фізичний стан, зносо- і корозійна стійкість, втомна міцність й інші експлуатаційні властивості деталей машин визначаються умовами здійснення процесу обробки.

Процес обробки металів і сплавів - складний фізичний процес, який супроводжується низкою взаємодіючих явищ, до яких відносяться: пружна й пластична деформація, утворення наросту на інструменті, підвищення твердості (наклеп) і зміна структури поверхневого шару матеріалу заготовки та ін.

Взаємозв'язок і взаємодія цих явищ ускладнюється тим, що тиск стружки на передню поверхню інструмента при обробці доходить до 1000-2000 МПа, а температура досягає 1000-1200 °С.

4.3.1 Фізико-механічні фактори впливу

4.3.1.1 Обробка металевим інструментом

Обробка деталей машин металевим інструментом не завжди є остаточною операцією, однак вплив інструменту у процесі утворення поверхневого шару стає вирішальним у формуванні фізико-механічних властивостей поверхонь деталей.

Фізичні процеси, які протікають у зоні стружкоутворення, впливають на фізико-механічні властивості оброблених поверхонь. Знання цих процесів дозволяє зрозуміти й пояснити вплив методу й режимів різання на стан і зміну самих різних властивостей поверхневого шару деталей машин; керувати утворенням поверхонь й одержувати потрібні фізико-механічні властивості, а також необхідну мікрогеометрію, тобто забезпечує потрібну якість поверхні деталей машин.

В процесі різання металевим інструментом перед ріжучим лезом утворюється випереджальна зона деформації. Пластична деформація матеріалу, який перетворюється в стружку, поширюється поперед різця і

під різцем. Зняття стружки відбувається завжди зі зміцненого матеріалу в результаті поширення хвилі деформації поперед ріжучого леза.

Початкова межа стружкоутворення відповідає переходу пружно напруженого шару, що зрізається, у пластичну зону. При високих швидкостях різання зона випереджальних деформацій зменшується і поперед ріжучого леза утворюється теплове поле. Утворення теплового поля обумовлено деформаціями у випереджальній зоні.

При швидкостях різання більше 100 м/хв установлена наявність випереджальної зони деформації, що поширюється до декількох міліметрів, тобто до величини, що грає велику роль у процесі різання. Зі збільшенням швидкості деформування (різання) розміри зони випереджальної деформації зменшуються у зв'язку з різницею між швидкістю поширення хвиль пластичної деформації і швидкістю деформування. Для відпаленої сталі швидкість поширення пластичної деформації - 19-46 м/с, невідпаленої - 19-38 м/с.

У результаті поширення поперед ріжучого леза хвиль напружень відбуваються певні зміни фізико-механічних властивостей шару, що перебуває в зоні дії пластичної деформації, однак фізичні зміни не обмежуються цією зоною. Область пружньопластичних деформацій також відрізняється по своїх фізико-механічних властивостях від властивостей основного металу.

У результаті пружної деформації відбувається спотворення кристалічної ґратки, внаслідок чого атоми зовнішнього середовища, що адсорбуються на металевій поверхні, проникають у ґратку матеріалу, що деформується. Це супроводжується зменшенням опору пластичній деформації при руйнуванні, тобто полегшує саморуйнування матеріалу. Поряд із цим концентрація напружень, обумовлена мікро- і макроскопічними тріщинами, супроводжується розкриттям ультрамікроскопічних тріщин і процесом адсорбування молекул

навколишнього середовища на поверхні тріщин, що розкриваються. Цей процес полегшує подальше руйнування матеріалу (*внутрішній ефект Ребіндера*).

У певних умовах пружна деформація значно впливає на процес руйнування (і різання) ще й по наступних причинах. Зародкові мікротріщини мають здатність до розвитку в процесі деформації твердого тіла. В області пружних деформацій під впливом деформуючих зусиль відбувається розкриття цих мікротріщин. Даний процес також полегшує подальше руйнування матеріалу.

4.3.1.2 Обробка абразивним інструментом

Шліфування деталей у багатьох випадках є остаточною операцією.

До особливостей процесу шліфування відносяться: негативний передній кут більшості зерен; участь у процесі різання приймають 15-20 % зерен; 80-85 % зерен пластично деформують дуже тонкий поверхневий шар. При цьому більша частина енергії при шліфуванні затрачається на пластичну деформацію поверхні.

При шліфуванні спостерігаються два основних процеси.

При першому процесі невелика група зерен ріже метал. Утворення стружки відбувається в важких умовах через великий ступінь її пластичної деформації, яка обумовлена негативною геометрією зерен і незначним об'ємом шару, що зрізається. Це впливає на фізико-механічні властивості поверхневого шару.

Другий процес характеризується тим, що більша по чисельності група зерен у результаті поверхневої пластичної деформації сприяє покращенню фізико-механічних властивостей поверхневого шару оброблюваних заготовок. Здійснюється це головним чином у результаті наклепу і усунення структурних концентраторів напружень, що утворилися в процесі різання металевим інструментом і навіть

мікроруйнувань.

Процес різання при шліфуванні супроводжується численними мікроударами абразивних зерен об оброблювану поверхню. У результаті динамічної дії абразивних зерен виникає величезна кількість температурних спалахів. Миттєві місцеві температури впливають на процес різання при шліфуванні, утворення поверхневого шару і його фізико-механічні властивості. Стружка при цьому може нагріватися до температури плавлення.

Під впливом високих миттєвих температур у тонкому поверхневому шарі відбуваються структурні й фазові перетворення, які приводять до виникнення залишкових напружень.

Зношування шліфувального круга впливає на властивості поверхневого шару оброблюваної заготовки. У процесі зношування круга змінюються величина й знак залишкових напружень, мікротвердість, точність обробки, втомна міцність і зносостійкість поверхневого шару деталі. У різних мікронах міняється не тільки величина, але й знак залишкових напружень.

При затупленні круга зростають температурні спалахи, що супроводжуються високими локальними температурами. При цьому різко знижуються експлуатаційні характеристики поверхонь деталей.

Шліфувальний перегрів - ділянка поверхні, на якій під впливом високої температури відбувається зміна структури поверхневого шару. У зоні перегріву змінюються мікротвердість, зносостійкість й інші характеристики поверхні. Великий вплив на появу перегрівів має фізичний стан круга, час його роботи після виправлення, якість виправлення і ін.

На поверхні сталей деталей перегріви проявляються у вигляді плям різної величини, що виділяються кольорами мінливості. Кольори мінливості - результат утворення плівки оксиду незначної товщини

(десятитисячні долі мікрометра). Глибина поширення перегріву в товщину металу, тобто глибина дефектного шару зі зміненою структурою, а також інтенсивність структурних перетворень залежать від ступеня перегріву. При невеликому ступені перегріву дефектний метал можна видалити в процесі наступного шліфування. Значний ступінь перегріву супроводжується утворенням дефектної зони в поверхневому шарі і появою шліфувальних тріщин. Шліфувальна тріщина - це руйнування поверхневого шару на надмірно нагрітих ділянках, що граничать із зоною холодного металу. Миттєве нагрівання невеликої ділянки до високих температур і наступний швидкий відвід тепла в товщу металу супроводжується утворенням на поверхні високих температурних напружень, пов'язаних з об'ємними змінами металу. Коли величина розтягуючих напружень перевищить межу міцності металу на розтяг, відбувається руйнування поверхні - утворення шліфувальної тріщини.

4.3.1.3 Зміцнення (наклеп) у поверхневому шарі

При обробці різанням під дією зусиль, прикладених до металу поверхневого шару, виникає пластична деформація, що супроводжується подрібненням і витягуванням кристалічних зерен у напрямку деформації (утворення текстури), скривленням площин ковзання й появою на них уламків кристалічних зерен, виникненням міжкристалічних напружень, спотворенням кристалічних ґраток. При цьому збільшується питомий об'єм; підвищується міцність, твердість і крихкість матеріалу; зменшується пластичність і в'язкість; змінюються магнітні й інші характеристики.

Зміцнення (наклеп) металу поверхневого шару деталей характеризується його мікротвердістю й рентгенографічними показниками (розширенням або розмиттям інтерференційних ліній), що свідчить про дроблення кристалічних блоків, зростання спотворення

кристалічних ґраток і збільшення густини дислокацій.

Наклеп металу поверхневого шару розвивається під дією сил у зоні різання. Інтенсивність і глибина поширення наклепу зростають зі збільшенням сил і тривалості їх впливу.

При механічній обробці діють два процеси, які знаходяться в протидії: наклеп в результаті зусиль, що виникають при механічній обробці, і зняття наклепу в результаті теплового ефекту пластичного деформування. Ступінь впливу кожного із цих процесів залежить від умов обробки. У результаті теплового ефекту, залежно від виникаючої температури, може спостерігатися і підвищення твердості обробленої поверхні. Твердість у цьому випадку підвищується в результаті повного або неповного загартування. При високій температурі нагрівання і значній тривалості впливу теплового поля відпочинок (возврат) може повністю зняти наклеп металу поверхневого шару, що виник у результаті механічної обробки.

Процес відпочинку при кімнатній температурі протікає досить повільно й може бути прискорений у результаті значного підвищення температури. Пружна деформація також сприяє відпочинку. Наклеп - явище зворотне, тобто можливо більш-менш значне зняття наклепу або навіть повне відновлення вихідного стану поверхневого шару. Однак для цього необхідне нагрівання до високих температур. Так, повне зняття наклепу має місце тільки при температурі рекристалізації, рівної приблизно 0,4 від абсолютного значення температури плавлення металу.

Практичний інтерес являє собою проблема залежності збереження фізико-механічних властивостей поверхневого шару, отриманих у результаті наклепу, від часу, тобто від терміну експлуатації деталі. Установлено, що ці властивості, зокрема залишкові напруження стиску, що характеризують наявність наклепу, зберігаються без змін тривалий

час. Наприклад, випробування залізничних осей показали, що стискаючі залишкові напруження практично не змінюються в інтервалі 500 млн циклів. При переході на експлуатаційні показники це відповідає пробігу приблизно 1 560 000 км або дорівнює 26 рокам нормального терміну служби осей. Величина залишкових напружень за цей період зменшилася на 10%.

Оптимальний режим наклепу встановлюється залежно від умов експлуатації деталі. При надмірному наклепі відбувається *перенаклеп*, що супроводжується знеміцненням металу. Перенаклеп викликається вичерпанням здатності кристалічних ґраток зміцнюватися. Перенаклеп - явище незворотне, тобто первісні властивості металу термообробкою не відновлюються.

Після механічної обробки спостерігається нерівномірний наклеп на поверхні деталі. Це пов'язано з тим, що при обробці виступи мікрорельєфу наклепуються більше, ніж впадини.

Нерівномірність наклепу характеризується різним ступенем і глибиною наклепу, його градієнтом.

Ступінь наклепу - відношення твердості наклепаного шару до твердості ненаклепаного металу:

$$U_H = \frac{H_{\text{макс}} - H_{\text{вих}}}{H_{\text{вих}}} \cdot 100\% , \quad (4.21)$$

де $H_{\text{макс}}$ - твердість наклепаного шару, МПа; $H_{\text{вих}}$ - твердість основного ненаклепаного металу, МПа.

Глибина наклепаного шару - h_H , мм, характеризує розміри пластично деформованого поверхневого шару в результаті його обробки.

Градієнт наклепу, МПа/мм:

$$U_{\text{гр}} = \frac{H_{\text{макс}} - H_{\text{вих}}}{h_H} . \quad (4.22)$$

Кінцевий стан металу поверхневого шару визначається співвідношенням швидкостей протікання процесів зміцнення й знеміцнення, що залежать від переваги дії в зоні різання силового або теплового факторів.

Ступінь і глибина наклепу змінюються залежно від методу обробки; фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, зокрема від твердості; параметрів режиму обробки; геометрії різального інструменту і інших умов обробки.

Зі збільшенням твердості оброблюваного матеріалу зменшується об'єм пластичної деформованого металу при обробці, а отже, зменшується глибина й ступінь наклепу. Зниження твердості оброблюваного металу супроводжується зворотним явищем. Однак наклеп поверхневого шару при обробці різанням металевим інструментом спостерігається навіть при обробці загартованих сталей, що мають твердість HRC 50-55.

Режими обробки, зокрема зміна параметрів режиму обробки, що викликає збільшення зусилля різання і пластичної деформації, підвищує ступінь наклепу. Ріст тривалості впливу зусиль різання на метал приводить до збільшення глибини поширення наклепу.

Зміна параметра режиму обробки, що приводить до росту температури в зоні різання і тривалості теплового впливу інструмента на метал, підсилює інтенсивність відпочинку, що знімає наклеп.

На практиці картина утворення наклепу під впливом параметрів режиму обробки значно ускладнюється дією сил тертя, зміною умов відводу тепла із зони різання, структурними змінами металу й деякими іншими явищами, що важко піддаються попередньому врахуванню і які спотворюють окремі закономірності виникнення наклепу.

При точінні наклеп поверхневого шару підвищується при збільшенні подачі S і глибини різання t . Аналогічний вплив на утворення наклепу

має й збільшення радіуса кривизни вершини різця r (рис. 4.8).

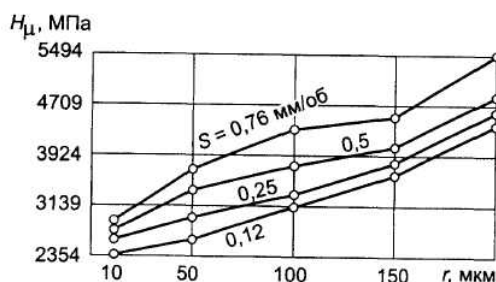


Рис. 4.8 Вплив подачі S і радіуса r заокруглення різця на мікротвердість H_{μ} поверхні при точінні

У всіх зазначених випадках збільшення наклепу пов'язане з посиленням ступеня пластичної деформації у зв'язку з ростом зусиль різання.

Вплив швидкості різання V визначається зміною теплової дії й тривалістю впливу сил і нагрівання на метал поверхневого шару. Для металів, що не зазнають при різанні структурних перетворень, при підвищенні швидкості різання відбувається зниження наклепу внаслідок скорочення тривалості впливу деформуючих сил на метал і підвищення температури в зоні різання (рис. 4.9).

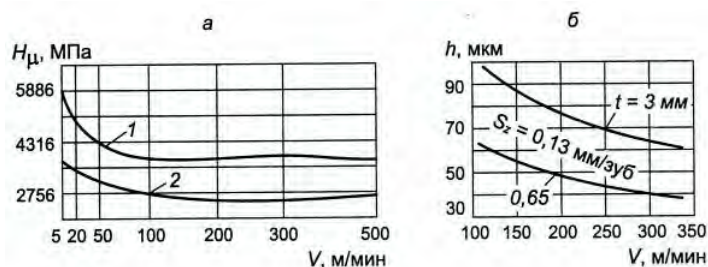


Рис. 4.9 Вплив швидкості різання V на зміцнення сталей, які не зазнають структурних змін, при точінні (а) і фрезеруванні (б): 1 - сталь 30 ХГС; 2 - сталь 20

При обробці сталей, які зазнають структурних змін при збільшенні швидкості різання, підвищення температури сприяє поверхневому загартуванню матеріалу оброблюваної деталі. У цьому випадку зміцнення поверхневого шару зв'язано не з наклепом металу, а з його

структурними змінами (рис. 4.10).

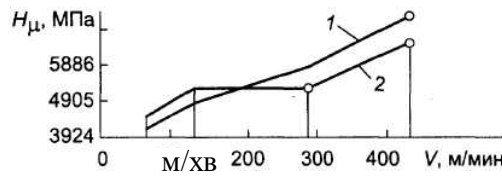


Рис. 4.10 Вплив швидкості різання V на зміцнення сталей, що зазнають структурних змін: 1 - сталь В10; 2 - сталь 25ХНВ

Зміна величини переднього кута γ у межах його позитивних значень не робить істотного впливу на глибину й ступінь наклепу. Обробка різальним інструментом з негативним переднім кутом приводить до збільшення глибини наклепу і у меншій мірі - поверхневої мікротвердості (рис. 4.11).

Збільшення заднього кута α від 0 до 8° викликає значне зниження глибини наклепу й поверхневої мікротвердості. Подальше збільшення заднього кута не впливає на ці характеристики.

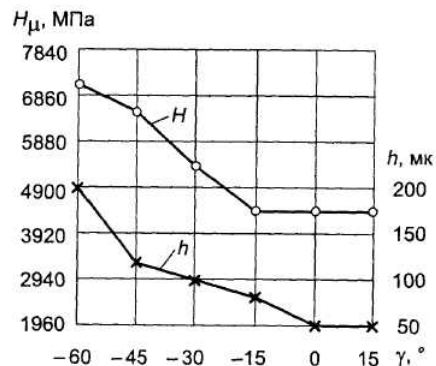


Рис. 4.11 Вплив переднього кута γ різця на мікротвердість H_μ і глибину наклепу h

Загальні закономірності утворення наклепу зберігаються і при абразивній обробці. Наклеп зростає при збільшенні навантаження на абразивне зерно, що пов'язано зі збільшенням глибини шліфування, частоти обертання виробу (або поздовжньої подачі стола при плоскому

шліфуванні), а також розміру і радіуса округлення зерен. При підвищенні частоти обертання круга навантаження на абразивне зерно зменшується, а кількість теплоти, що виділяється в зоні шліфування і знімає наклеп, збільшується. Зміцнення поверхневого шару при цьому зменшується.

Із збільшенням числа ходів виходжування у зв'язку із тривалим тертям абразивних зерен об оброблювану поверхню, виникає пластична деформація поверхневого шару і наклеп зростає.

При доведенні різними методами також відбувається наклеп матеріалу поверхневого шару, особливо значний при доведенні в режимі полірування.

Хонінгування загартованої сталі в режимі різання - самозагострювання підвищує мікротвердість поверхневого шару сталі на 20- 30 % при глибині поширення наклепу 5-10 мкм.

При однаковій мікрогеометрії поверхневого шару застосування різних методів остаточної обробки супроводжується утворенням у поверхневому шарі різних структур. Розходження в структурі викликається різними умовами пластичного деформування в зоні різання, тобто різними

Таблиця 4.1

Характеристики наклепу залежно від методу обробки

Вид обробки	Характеристики наклепу	
	Ступінь U_n , %	Глибина h , мкм
Точіння	120-150	30-50
Тонке точіння	140-180	20-60
Фрезерування торцеве	140-160	40-100
Фрезерування циліндричне	120-140	40-80
Свердління	160-170	180-200

Розвертування	2-5	До 300
Протягування	150-200	120-150
Шліфування	140-160	30-60
Притирка	110-120	3-7

тисками і температурами, що виникають у процесі обробки при тому або іншому методі утворення поверхневого шару. Наприклад, при чистовому шліфуванні температура поверхневого шару в зоні контакту з абразивом може перевищувати 600 °С, а на глибині 6 мкм – 200 °С.

Значення характеристик наклепу при різних методах обробки наведені в табл. 4.1.

4.3.2 Зміна залишкових напружень при реалізації технологій обробки

Залишковими називаються такі напруження, які зберігаються в тілі після зняття зовнішнього навантаження. Основна причина виникнення залишкових напружень у деталях - неоднорідність залишкових лінійних й об'ємних змін їхнього матеріалу. Зміни в матеріалі викликаються технологічними процесами виготовлення деталей. До числа цих процесів відносяться: лиття, обробка тиском, механічна, термічна й хіміко-термічна обробка й ін.

Залишкові напруження в ряді випадків досягають настільки високих значень, що в результаті їхньої дії спостерігаються аварійні руйнування окремих деталей і навіть цілих конструкцій. У літературі, присвяченій залишковим напруженням, приводяться випадки такого роду аварій.

Балка довжиною 12 м самовільно без усякого навантаження тріснула по всій довжині на заводі, де була виготовлена. Перед тим ця балка була розрізана газовим різанням по двох косих напрямках. Потім вона перебувала в цеху в горизонтальному положенні. Злам відбувся в

стілці по всій довжині й супроводжувався шумом, що нагадував вибух. Поверхня зламу мала грубошорсткий, сильно зазубрений вид. Основною причиною зламу, як це було встановлено, були залишкові напруження, що виникли при прокатці.

Відомі випадки руйнування мостів, які пройшли випробувальне навантаження і які тривалий час знаходилися в експлуатації. Руйнування викликалися головним чином залишковими напруженнями. В 1938 р. відбулося руйнування моста в м. Рюдерсдорф. Аварія відбулася в той час, коли міст перебував у ненавантаженому стані.

У грудні 1942 р. у м. Далют, у судні, що перебувало на стапелях, тобто коли не могло мати місце яке-небудь навантаження, відбулося утворення поперечної тріщини довжиною в кілька метрів в обшивці поперечно-армованого суцільнозварного танкера. Ніякого зварювання під час аварії на ушкоджених місцях обшивки, ні поблизу від них, не проводилося ні під час аварії, ні за кілька днів до неї.

Спостерігалися випадки утворення тріщин значної довжини на нових побудованих суднах, що перебували ще на стапелях. У багатьох подібних випадках основною причиною утворення тріщин були залишкові напруження, що призводили до аварії суден і в умовах незначного навантаження.

Залишкові напруження класифікуються за ознаками розмірів силового поля і по фізичній сутності.

Залежно від об'єму поширення або зони впливу розрізняють залишкові напруження трьох родів (*по Давиденкову*):

- першого роду, або макронапруження, які урівноважуються в об'ємі всього тіла. Ці напруження виникають головним чином у результаті технологічних процесів, які використовуються при виготовленні деталей;
- другого роду, або мікронапруження, які урівноважуються в об'ємі зерна (кристаліта) або декількох блоків (субзерен). Дані напруження виникають

у процесі фазових перетворень і деформації металу, коли різні кристаліти і блоки усередині них опиняються в різному пружно-деформованому стані;

- третього роду, або субмікронапруження, що локалізуються в об'ємі кристалічного осередку, є результатом статичного спотворення ґратки, за рахунок зміщення атомів на долі нанометрів з вузлів кристалічної ґратки.

Всі види напружень взаємопов'язані між собою і, наприклад, ріст мікронапружень другого роду викликає утворення макронапружень першого роду.

При оцінці впливу залишкових напружень на експлуатаційні властивості деталей машин враховується, головним чином, дія макронапружень. Вплив субмікронапружень досліджений недостатньо, тому що невідомий нормальний рівень цих напружень і його взаємозв'язок з технологічними факторами. Сам розподіл субмікронапружень підкоряється статистичним закономірностям.

При вивченні процесів утворення залишкових напружень технологів із практичної точки зору доцільніше користуватися класифікацією залишкових напружень по фізичній сутності або по причинах, що викликають ці напруження.

Залежно від причин появи залишкові напруження підрозділяються на:

- силові - напруження, що виникають у результаті впливу на деталь зовнішньої сили, наприклад при механічній обробці;

- теплові — напруження, які утворюються в результаті різниці температур по об'єму деталі, наприклад при литті, обробці тиском, термічній обробці і т.п.;

- структурні - напруження, що виникають у результаті зміни структури матеріалу деталі, наприклад, при загартуванні;

• дифузійні - напруження, що утворюються в умовах зміни питомих об'ємів суміжних зон металу, внаслідок їхнього дифузійного насичення, наприклад, при хіміко-термічній обробці.

Залишкові напруження якісно підрозділяються на розтягуючі - σ_+ і стискуючі - σ_- .

У деяких випадках внутрішні залишкові напруження створюються спеціально для покращення якісних характеристик виробу (поверхневий наклеп, загартування, хіміко-термічна обробка), а при литті, зварюванні, механічній обробці виникають залишкові напруження які, навпаки, знижують стабільність виробу, внаслідок чого знижується якість продукції. У загальному випадку наявність залишкових напружень у матеріалі деталі небажано. Це пов'язано з тим, що при їх сумуванні з напруженнями, що виникають від зовнішнього навантаження при експлуатації виробу, можливе передчасне руйнування.

Виникнення і перерозподіл залишкових напружень завжди пов'язані з деформацією деталі або конструкції, що у загальному випадку визначається зміною взаємного розташування матеріальних точок усередині або на поверхні виробу.

Нижче розглянуті різні технологічні процеси, при реалізації яких виникають залишкові напруження, а також технологічні методи зниження останніх.

4.3.2.1 Лиття

На величину і характер розподілу залишкових напружень при литті впливають: нерівномірне охолодження виливків; опір форми усадці металу; різниця в коефіцієнтах температурного розширення різних частин вилівка. Рівномірність охолодження у формі залежить від конфігурації заготовки і складу металу. Основне значення має не абсолютна величина температур у різних точках, а характер їх зміни.

Крім того, при литті заготовок складної форми на утворення тимчасових напружень впливає опір деформації ливарної форми і стрижнів, що перебувають у внутрішніх порожнинах, тому що різні ділянки виливка мають різні механічні властивості і виникають сили опору стрижнів усадці металу, які створюють нерівномірний напружений стан.

Самим відповідальним моментом у ливарному виробництві є охолодження виливків у формі: у випадку нерівномірного розподілу температури по об'єму виливків виникають залишкові напруження.

Напруження в основному залежать від швидкості охолодження і температури, з якої починається охолодження, а саме: різке збільшення напружень відбувається при $t > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Збільшення швидкості охолодження також сприяє збільшенню внутрішніх напружень. Так, наприклад, при максимальній швидкості охолодження у воді виникають напруження в десятки разів більші, ніж напруження при охолодженні на повітрі, а при охолодженні в печі напруження практично дорівнюють нулю. Неправильний вибір режиму охолодження на повітрі може викликати короблення заготовки, появу «гарячих» або «холодних» тріщин. Охолодження при температурах нижче $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ надає металу високі пластичність і міцність.

Найбільший вплив на утворення залишкових напружень швидкість охолодження має при переході металу із пластичного в пружний стан (для чавуну температурний діапазон $400\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$), а при температурах нижче і вище цього інтервалу вона позначається мало. На практиці охолодження металу відбувається повільно і напруження, викликані структурною неоднорідністю, мало впливають на загальний рівень напружень і, як правило, знімаються за рахунок релаксації.

Ливарні залишкові напруження знижуються покращенням технологічності конструкції виливка (створення плавного переходу

перерізів), природним, термічним, деформаційним і вібраційним старінням.

У результаті механічної обробки литої заготовки рівновага залишкових напружень порушується, і заготовка починає деформуватися. Процес деформації відбувається поступово. Якщо чистові операції механічної обробки виконуються відразу ж після чорнових, то з часом готова деталь втрачає необхідну точність.

Традиційними, такими що виправдали себе на практиці способами термостабілізації є *природне старіння при змінній температурі, відпал, відпуск і обробка холодом*. Ці способи одержали широке поширення через їх доступність і порівняльну простоту виконання.

Перевага *природного старіння* в порівнянні з термічним полягає в тому, що при цьому методі зменшення залишкових напружень не погіршуються механічні властивості матеріалу, як, наприклад, при відпалі. Релаксаційні процеси інтенсивно протікають тільки в місцях концентрації залишкових напружень. Це підвищує опір матеріалу пластичним деформаціям і не тільки стабілізує розміри заготовок, але і значно зменшує небезпеку виникнення їх короблення від дії навантажень при обробці і транспортуванні.

При природному старінні заготовки залишаються чистими, без окалини. Тримісячне природне старіння рівноцінне низькотемпературному відпалу при температурі 350-380 °С.

Широке поширення в промисловості для зняття залишкових напружень знайшов низькотемпературний відпал (температура відпалу 200-700 °С).

При *деформаційному старінні* до виливка підводиться механічна енергія, що сприяє стабілізації форми виробу. Деформація заготовок при цьому виді старіння досягається за допомогою статичних або циклічних навантажень. При статичному навантаженні напруження, що виникають

у заготовці, викликають пластичну деформацію. У результаті виникнення останньої зменшуються вихідні напруження.

При *вібраційному старінні* за короткі проміжки часу створюється безліч циклів навантаження на заданих і контрольованих потужностях і частотах, що забезпечує завершення стабілізації протягом декількох секунд.

Вібраційне старіння є високопродуктивним методом зниження залишкових напружень. Даний метод придатний для литих, кованих (штампованих), зварних і гарячекатаних заготовок; чорних і кольорових металів. При цьому параметри точності, міцності, твердості і довговічності не знижуються. Крім того, метод можна застосовувати до конструкцій будь-яких розмірів і маси, а обладнання, необхідне для його здійснення, просте і малогабаритне. Це дозволяє використати його в безперервному технологічному процесі і у проміжних - між окремими операціями механічної обробки.

4.3.2.2 Обробка тиском

Процеси, що відбуваються в металі при обробці тиском (кування, штампування, прокатка, волочіння), базуються на неоднорідності пластичної деформації в об'ємі металу. Під дією деформуючої сили верхні шари металу прагнуть зберегти збільшені розміри, чому перешкоджають недеформовані внутрішні шари. Оскільки поверхневий шар завжди набагато менший внутрішнього, напруження в поверхневому шарі значно вищі.

Обробка тиском можлива при нормальній і підвищеній температурі, а залишкові напруження залежать від ступеня обтиснення і глибини деформації. У випадку обробки при високій температурі додаються залишкові напруження, що виникають від нерівномірного охолодження. Вплив цього фактора на утворення залишкових напружень особливо небезпечний для маложорстких заготовок, наприклад для довгих валів,

колінчатих валів і т.п.

Так само, як і для лиття, залишкові напруження в цьому випадку можуть бути зменшені за рахунок підвищення технологічності конструкції заготовок. З технологічних методів для зменшення залишкових напружень, що виникають при зазначеній обробці, використовується відпал і нормалізація, вібростаріння.

4.3.2.3 Зварювання

Характерними рисами зварювання є його локальний характер, високі швидкості нагрівання до температур, що перевищують температури плавлення металу (3000 °C при газовому і 4000 °C при електродуговому зварюванні), що викликає температурні напруження, неоднорідні структурні перетворення в зонах термічного впливу, зміну розчинності газів, що оточують зварений шов.

У наплавленому шарі і прилеглих ділянках при охолодженні виникають залишкові напруження, тому що зменшення об'єму утрудняється більш холодним навколишнім металом. Величина залишкових напружень при зварюванні у зварному шві іноді досягає межі текучості. Як правило найбільше напруження, що розтягує, спрямоване уздовж шва і у цьому напрямку відбувається обмеження деформації. Зварювальні залишкові напруження виникають у всій конструкції, що зварюється, і розподіл їх по перерізу у значній мірі залежить від форми перерізу, що зварюється.

Залишкові напруження при зварюванні викликають залишкові деформації конструкції, що зварюється. Ці деформації досягають величин, що перевищують допуск на їх виготовлення.

Зварювальні залишкові напруження ефективно знижуються високотемпературним відпуском.

4.3.2.4 Загартування

Внутрішні напруження при загартуванні сталі виникають під впливом двох факторів: температурного (нерівномірність нагрівання і охолодження) і структурного (або фазового) - збільшення об'єму і неоднорідності протікання мартенситного перетворення.

При об'ємному загартуванні неоднаковий розподіл температур по перерізу деталі при швидкому охолодженні супроводжується нерівномірною зміною об'єму. Поверхневі шари стискаються швидше, ніж внутрішні. Стиску поверхневих шарів перешкоджають внутрішні шари. У зв'язку із цим у поверхневих шарах утворюються тимчасові розтягуючі напруження, а у внутрішніх - стискаючі напруження.

Після охолодження поверхні і зміни об'єму поверхневих шарів серцевина ще буде зазнавати *тепловий стиск*. Внаслідок цього напруження почнуть зменшуватися, і в якийсь момент відбудеться зміна знака напружень на поверхні і у серцевині. Після остаточного охолодження на поверхні виникають залишкові напруження стиску, а в серцевині - розтягу (рис. 4.12, а). Поява залишкових напружень є результатом того, що тимчасові напруження викликають не тільки пружну, але і неодночасну і неоднакову пластичну деформацію шарів по перерізу.

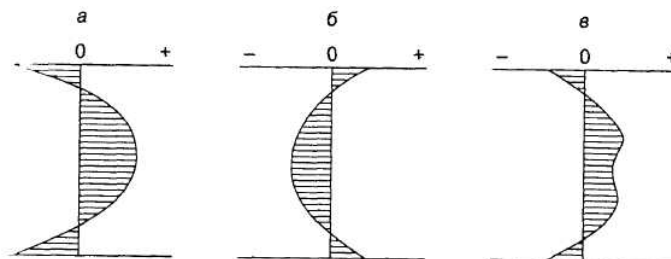


Рис. 4.12 Утворення залишкових напружень при об'ємному загартуванні:

а - вплив температурного фактора; б - вплив структурного фактора; в - сумарні залишкові напруження

Механізм утворення *структурних* напружень має протилежний характер. По досягненню при загартуванні температур нижче точки мартенситного перетворення мартенсит у першу чергу утвориться на поверхні, де ця точка була досягнута раніше, ніж у серцевині. Перетворення аустеніту в мартенсит супроводжується збільшенням об'єму. Тому на поверхні виникнуть тимчасові стискаючі напруження, а у внутрішніх шарах – напруження розтягу. По мірі розвитку перетворення знак напружень на поверхні і у серцевині міняється. Таким чином, структурні напруження відносно температурних змінюються у зворотному напрямку. У результаті мартенситного перетворення на поверхні утворюються залишкові напруження розтягу, а в серцевині - стиску (рис. 4.12, б).

Структурні залишкові напруження так само, як і температурні, виникають у результаті появи під дією тимчасових напружень не тільки пружної, але і неоднорідної по перерізу залишкової пластичної деформації.

Температурні і структурні напруження, що виникають при загартуванні, сумуються (рис. 4.12, в). У даній схемі теплові напруження перевищують структурні, тому на поверхні утворилися залишкові стискаючі напруження. У загальному випадку залежно від співвідношення між температурними й структурними напруженнями можуть мати місце різні епюри сумарних напружень, а в поверхневих шарах напруження можуть мати різний знак і різну величину. У багатьох випадках величина структурних напружень більша, ніж температурних.

Якщо величина напружень перевищує опір відриву і метал малопластичний, то напруження не можуть бути зменшені пластичною деформацією, що викликає утворення тріщин. Найнебезпечніші при цьому *поверхневі розтягуючі напруження*, які сприяють утворенню

тріщин і знижують границю витривалості.

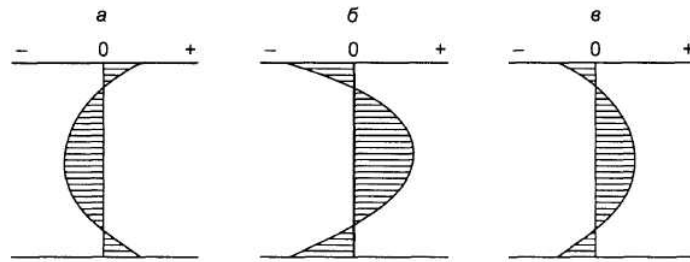


Рис. 4.13 Утворення залишкових напружень при поверхневому загартуванні: а - вплив температурного фактора; б - вплив структурного фактора; в - сумарні залишкові напруження

При поверхневому загартуванні нагріванню піддається тільки поверхневий шар матеріалу деталі. Це приводить до виникнення в ньому тимчасових стискаючих напружень, під впливом яких відбувається пластичний стиск серцевини. При охолодженні нагрітий поверхневий шар прагне скоротитися в об'ємі, але зустрічає опір холодної серцевини. У результаті на поверхні виникають залишкові напруження розтягу (рис. 4.13, а).

Частина поверхневого шару, нагріта вище критичної точки, при охолодженні зазнає мартенситне перетворення. Цей процес супроводжується збільшенням об'єму. У результаті на поверхні виникають структурні напруження стиску. На певній глибині напруження стиску переходять у напруження розтягу, які є в перехідній зоні і далі знову міняють свій знак (рис. 4.13, б).

Система напружень при поверхневому загартуванні має вид, показаний на рис. 4.13, в.

Зниження залишкових напружень після загартування можна досягти в результаті відпуску.

4.3.2.5 Хіміко-термічна обробка

Причиною утворення залишкових напружень при хіміко-термічній обробці є різниця питомих об'ємів насичених поверхневих шарів і

ненасиченої серцевини. В результаті дифузії елемента, що насичує, при хіміко-термічній обробці питомий об'єм поверхневого шару зростає. Серцевина при цьому залишається в початковому стані. Різниця в питомих об'ємах при хіміко-термічній обробці приводить до утворення залишкових напружень стиску.

Зменшення залишкових напружень, що виникли в даному випадку, досягається в результаті низького відпуску.

Хіміко-термічний метод обробки полягає у дифузійному насиченні поверхні виробів металічними і неметалічними компонентами та при допомозі хімічної взаємодії в умовах високої температури утворення поверхневого шару із заданими властивостями.

Можна відзначити такі методи дифузійного насичення:

- порошковий, що здійснюється із порошковидних сумішей;
- електролітичний, що здійснюється з розплавів солей або металів шляхом електролізу;
- фізико-хімічний, що здійснюється з розплавів солей або металів фізико-хімічними методами;
- шлікерний, прямотечійний дифузійний метод насичення з газових середовищ, паст і суспензій;
- вакуумний, коли насичення здійснюється з використанням розрідження у технологічних середовищах.

Серед основних хіміко-термічних методів обробки можна відзначити наступні.

Цементация – хіміко-термічна обробка, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару сталі вуглицем під час нагрівання у відповідному середовищі – карбюризаторів; після чого здійснюється гартування та низький відпуск.

Основними ефектами обробки є підвищення твердості, теплостійкості, зносостійкості та межі витривалості поверхневого шару.

Структура: в сталі утворюється в'язка серцевина, дифузійний шар містить аустеніт та продукти його розпаду – ферит та цементит; концентрація вуглецю не досягає насичення.

Основні різновиди:

- цементация у твердому карбюризаторі, тобто у масі деревного вугілля, напівкоксу;
- газова цементация, тобто в ендотермічній атмосфері (20% CO, 40% H₂, 40% M₂ + природний газ CH₄) або до 98% CH₄, або ендогоз (20% CO, 20% H₂, 60% N₂ + CH₄); зменшується тривалість в 1,5 – 2 рази, собівартість, можливість регулювання глибини цементованого шару, автоматизації процесу – цементация у рідинному карбюризаторі (до 85% Na₂CO₃ або K₂CO₃ +10...15% NaCl); мінімальні сажо- та коксоутворення, вміст сірчаних сполук).

Азотування – дифузійне насичення поверхневого шару азотом при нагріванні у середовищі, що містить аміак; попередньо здійснюється гартування і високий відпуск для підвищення міцності і в'язкості серцевини.

Основними ефектами обробки є підвищення поверхневої твердості, зносостійкості, межі витривалості, корозійної та ерозійної стійкості.

Нітроцементация – дифузійне насичення поверхневого шару сталі одночасно вуглицем і азотом у газовому або рідинному середовищах, що містить насичений вуглицем газ та аміак; після чого здійснюється гартування безпосередньо із печі (шахтні або шнекові печі) з охолодженням, далі повторне ступінчасте гартування.

Основними ефектами обробки є підвищення твердості та зносостійкості сталевих виробів, поліпшення їх механічних властивостей.

Силіціювання – дифузійне насичення поверхневого шару кремнієм при температурі 800 – 1100 °C у порошкоподібному, рідинному або газовому середовищах.

Основними ефектами обробки є висока стійкість проти корозії у морській воді, кислотах, підвищена зносостійкість, порівняно низька твердість; пористість шару можна ліквідувати спіканням: t до 1200 – 1210 °C, витримка 10 – 30 с.

Алітування – дифузійне насичення поверхневого шару алюмінієм при $t = 700 - 1100$ °C у порошкоподібних сумішах (49,5% амоній, 49,5% Al_2O_3 , 1% NH_4Cl ; або 99% фероалюміній, 1% NH_4Cl ; або 48% фероалюмінію, 48% піску, 4% NH_4Cl), у ваннах з розтопленим Al, металізацією з наступним відпалюванням.

Основними ефектами обробки є висока корозійна стійкість в атмосфері та морській воді, твердість до 500 НВ.

Сульфідкування – насичення поверхневого шару сіркою (для швидкорізальних сталей).

Основними ефектами обробки є покращення антифрикційних якостей поверхонь.

Цинкування – насичення поверхневого шару цинком при $t = 300 - 550$ °C і $700 - 1000$ °C у відповідному середовищі.

Основними ефектами обробки є підвищення корозійної стійкості у середовищах, що містять сірководень: бензині, оліях, гарячих газах (300 – 500 °C).

Способи здійснення:

- занурення у розтоплений цинк та витримування у ньому 15 – 25 год. при $t = 440 - 480$ °C;
- у печах в середовищі порошку цинку при $t = 350 - 450$ °C протягом 1 – 10 год.;
- у парах цинку при $t = 700 - 1000$ °C в печі, через яку пропускають водень.

Борування – дифузійне поверхневе насичення бором у середовищі боризатора такими способами:

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

— у порошкоподібних сумішах (порошки аморфного карбіду бору або феробору + 30 – 40% глинозему, 1- 3% NH_4Cl) при $t = 950 - 1050^\circ\text{C}$, протягом 3 – 6 год.;

— електролізне борування у розтоплений бурі $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ або 40 – 60% борного ангідриду при $t = 900 - 950^\circ\text{C}$, 2 – 6 год.;

— газове борування у середовищі диборана B_2H_6 , що розбавлений воднем або у трихлориді бору BCl_3H_2 при $t = 800 - 950^\circ\text{C}$, 2 – 6 год.;

— рідинне борування у розтопленому борі + 30 – 40% B_4C або 50% BCl_2 + 30 – 40% NaCl + 10% B_4C (або феробориду).

Основними ефектами обробки є підвищення зносостійкості в агресивних середовищах, корозійної стійкості, теплостійкості, твердості.

Ефект комбінованих з боруванням процесів:

— бороалітування: підвищення зносостійкості, жаростійкості, корозійної стійкості (у 9 – 11 разів);

— боросиліціювання: підвищення зносостійкості та корозійної стійкості;

— борохромування: значне підвищення фізико-хімічних характеристик;

— боротитанування: висока корозійна стійкість в агресивних середовищах харчових виробництв, в умовах інтенсивного абразивного і кавітаційно-ерозійного спрацювання.

Хромування – дифузійне насичення хромом.

Основними ефектами обробки є підвищення корозійної стійкості; після хромоалітування підвищується зносостійкість та ерозійна стійкість (у 4 рази), корозійна стійкість (у 5 – 10 разів); після хромосиліціювання підвищується зносостійкість, ерозійна і кавітаційна (в 4 – 6 разів для сірого чавуну) стійкість, опір газовій та електрохімічній корозії.

4.3.2.6 Механічна обробка

Механізм утворення залишкових напружень при механічній обробці полягає в наступному. При різанні біля вершини різця в результаті силового впливу виникає пластична деформація розтягу. Після припинення силової дії в поверхневому шарі під впливом цього фактора виникають залишкові напруження стиску.

Виділення тепла в процесі різання внаслідок деформації і тертя приводить до великих температурних градієнтів. Це сприяє утворенню залишкових напружень розтягу. Крім зазначених, можлива поява структурних напружень. Характер і величина сумарних залишкових напружень після обробки різанням залежать від переважного впливу силового або температурного факторів.

Зміна величини і знака залишкових напружень у результаті обробки різанням залежать від: параметрів режиму різання (швидкість різання і подача); геометрії різального інструменту (величина переднього кута і радіус вершини різця); фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу (твердість і пластичність); умов охолодження.

Найбільший вплив на величину і знак залишкових напружень мають швидкість різання і величина переднього кута.

Підвищення швидкості різання, супроводжуване підвищенням температури поверхневого шару, що приводить до зменшення величини і глибини поширення стискаючих напружень (рис. 4.14).

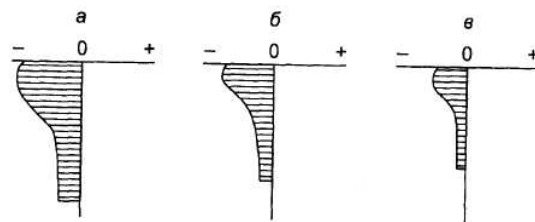


Рис. 4.14 Вплив швидкості різання на утворення залишкових напружень: а - при $V=5$ м/хв.; б - при $V=70$ м/хв.; в - при $V=110$ м/хв.

Зміни переднього кута від позитивних до негативних значень

сприяє зниженню деформації в зоні стружкоутворення. Це супроводжується безперервним підвищенням величини і глибини розповсюдження залишкових напружень стиску (рис.4.15).

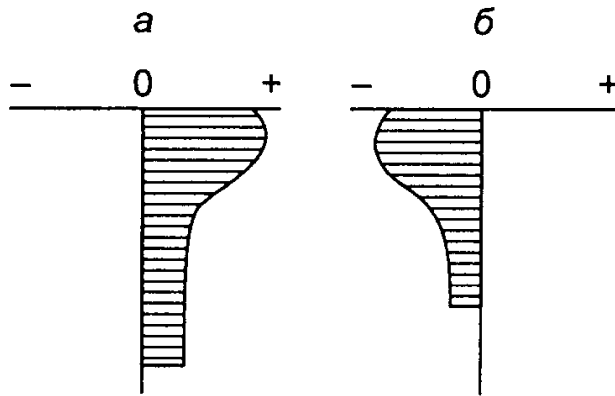


Рис. 4.15 Вплив переднього кута на утворення залишкових напружень:
а – при $\gamma=15^\circ$; б – при $\gamma=10^\circ$

Збільшення радіуса вершини різця і товщини зрізу приводить до аналогічних результатів, які характерні для обробки різцями з більшим негативним кутом.

У процесі абразивної обробки на величину і знак залишкових напружень вирішальний вплив має температурний фактор. Силова пластична деформація впливає в меншій мірі.

При шліфуванні в поверхневому шарі виникають тимчасові стискаючі температурні напруження, які перевищують границю текучості матеріалу і викликають деформацію стиску поверхневого шару.

Після закінчення процесу шліфування і встановлення нормальної температури зазначена деформація зберігається. Це приводить до розтягу поверхневих шарів з боку внутрішніх і утворенню залишкових напружень розтягу.

При інших видах абразивної обробки (хонінгування, полірування, стрічкове шліфування, суперфінішування) переважний вплив на утворення залишкових напружень має фактор пластичної деформації. У

результаті в поверхневому шарі після обробки зазначеними методами утворюються залишкові напруження стиску.

При обробці поверхневим пластичним деформуванням (ППД) (обкатування роликами і кульками, розкочування, алмазне вигладжування, дорнування, дробоструйна обробка і ін.) залишкові напруження виникають у результаті холодного пластичного деформування тонкого поверхневого шару матеріалу деталей. Шари, що лежать нижче не зазнають змін. У цьому випадку питомий об'єм матеріалу поверхневого шару збільшується. Збільшенню питомого об'єму шару, що деформується, будуть перешкоджати лежачі нижче недеформовані шари, а це приведе до утворення в поверхневих шарах *залишкових напружень стиску*.

4.3.2.7 Газотермічні методи нанесення захисних покриттів

При використанні даних методів можуть виникати як стискаючі залишкові напруження, так і напруження розтягу. Величина і знак залишкових напружень залежать від методу нанесення покриття, а також хімічного складу матеріалу, що наноситься.

Якщо нанесення покриття виконується в умовах без нагрівання або з незначним нагріванням основного об'єму матеріалу оброблюваної деталі, то величина і знак залишкових напружень залежать тільки від хімічного складу і швидкості охолодження. У випадку якщо хімічний склад покриття, що наноситься, аналогічний складу сталей, що гартуються на повітрі, нанесене покриття гартується зі зміною об'єму в результаті структурного перетворення. Це приводить до виникнення в поверхневому шарі *залишкових напружень стиску*.

У випадку нанесення покриття вуглецевими сталями в поверхневому шарі в результаті температурного фактора виникнуть *залишкові напруження розтягу*.

При нанесенні покриття з наскрізним нагріванням всієї деталі величина і знак залишкових напружень залежать від температурного коефіцієнта лінійного розширення матеріалу деталі і покриття, що напильюється. Якщо коефіцієнт лінійного розширення матеріалу деталі більше, ніж шару, що напильюється, то в шарі, що напильюється виникнуть *залишкові напруження стиску*, а якщо менше - *залишкові напруження розтягу*.

4.3.3 Зміна мікрогеометрії поверхні

На шорсткість поверхні, утвореної різанням, впливає велика кількість факторів, пов'язаних з умовами обробки деталі. Зокрема, висота і форма нерівностей, а також характер розташування і напрямки оброблювальних рисок залежать від прийнятого виду і параметрів режиму обробки; умов охолодження; хімічного складу і мікроструктури оброблюваного матеріалу; конструкції, геометрії і стійкості інструмента; типу і стану використовуваного устаткування, допоміжного інструмента і пристосувань.

Залежно від конкретних умов різання переважний вплив на мікронерівності мають ті або інші фактори.

Мікронерівності можна розглядати як слід руху ріжучих кромek інструмента, у результаті чого на оброблюваній поверхні утворюються мікроступи, висота і форма яких залежать від подачі S , радіуса вершини різця r і кутів у плані φ і φ_1 . Чим більші S , φ і φ_1 і менший r , тим висота мікронерівностей H і площа F_0 більші (рис. 4.9).

Таким чином, утворення шорсткості викликається супутніми процесу різання явищами, що залежать у свою чергу від ряду факторів: оброблюваного матеріалу, параметрів режиму різання, геометрії і якості обробки ріжучих елементів інструмента, зношування різального інструменту, змазуючо-охолоджувальної рідини і ін.

4.3.3.1 Властивості оброблюваного матеріалу

Чим більша пластичність оброблюваного матеріалу, тим більша шорсткість утвориться в результаті обробки. На поверхні з'являються надриви, окремі волокна силами тертя зриваються з оброблюваної поверхні в момент відділення стружки. Зі збільшенням пластичності матеріал більше деформується, збільшується наріст, підсилюються вібрації і у результаті збільшується шорсткість поверхні.

При високій швидкості різання вплив пластичності матеріалу зменшується, тому що він менше деформується. Сталь із дрібнозернистою структурою обробляється з утворенням меншої шорсткості, тому рекомендується перед чистовою обробкою піддавати сталеві деталі нормалізації.

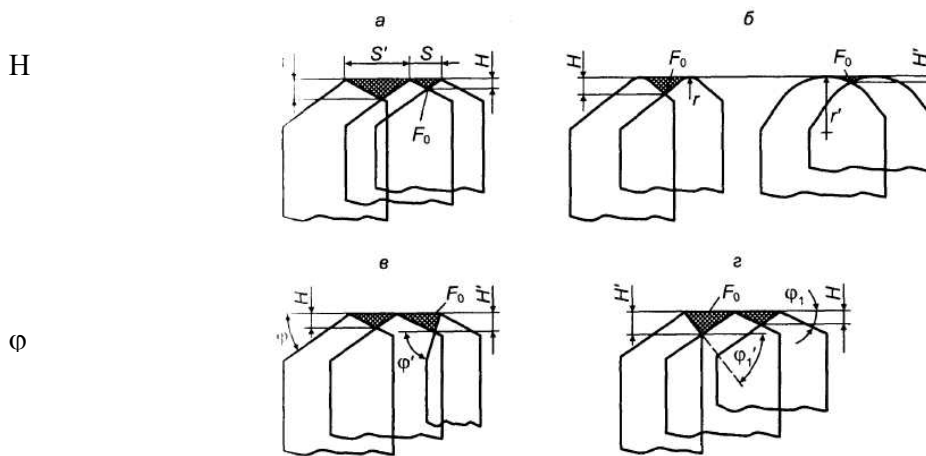


Рис. 4.16 Вплив подачі і геометрії різця на утворення мікронерівностей: а - $H=f(S)$ при $S'>S$, $H'>H$; б - $H=f(r)$ при $r'>r$, $H'<H$; в - $H=f(\varphi)$ при $\varphi'>\varphi$, $H'>H$; г - $H=f(\varphi_1)$ при $\varphi_1'>\varphi_1$, $H'>H$

4.3.3.2 Параметри режиму різання

Результати досліджень свідчать про те, що глибина різання на висоту мікронерівностей не має істотного впливу, а подача і швидкість різання значно впливають на шорсткість обробленої поверхні.

Незначний вплив глибини різання пояснюється тим, що ступінь

деформації металу зі збільшенням ширини зрізу змінюється мало. Збільшення глибини різання мало впливає на величину наросту, але викликає більш інтенсивні вібрації. Зі збільшенням подачі висота і площа перерізу зрізу зростають (див. рис. 4.16, а). Також зростають величина наросту і температура деформованого шару. З іншого боку, зі збільшенням подачі (товщини зрізу) зменшуються вібрації і деформації металу, що сприяє зменшенню висоти мікронерівностей.

Поздовжня подача в межах до 0,01-0,10 мм/об на висоту мікронерівностей обробленої поверхні впливає мало. З подальшим ростом подачі висота мікронерівностей різко зростає.

Переважаючий вплив, однак, мають фактори, що збільшують шорсткість поверхні. Вплив швидкості різання на шорсткість поверхні має для сталі вид горбообразної кривої (рис. 4.17).

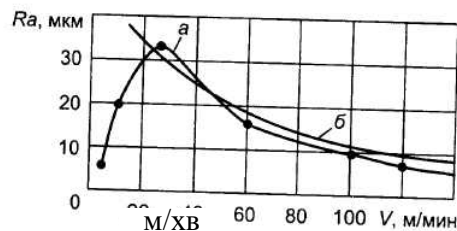


Рис. 4.17 Вплив швидкості різання на висоту мікронерівностей поверхні: а - при обробці сталі; б – чавуну

При малих швидкостях різання до 5 м/хв. і високих — понад 70 м/хв. шорсткість обробленої поверхні невелика; значна - у зоні $V=20-40$ м/хв. При $V>120$ м/хв. шорсткість поверхні майже не змінюється. Це пов'язано із процесом наростуутворення, деформації і вібрації. У зоні середніх швидкостей різання сталь більше деформується, наріст максимальний, вібрації інтенсивні. При обробці чавуну і кольорових металів зі збільшенням швидкості різання шорсткість поверхні поступово знижується (рис. 4.17).

4.3.3.3 Геометрія інструмента

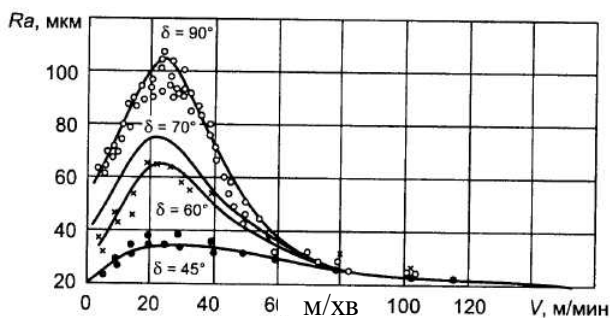
Найбільший вплив на шорсткість поверхні має радіус вершини різця r . Чим більше r , тим менше шорсткість поверхні за умови жорсткої і вібростійкої технологічної системи.

Передній кут γ впливає на шорсткість обробленої поверхні. При збільшенні переднього кута (зменшенні кута різання δ) висота мікронерівностей трохи зменшується. Це зменшення відбувається більш різко в міру збільшення подачі і менш різко — у міру збільшення швидкості різання (починаючи зі швидкості 20-30 м/хв. до 60 – 80 м/хв., рис. 4.18).

Починаючи ж зі швидкості різання 60-80 м/хв. (при обробці вуглецевих сталей), передній кут практично не впливає на шорсткість обробленої поверхні.

Зі збільшенням заднього кута α зменшується робота тертя по задній поверхні різця і шорсткість обробленої поверхні. Зі зменшенням кутів у плані φ і φ_1 шорсткість поверхні зменшується (див. рис. 4.16, в, г). З іншого боку, з їхнім зменшенням збільшується ширина зрізу і сила P_y , тим самим підсилюються вібрації, збільшується шорсткість поверхні.

При невисокій жорсткості технологічної системи мінімальна шорсткість обробленої поверхні забезпечується при $\varphi=75-90^\circ$ і $\varphi_1=12-15^\circ$.



Швидкість різання

Рис. 4.18 Вплив кута різання (переднього кута) на висоту мікронерівностей обробленої поверхні

Шорсткість поверхні нижче при негативних значеннях кута нахилу

головної ріжучої кромки в (від -3 до -7°), тому що стружка не попадає на оброблену поверхню і не дряпає її.

4.3.3.4 Мікрогеометрія і зношування різальних інструментів

Мікрогеометрія поверхні ріжучих елементів різця копіюється на обробленій поверхні, погіршуючи її шорсткість. Тому ріжучі поверхні різців повинні бути ретельно заточені і доведені алмазними кругами. При роботі з малою товщиною зрізу шорсткість поверхні істотно залежить від мікрогеометрії ріжучих кромок. Шорсткість значно зростає в міру зношування різця. Передня і задня поверхні різця стають шорсткуватими, ріжучі кромки округляються, а окремі ділянки кромок руйнуються. Це сприяє збільшенню роботи тертя, наросту і появі вібрації, росту шорсткості обробленої поверхні.

4.3.3.5 Мастильно-охолоджувальна рідина

Наявність мастильно-охолоджувальної рідини сприяє зменшенню шорсткості поверхні, тому що зменшує тертя, затрудняє утворення наросту і сповільнює зношування різця. При чистових операціях для сталі рекомендується застосовувати масло або сульфо-фрезол, а для чавунів - гас.

У міру збільшення швидкості різання ефект від застосування рідин зменшується (у порівнянні з сухою обробкою) і, починаючи з певної швидкості, стає практично непомітним. Це пов'язано з підвищенням температури при високих швидкостях різання і десорбуванням мастильно-охолоджувальної рідини з оброблюваної поверхні.

Розглянуті стосовно до токарної обробки залежності шорсткості від різних факторів зберігають в основному свою силу і для інших видів обробки (стругання, свердління, зенкерування, фрезерування і т. п.).

У зв'язку з тим що такі фактори, як геометрична форма різального

інструменту і величина подачі, відбиваються тільки на поперечній шорсткості, її розміри як правило в 2-3 рази перевищують поздовжню шорсткість. Внаслідок цього оцінку ступеня шорсткості поверхні деталі як правило роблять на підставі вимірів поперечної шорсткості. При певних видах обробки (торцеве фрезерування, доведення) поздовжня і поперечна шорсткості мають однакове значення і можуть вимірятися в обох напрямках.

За певних умов обробки, зокрема при виникненні вібрації або високого ступеня пластичної деформації поверхневого шару металу, поздовжня шорсткість може різко зрости і перевищити поперечну. У подібних випадках оцінку шорсткості поверхні варто робити на підставі вимірів не поперечної, а поздовжньої шорсткості.

4.3.4 Технологічна спадковість елементів системи

Забезпечення якості деталей машин може бути досягнуте за рахунок управління технологічним процесом їх виготовлення. При механічній обробці якість деталі в даний момент часу визначається не тільки останньою фінішною операцією, але і особливостями всіх попередніх операцій, починаючи з одержання вихідної заготовки. Всі виконувані операції обробки деталей машин необхідно розглядати не ізольовано, а у взаємозв'язку, тому що кінцеві характеристики оброблених поверхонь формуються під дією всього комплексу виконуваних операцій.

Основні параметри деталей, наслідувані в ході технологічного процесу, підрозділяються на дві групи: пов'язані з матеріалом деталей і з їх геометричними показниками.

До *першої* групи відносяться параметри, що характеризують хімічний склад, структуру і напружений стан матеріалу деталей; структуру найтонших поверхневих шарів; поверхневу енергію і ін.

Друга група характеризує макро- і мікрогеометрію, хвилястість оброблених поверхонь (шорсткість, овальність, конусообразність і ін.). Значення цих параметрів залежать як від виду і параметрів режиму фінішних операцій, так і від попередніх.

Позитивні і негативні фактори, що впливають на експлуатаційні характеристики деталей машин, з'являються і згасають на різних стадіях технологічного процесу. Тривалість дії окремих факторів технологічної спадковості різна. Кінцеві властивості обробленої поверхні будуть залежати від того, скільки негативних факторів збережеться і пройде через весь комплекс операцій аж до готової деталі і на скільки вони будуть подавлені або нейтралізовані позитивними факторами. Отже, з урахуванням явища технологічної спадковості при проектуванні технологічних процесів необхідно вводити такі операції («бар'єрні»), які створювали б більше перешкод проходженню до фінішної операції негативних факторів. Самими істотними «бар'єрами» є ППД і *термічні* операції.

Негативний прояв технологічної спадковості може бути знижено зміною технологічного процесу обробки заготовок.

На фінішних операціях спостерігається збільшення мікротвердості. Така зміна цієї характеристики поверхневого шару викликана тим, що наклепані в результаті обробки зони частково накладаються одна на одну в результаті нерівномірності наклепу при різних операціях технологічного процесу обробки деталей. У результаті остаточно оброблена поверхня виявляється з накладеними зонами наклепу. Такий розподіл зон наклепу може вплинути на експлуатаційні характеристики деталей машин (наприклад, на втомну міцність). Для усунення «плямистого» розташування зон наклепу на обробленій поверхні доцільно включати в технологічний процес виготовлення деталі «бар'єрну» операцію. Такою операцією в цьому випадку є ППД. При

поверхневому пластичному деформуванні наклеп вирівнює фізико-механічні властивості поверхневого шару і сприяє створенню рівномірного зміцнення по всій поверхні деталі. Крім цього, у результаті обробки ППД при пластичній деформації мікротріщини, що перебувають на поверхні, замикаються, і поверхня стає більш цільною, тобто вона як би «заліковується».

Використання обробки ППД у якості «бар'єрної» операції може бути проілюстроване ще одним прикладом. Після шліфування оброблена поверхня завжди структурно неоднорідна. Це викликано неоднаковими тепловими впливами шліфувального круга на її окремі ділянки. На границях ділянок з різною структурою, а отже, і мікротвердістю, виникають підвищені напруження. Ці границі є структурними концентраторами напружень. При експлуатації деталі в цих місцях можуть утворюватися тріщини, а потім і пінтінги.

Поверхневий наклеп при здійсненні ППД усуває «структурну строкатість» і структурні концентратори напружень (вони як би розсмоктуються). Це відбувається через те, що м'які структури наклепуються інтенсивніше, ніж тверді. У результаті наклепу мікротвердість останніх вирівнюється. Крім цього, місцеві напруження розтягу, подавляються знову створеними при наклепі стискаючими напруженнями і весь поверхневий шар металу стає як би рівно-напруженим. Залишкові напруження в результаті ППД будуть стискаючими.

Аналогічний результат може бути отриманий за допомогою вигладжування після шліфування.

Досить потужним «бар'єром» на шляху проходження негативних факторів у ході технологічного процесу є *термічна обробка*. Наприклад, задаючи різні режими нормалізації, можна при однакових швидкостях різання одержати різні величини шорсткості поверхні. При цьому істотно

змінюється не тільки сама шорсткість, але і розкид значень її показників.

Як вказувалося вище, у процесі обробки деталей успадковується шорсткість поверхні. Вихідна (після токарної операції) шорсткість впливає на чорнове і попереднє шліфування. При великій вихідній шорсткості виходить значна шорсткість і на операціях шліфування. На чистову і остаточну операції шліфування вихідна шорсткість впливу не має. На цих операціях утворюється властива їм шорсткість. Поопераційне спадкування вихідної шорсткості пов'язане з тим, що при зрізанні більших мікровиступів частина з них активно впливає на робочу поверхню шліфувального круга і руйнує її. Окремі мікровиступи оброблюваної поверхні збігаються з міжзереним простором шліфувального круга і, руйнуючи матеріал зв'язування, утворюють у ній подряпини. У результаті на ріжучому контурі утворюються нерівності, які, копіюючись на оброблюваній поверхні, утворюють на ній відповідну шорсткість. Величина шорсткості виходить менше вихідної, але залишається досить великою.

Після попередньої операції шліфування мікровиступи обробленої поверхні не утворюють глибоких подряпин у матеріалі зв'язування круга. Ріжучий контур абразивного круга стає більш рівним. У цих умовах підсилюється ефект пластичного вигладжування поверхні і вона отримує меншу шорсткість. У такому випадку остання залежить від умов виконання даної операції.

4.4 Технологічно-організаційні аспекти надійності систем

4.4.1 Підвищення надійності складних систем

При проектуванні технічних систем завжди варто пам'ятати, що чим простіша система, тим рівень її надійності буде вищим.

У загальному випадку зменшити інтенсивність відмов системи можна наступними способами.

1. Спрощення системи. При зменшенні кількості елементів, можна істотно підвищити її надійність (рис. 5.7). Ефект буде тим більшим, чим нижча надійність елементів і чим складніша система.

2. Вибір більш надійних елементів. Разом з тим підвищення надійності елемента часто призводить до збільшення маси системи, габаритів і вартості.

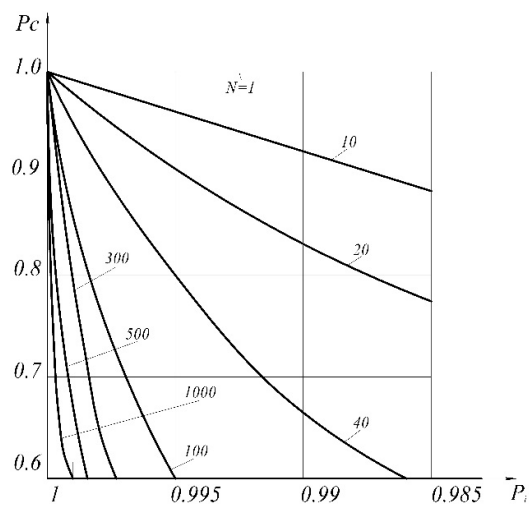


Рис. 4.19 Залежність імовірності безвідмовної роботи системи від кількості елементів N та імовірності їх безвідмовної роботи P_i

3. Полегшення режимів роботи елементів завдяки зменшенню впливу зовнішніх чинників та полегшенню режимів роботи.

Спосіб є ефективним тоді, коли елементи працюють з перенавантаженням. У цьому випадку треба полегшувати режими роботи в першу чергу тих елементів, відмови яких призводять до відмов системи, а не до погіршення її характеристик.

4. Відбраковування малонадійних елементів за результатами випробувань елементів у важких умовах роботи, які можна погіршити, збільшуючи навантаження або задаючи негативні режими впливу зовнішніх чинників.

5. Створення схем з обмеженими наслідками відмов елементів. Відмови елементів складної технічної системи нерівноцінні, а тому потрібно при аналізі їх наслідків враховувати коефіцієнти впливу на загальну надійність системи. Проектувати системи з обмеженими

наслідками відмов треба так, щоб відмова елемента призводила не до втрати її працездатності, а лише до погіршення окремих характеристик у межах працездатного стану.

6. Стандартизація і уніфікація елементів системи. Висока надійність таких складових є наслідком того, що вони доведені до належного технічного рівня завдяки їх постійному удосконаленню. Застосування стандартних деталей і вузлів дозволяє знизити інтенсивність відмов системи і скоротити середній час відновлення працездатності.

7. Удосконалення технології виробництва та її автоматизація і роботизація. Ці заходи дозволяють забезпечити експлуатаційну стабільність характеристик елементів і систем.

8. Статистичний контроль якості, що дозволяє виявити чинники, які погіршують технологію виробництва елементів і систем, вплинути на їх якість і відбракувати непрацездатні.

9. Профілактичні заходи, спрямовані на попередження відмов, які передбачають постійний контроль за технологією виробництва систем та їх елементів, а також забезпечення належної експлуатації і вчасного технічного обслуговування.

4.4.2 Оцінка технологічно-організаційних заходів

4.4.2.1 Скорочення часу безперервної роботи об'єктів для підвищення надійності

У процесі експлуатації надійність будь-якого технічного об'єкта чи системи знижується. Зменшивши сумарний час їх роботи, можна збільшити час існування у працездатному стані.

Час безперервної роботи, наприклад, автоматичної системи можна скоротити за рахунок багаторазового її вмикання і вимикання. Це

можливо у тих випадках, коли для керування об'єктом немає необхідності тримати ввімкненою систему протягом усього часу його експлуатації. Такими системами є, наприклад, системи корегування технологічних процесів харчових виробництв.

Але зберегти надійність системи за рахунок скорочення часу її безперервної роботи можна лише тоді, коли кількість вмикань і вимикань порівняно невелика. При частих вимиканнях і вмиканнях перехідні процеси можуть мати настільки значний шкідливий вплив, що такий режим роботи стане недоцільним.

Помітний ефект дає скорочення часу безперервної роботи резервованої системи (рис. 4.20).

При великому наробітку (t_1) імовірності безвідмовної роботи резервованої і нерезервованої системи мало відрізняються одна від одної. З його зменшенням до (t_2) імовірність безвідмовної роботи резервованої системи (1) буде значно більшою, ніж нерезервної ($\Delta P_p \gg \Delta P_0$).

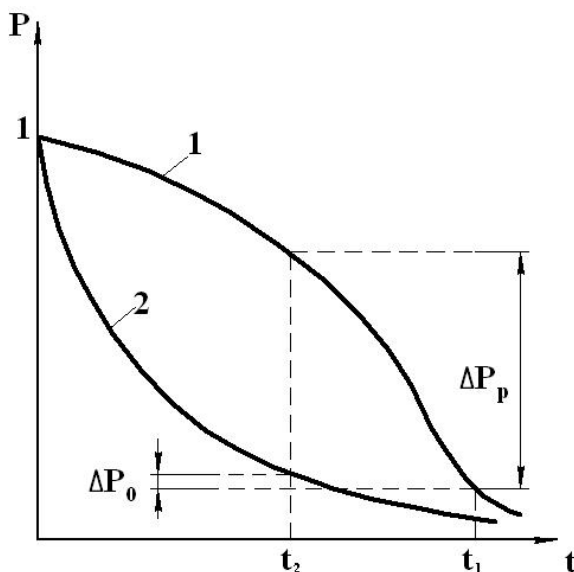


Рис. 4.20 Виграш збільшення імовірності безвідмовної роботи резервованої (1) і нерезервованої (2) систем при скороченні часу безперервної роботи

4.4.2.2 Вплив резервування на надійність

Великі переваги резервування полягають у можливості проектування надійних систем з малонадійних елементів. Ефективність резервування часто оцінюють величиною зменшення імовірності відмов (виграш надійності):

$$G_Q(t) = \frac{1 - \exp(-\lambda_c t / C)}{1 - \exp(-\lambda_c t)}, \quad (4.23)$$

де C - коефіцієнт, який показує, у скільки разів інтенсивність відмов резервованої системи менша за інтенсивність нерезервованої.

$G_Q(t)$ асимптотично наближається до одиниці (рис. 5.9) незалежно від надійності резервованої системи і її елементів. Чим менша надійність нерезервованої системи і кратність резервування резервованої, тим більшою є крутизна зростання G_Q , а отже, тим менш доцільним з часом для таких систем стає резервування. При кожному резервуванні з дробовою кратністю значення G_Q , починаючого з певного наробітку, стає більшим за одиницю і таке резервування стає недоцільним.

Виграш надійності резервованої системи, порівняно з нерезервованою, тим більший, чим менший час безперервної роботи системи і чим надійніша система резервується, що є основним протиріччям резервування.

Виграш надійності за інтенсивністю відмов системи якісно не відрізняється від G_Q .

За середнім часом (математичними сподіваннями) m_t безвідмовної роботи при резервуванні з дробовою кратністю і нековзному резерві доцільним буде застосування нерезервованої системи. Це справедливо тоді, коли кількість резервних систем менша за кількість основних. Виграш G_{m_t} , зі зростанням кратності резервування зростає, але швидкість зростання залежить від способу резервування (рис. 4.22).

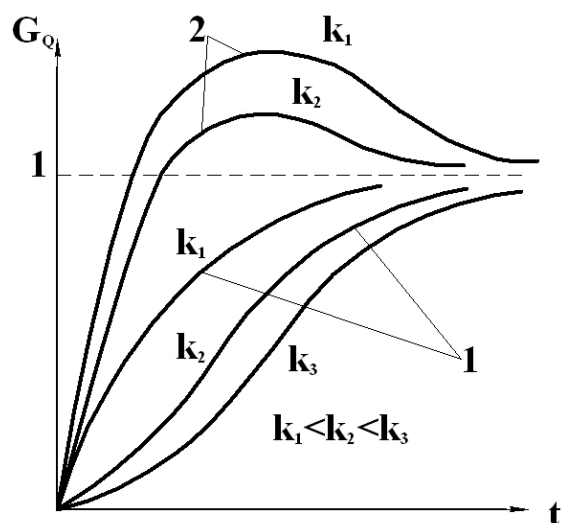


Рис. 4.21 Залежність виграшу надійності за імовірністю відмов від часу t_i і кратності резервування: 1- резервування з цілою кратністю; 2- резервування з дробовою кратністю

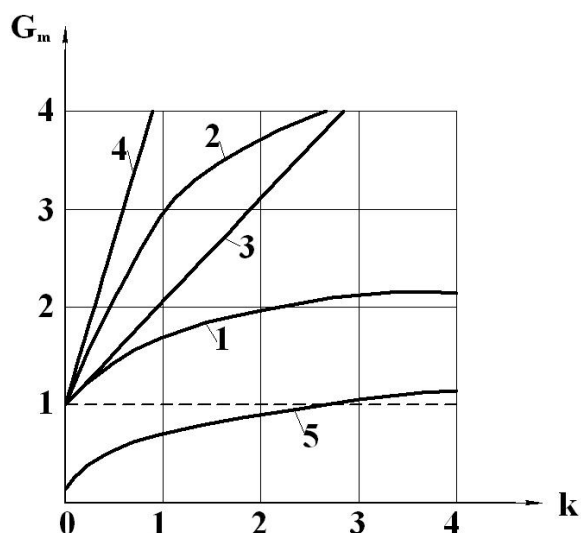


Рис. 4.22 Залежність виграшу надійності за математичним сподіванням часу безвідмовної роботи від кратності і виду резервування: 1- загальне постійне; 2 - поелементне постійне; 3 – загальне змашувальне; 4 – по елементне змашувальне; 5 – з дробовою кратністю

Заміщувальне резервування відповідає більшому виграшу G_{m_i} порівняно з постійним. Реалізація заміщувального резервування передбачає застосування перемикачів, які погіршують рівень надійності системи. Це значить, що збільшення кратності заміщувального резервування часто призводить до зменшення швидкості зростання виграшу G_{m_i} . Це також є протиріччям резервування. Значне збільшення кратності резервування (а одночасно маси, габаритів і вартості об'єкта) зумовлює невелике збільшення середнього часу безвідмовної роботи.

Таким чином, з урахуванням проведеного аналізу можна відмітити:

- резервування вигідно застосовувати для систем, які розраховані на невеликий термін безперервної роботи;
- використання резервування для систем з тривалим часом безперервної роботи у більшості випадків вимагає збільшення його кратності.

- надійність систем підвищується при резервуванні на фоні збільшення їх маси, габаритів, вартості та ускладнення умов експлуатації.

4.4.2.3 Зменшення часу відновлення дієздатного стану систем

Зменшуючи час відновлення дієздатності технічної системи, можна збільшити її готовність, зменшити простоювання і підвищити ефективність використання. Той чи інший спосіб підвищення надійності системи можна обрати лише тоді, коли є порівняння конкретних показників надійності.

Приклад. Автоматична технологічна система керування лужністю реакційної маси у реакторі для виробництва біопалива з рослинних олій складається з $N=15$ послідовно з'єднаних елементів. Інтенсивність відмов кожного з них $\lambda_i = 0,15 \cdot 10^{-4}$ 1/год. Для системи є справедливим експоненціальний закон надійності. За структурою вона така, що відмова кожного елемента веде до відмови всієї системи.

Визначити, який спосіб підвищення надійності треба застосовувати, щоб імовірність безвідмовної роботи системи протягом часу $t = 2000$ год була не нижчою за $P_c(t) = 0,99$.

Розв'язок.1. За умовою прикладу елементи системи мають основне послідовне з'єднання, а тому інтенсивність відмов системи:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i = N\lambda_i = 15 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4} = 0,225 \cdot 10^{-3}, \text{ 1/год}$$

Визначимо імовірність безвідмовної роботи системи, до якої ще не вжито заходів з підвищення надійності.

$$P_c(2000) = \exp(-\lambda_c t) = \exp(-0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 2000) = 0,638.$$

Очевидно, що така система не відповідає поставленим вимогам.

2. Розрахуємо показники надійності, які повинен мати об'єкт, щоб його імовірність безвідмовної роботи була не нижчою 0,99.

З урахуванням (4.46) і (4.47)

$$P_c^*(2000) \cong 1 - tN\lambda_i^*,$$

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

де P_i^* і λ_i^* відповідно, бажані значення імовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов

звідки

$$\lambda_i^* = \frac{1 - P_c(2000)}{Nt} \cdot \frac{1 - 0,99}{15 \cdot 2000} = 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$$

Середній час безвідмовної роботи елементів системи з урахуванням (4.44) має складати:

$$m_{ii} = \frac{1}{\lambda_i^*} = 3,03 \cdot 10^6 \text{ год.}$$

У реальній технічній системі досягти зниження інтенсивності відмов аж на три порядки (з $0,225 \cdot 10^{-3}$ 1/год до $0,33 \cdot 10^{-6}$ 1/год) практично неможливо. Якщо кількість елементів у системі залишити незмінною то, у кращому випадку, можна зменшити λ лише на один порядок. Нереальним є також і математичне сподівання набітку до відмови, що дорівнює трьом мільйонам годин (125000 днів, або близько 340 років).

Вважаючи можливим зменшення середньої інтенсивності відмов системи на один порядок ($\kappa' = 10$), визначимо імовірність безвідмовної роботи у цьому випадку:

$$P_c(2000) = \exp(-tN\lambda_i / \kappa') = 0,956,$$

А це значить, що зменшення середньої інтенсивності відмов елементів на порядок зумовило збільшення імовірності безвідмовної роботи системи з $P_c(t) = 0,638$ до $P_c(t) = 0,956$.

Тепер розрахуємо скільки повинно бути елементів у системі, щоб за рахунок зменшення інтенсивності відмов сконструювати систему із заданою імовірністю безвідмовної роботи:

$$N = \frac{1 - P_c(2000)}{\lambda_i t / \kappa'} = \frac{1 - 0,99}{\frac{0,15 \cdot 10^{-4} \cdot 2000}{10}} \cong 3.$$

Автоматична технологічна система керування лужністю реакційної маси для реактора дизельного біопалива, що складатиметься з трьох елементів, забезпечуватиме задану імовірність безвідмовної роботи, але при цьому не зможе виконувати всіх своїх функцій.

3. Проаналізуємо метод підвищення надійності, що полягає у скороченні часу безперервної роботи системи.

З урахуванням вимог, що висуваються до системи ($P(t) = 0,99$), її сумарний час безперервної роботи не повинен перевищувати:

$$t = \frac{1 - P_c(t)}{N \cdot \lambda_i} = \frac{1 - 0,99}{15 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4}} \cong 44 \text{ год.}$$

Якщо ж зменшити середню інтенсивність відмов всіх елементів на один порядок, то час безперервної роботи t зросте на один порядок і дорівнюватиме 440 год.

4. Розраховуємо необхідну кількість резервних систем

При загальному резервуванні з постійно увімкненим резервом $L+1$ систем одночасно працюють з однаковим навантаженням (рис. 5.1, а). Після відмови будь-якої однієї системи її навантаження перерозподіляються на решту L систем. Припустимо, що такий перерозподіл навантаження не впливає на надійність системи. Тоді імовірність відмови і безвідмовної роботи резервованої системи можна розрахувати за формулами:

$$Q_c(t) = \left[1 - \prod_{j=1}^N P^{(j)}(t) \right]^{L+1} = [1 - P_0(t)]^{L+1} \quad (4.24)$$

$$P_c(t) = 1 - [1 - P_0(t)]^{L+1} = 1 - \left[1 - \prod_{j=1}^N P^{(j)}(t) \right]^{L+1}, \quad (4.25)$$

де $P^{(j)}(t)$ імовірність безвідмовної роботи j -го елемента протягом часу t ; N - кількість елементів кожної $L+1$ систем; $L = K$ - кратність резервування, $P_0(t)$ - імовірність відмови основної системи (без резервування)

З урахуванням (5.23) при умові загального постійного резервування, кількість резервних систем можна розрахувати за формулою:

$$L = \frac{\lg[1 - P_c(t)]}{\lg[1 - P_0(t)]} - 1 = \frac{\lg(1 - 0,99)}{\lg(1 - 0,638)} - 1 \cong 4$$

де $P_0(t)$ - імовірність безвідмовної роботи нерезервованої системи, $P_c(t)$ - імовірність безвідмовної роботи резервованої системи.

При загальному заміщувальному резервуванні з „холодним” резервом, кратність резервування розраховується так:

$$\sum_{i=0}^L \frac{(\lambda_c t)^i}{i!} = \frac{P_c(t)}{\exp(-\lambda_c t)} = \frac{0,99}{\exp(-0,15 \cdot 10^{-4} \cdot 2000)} = 1,02$$

звідки $L = 1$.

Висновок. Виконані розрахунки підтверджують, що лише загальне заміщувальне резервування з "холодним" резервом, який складається з однієї резервної системи може забезпечити необхідну високу імовірність безвідмовної роботи автоматичної системи керування лужністю реакційної маси в реакторі для виробництва дизельного біопалива з рослинних олій.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Які види резервування технічних систем застосовують на харчових підприємствах?
2. Як впливає кратність резервування на технічні характеристики систем і їх надійність?
3. Представте порядок розрахунку показників безвідмовності послідовних і паралельних систем?
4. Опишіть порядок розрахунку комбінованих систем, які мають ділянки з послідовними і паралельними з'єднанням елементів.
5. Як розраховується імовірність безвідмовної роботи систем при резервуванні елементами, що працюють у полегшеному режимі?
6. Назвіть найбільш перспективні способи зменшення інтенсивності відмов технічних систем.
7. Чи можна підвищити надійність об'єктів і систем за рахунок зменшення часу їх безперервної роботи і часу на відновлення дієздатності?
8. Які способи резервування технічних систем є найбільш перспективними для підвищення надійності?
9. Назвіть основні види резервування та у яких випадках взагалі доцільно їх застосовувати ?
10. Дайте характеристику технологічних відмов елементів технічної системи.
11. Які основні технологічні фактори можуть змінювати надійність машин?
12. Як можна підвищити надійність складних технічних систем?
13. Як можна формувати властивості матеріалу виробів при їх виготовленні?
14. Дайте характеристику відмов, що пов'язані із недосконалістю технологічних процесів.

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

15. Як впливають параметри технологічних процесів виготовлення на зносостійкість матеріалу виробів?

16. Як впливають параметри технологічних процесів виготовлення на корозійну стійкість матеріалу виробів?

17. Як впливають параметри технологічних процесів виготовлення на втомну міцність матеріалу виробів?

18. У чому полягає явище технологічної спадковості при формуванні якості поверхні?

19. Назвіть основні фізико-механічні фактори впливу на властивості деталей машин при їх виготовленні.

20. Проведіть аналіз закономірностей зміни залишкових напруг при механічній обробці виробів

21. Проведіть аналіз закономірностей зміни залишкових напруг при термічній обробці виробів.

22. Як змінюється мікрогеометрія поверхні деталей машин при технологічному формоутворенні?

Розділ 5 ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

5.1 Механічне зміцнення поверхневим пластичним деформуванням

Серед різновидів технологічних методів зміцнення деталей завдяки широкому практичному застосуванню, високій ефективності та простоті реалізації одне із чільних місць посідають методи механічного зміцнення. Сучасний арсенал способів механічного зміцнення нараховує до 10 напрямів та 120 різновидів оздоблювально-зміцнювальних операцій, об'єднаних спільною назвою поверхнєве пластичне деформування, які дають змогу не тільки покращити мікрорельєф поверхні, а і змінити будову та властивості поверхневих шарів металу в необхідному напрямі, створити прошарки матеріалу з наперед заданими фізико-механічними властивостями і оптимальним мікрорельєфом.

Раціональний вибір способів механічного зміцнення і впровадження їх у практику машинобудування дає змогу в широких межах змінювати зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість та інші експлуатаційні властивості деталей машин.

Поверхнєве пластичне деформування - розповсюджений і ефективний спосіб підвищення несучої здатності металевих деталей машин, який переважно застосовують як кінцеву операцію.

Найвагоміший ефект від застосування ППД досягається для циклічно навантажених деталей з конструктивними (галтелі, виточки, різь, зубці, шліци тощо) або експлуатаційними (корозійні пошкодження, подряпини, надрізи тощо) концентраторами напружень. ППД ефективно також і для деталей, що зношуються під час експлуатації (напрямні верстатів та пресів, поршні, циліндри), піддаються схоплюванню та фретингу (з'єднання з гарантованим натягом, рухомі з'єднання).

Пластичне деформування поверхневих шарів виконують різноманітними способами, які умовно можна поділити на дві групи. До першої належать такі, під час яких зусилля деформування від інструмента створюється безперервним контактом з деталлю (статичні), до другої – ті, під час яких необхідна ударна дія по деталі робочих тіл або інструмента (динамічні). Незважаючи на розмаїття способів ППД, їх поєднує спільність основних процесів та впливів на стан металу оброблюваної поверхні. За різних умов оброблювання проявляються або неперервні, або дискретні особливості матеріалів.

Суть зміцнення металу під дією ППД можна пояснити так. В зоні площин ковзань подекуди спотворюється кристалічна ґратка, зокрема має місце її поворот, а також спостерігаються зміщення атомів з положення стійкої рівноваги та пружні викривлення площин зміщення. Ці спотворення викликають появу додаткових напружень, що залишаються після припинення навантаження (напруження третього роду).

Смуги ковзання розділяють кристал на дрібні частинки у вигляді пластинок, перетворюючи його в полікристал, який складається з дрібних витягнутих зерен. Підсилюється ефект блокування площин ковзання одного зерна сусідніми зернами з іншою орієнтацією кристалічної ґратки, тому ковзання, що розпочалося в одному зерні, не може вільно розвиватися далі і гальмується сусідніми зернами.

В процесі ковзання зерна полікристала витягуються в напрямку деформації, внаслідок чого створюється орієнтація тонких витягнутих зерен (текстура деформації). Збільшується дія поверхневих сил на межах зерен, що підвищує міцність полікристалів.

Під час ковзання однієї частини кристала відносно іншої на площинах ковзання виникають осколки зерен, що спричинює шорсткість поверхонь ковзання, гальмуючи подальше переміщення.

Зміна форми кристалічних зерен в процесі деформування сприяє їх

механічному зчіплюванню і ускладнює взаємне переміщення, яке спостерігається під час пластичного деформування полікристалів. Внаслідок усіх перерахованих явищ відбувається загальне зміцнення деформованого металу (наклепування).

Наклепування поверхні викликає збільшення об'єму металу, чому стають на перешкоді нижче розташовані менш наклепані шари, внаслідок чого виникають залишкові напруження першого роду, що врівноважуються в макрооб'ємах металу. Для багатьох деталей найважливішими є осьові залишкові напруження. В подальшому матимемо на увазі саме їх, вважаючи, що у поперечних перерізах деталі ці напруження сумуються з напруженнями від зовнішніх навантажень.

Отже, внаслідок зміцнення поверхневих шарів поверхневим деформуванням можна забезпечити покращення фізико-механічних властивостей металу внаслідок структурних перетворень, подрібнення зерен, а також формування в поверхневому шарі залишкових напружень стискування, що виникають за рахунок розвитку зміщень кристалічної ґратки. Експлуатаційні властивості деталей визначаються всіма цими чинниками. До цього слід додати і покращення якості поверхні, що проявляється в зменшенні висоти нерівностей та приводить до похилішої їх конфігурації, що важливо, наприклад, для поверхонь пар тертя.

5.2 Термомеханічні методи зміцнення

5.2.1 Технологічні аспекти термічної обробки

Термічні методи полягають у покращенні механо-фізичних властивостей поверхневого шару та структури матеріалу за рахунок варіювання температури, терміну витримки та швидкості охолодження виробів, що реалізуються при гартуванні, відпуску та відпалюванні серед

основних методів реалізації нагрівання. При цьому можна відзначити такі методи:

- газополуменевий;
- індукційний тобто дія електричного струму високої частоти;
- лазерний.

При регулюванні швидкості охолодження використовують такі технологічні середовища як:

- повітря;
- вода;
- олійні маси;
- солі металів KNO_3 , NaNO_3 .

В основі деяких термічних методів обробки закладені поліморфні перетворення.

5.2.2 Сутність та способи поліморфних перетворень

Поліморфні перетворення – це зміна структури, що викликана фазовими перетвореннями, які приводять до утворення нового типу кристалічної ґратки.

Розглядаючи механізм даних перетворень можна відзначити, що кожній фазі рівноваги відповідає певне упакування атомів, яке забезпечує мінімум вільної енергії. Порушення умов нестабільності утворюється внаслідок виникнення зародків нової фази, нових центрів кристалізації; при зміні енергетичного балансу; при зміні швидкості руху атомів, їх рухливості може розпочатися процес перекристалізації. Серед основних факторів, що зумовлюють дані процеси, є такі:

- термодинамічний фактор, що враховує зміну вільної енергії у системі;
- кінетичний фактор, що враховує дифузію атомів у системі.

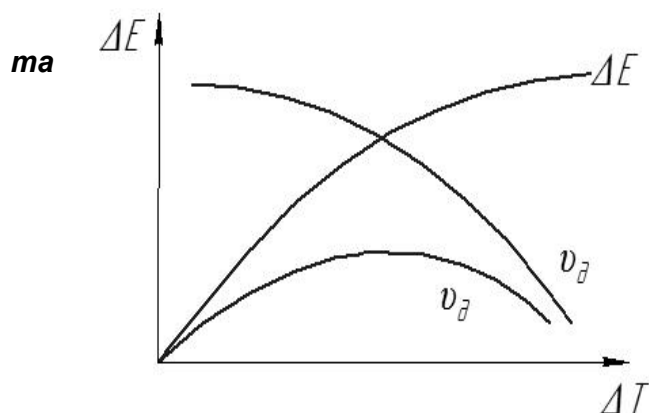


Рис. 5.1 Зміна енергетичних дифузійних характеристик від температури у ході поліморфних перетворень:

ΔE – запас вільної енергії;

ΔT – зміна температури;

v_{δ} – дифузійна швидкість атомів;

v_{ϕ} – швидкість фазового перетворення.

Зародки утворюються гомогенізацією на базі фазових флуктуацій або гетерогенізацією на базі наявних центрів кристалізації, тобто у дефектних місцях, на границях зерен, у скупченнях дислокацій, вакансій, на поверхнях включень.

При гетерогенізації поліморфне перетворення протікає по зсувовому напрямку та не залежить від температури, що називають атермічним поліморфним перетворенням.

Атермічне перетворення, а також багаторазова поліморфна трансформація реалізується в результаті циклу обробки: охолодження – нагрівання – охолодження, що призводять до збільшення кількості дефектів атомно-кристалічної будови та реалізації так званого фазового зміцнення або трансформаційного наклепу.

Гартування – термообробка для зміцнення структури матеріалу, за якої сталь нагрівається до температур, вищих за критичні, що спонукає поліморфне перетворення; з подальшим здійсненням витримки та охолодження з необхідною швидкістю.

На 1 етапі формується структура **аустеніту**, що являє собою твердий розчин проникнення вуглецю в γ -залізі з ГЦК (гранецентричною кубічною граткою); характерна висока в'язкість та твердість (HB $\rightarrow$ 170...250), вміст C до 0,8%.

На 2 етапі відбувається розпад розчину аустеніту з утворенням (залежно від швидкості охолодження) таких структур як:

- **мартенсит**, що являє собою метастабільну фазу в залізовуглецевій сталі, що характеризується найбільшою кількістю дефектів кристалічної ґратки, з підвищенням його вмісту збільшується крихкість;
- **перліт**, що становить евтектоїдну суміш зерен фериту і цементиту, та відповідає повному розпаду твердого розчину аустеніту; вміст С – 0,8 %, твердість 160 – 260 НВ; міцність $\sigma_{\text{в}} = 550 - 1300$ Мпа, пластичність до 20 %;
- **сорбіт**, який має тонкопластинчасту структуру, що отримується при гартуванні сталі способом патентування та характеризується вищою дисперсністю, ніж у перліті, а також більш високою твердістю, міцністю та пластичністю майже в оптимальному їх поєднанні;
- **троостит**, що характеризується високою пружністю, витривалістю, релаксаційною стійкістю і твердістю (ресори, пружини);
- **бейніт**, який становить фазу, що відповідає початку повного розпаду аустеніту за ізотермічного гартування.

Основними різновиди гартування є:

- з одним або двома охолоджуючими середовищами;
- ступінчасте, зокрема патентування;
- ізотермічне;
- поверхневе.

Відпуск – термообробка за температур до поліморфног оперетворення з подальшою витримкою та охолодженням для перетворення мартенситу у рівноважну структуру; зменшує напруження у поверхневому шарі, надає високу ударну в'язкість та витривалість від втоми.

Серед основних видів відпуску можна відзначити:

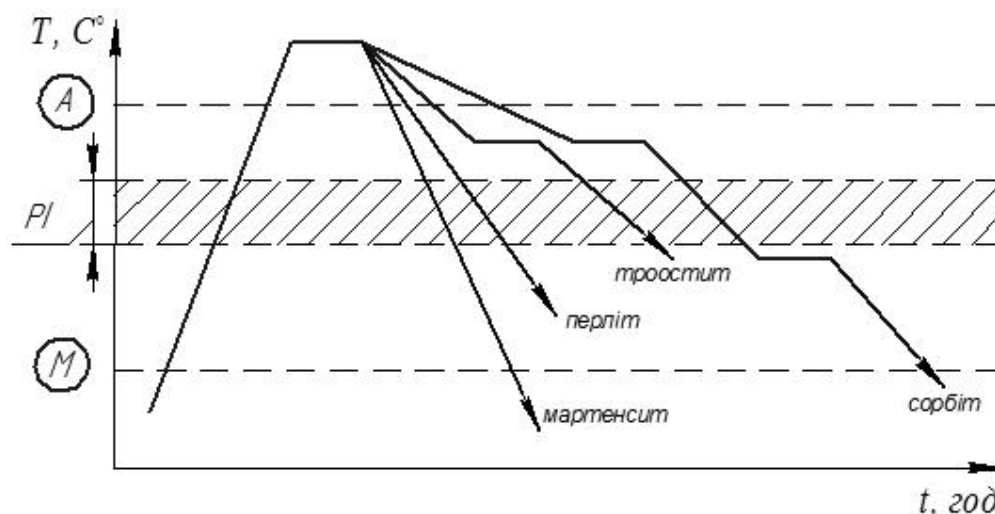


Рис. 5.2 Схеми гартування сталей:

A – рекристалізація аустеніту

M – мартенситний перехід

PI – рекристалізаційний інтервал

- низький: $\Delta T = 150 - 250 ^\circ\text{C}$; для отримання мартенситу та зменшення внутрішніх напружень;
- середній: $\Delta T = 350 - 450 ^\circ\text{C}$; для утворення трооститу та збільшення пружності, витривалості, твердості, релаксаційної стійкості матеріалу;
- високий: $\Delta T = 500 - 650 ^\circ\text{C}$; для утворення сорбіту, майже повного усунення гартівних напружень, що забезпечує високу ударну в'язкість та витривалість із задовільною міцністю та твердістю; здійснюється, як правило, після гартування.

Відпалювання – термообробка, за якої цикл нагрівання – витримка

– повільне охолодження приводить до утворення рівноважної структури.

Відпал I роду не передбачає фазових перетворень та здійснюється такими методами як:

- гомогенізувальний (одно- та багатоступінчастий) для зниження схильності до крихкості сталі $T_p = 1110 - 1200 ^\circ\text{C}$, витримка 15

– 20 год, охолодження на повітрі; для покращення пластичності (при реалізації ступінчатого циклу);

— рекристалізаційний: нагрівання до температури початку рекристалізації для усунення наклепу та отримання заданої величини зерна $T_p = 680 - 700$ °С, витримка 0,5 – 1,5 год., що дозволяє зменшити міцність і твердість, підвищити пластичність;

— віднапружувальний: $t = 550 - 650$ °С для повного зняття внутрішніх залишкових напружень.

Відпал II роду здійснюється шляхом нагрівання до температур, вищих за критичні, витримання, повільного охолодження та класифікується на:

— повний для обробки сталі із вмістом вуглецю 0,3 – 0,4%;

— ізотермічний, що здійснюється при $t = 660 - 680$ °С, передбачає витримку 3 – 6 год. для повного розпаду аустеніту, прискорене охолодження на повітрі, що дозволяє досягнути підвищення однорідності структури;

— неповний або сфероїдальний відпал, для отримання зернистої форми перліту; при мінімальній температурі перекристалізації;

— нормалізований відпал (нормалізація), для якого характерна повна фазова перекристалізація, усувається грубозерниста структура, $t >$ на 40 – 50 °С ніж кристалічна; підвищується міцність і в'язкість, виправляється структура, зменшуються внутрішні напруження.

5.2.3 Технологічні аспекти термомеханічної обробки

Збільшити реальну міцність й, зокрема, опір пластичному деформуванню можна двома діаметрально протилежними шляхами.

Перший полягає у створенні матеріалів з гранично низькою густиною дефектів, тобто практично бездефектних. Сучасною лабораторною технікою освоєно виготовлення таких матеріалів у вигляді

тонких ниткоподібних кристалів (вусів) ультрависокої міцності.

Другий шлях зміцнення матеріалів - збільшення густини дефектів кристалів, у першу чергу, дислокацій - ґрунтується на застосуванні різноманітних оброблень. Зміцнення в цьому разі спрямоване на збільшення опору ґратки зовнішнім навантаженням, що зумовлене наближенням механізму відносного переміщення атомних площин до моделі жорсткого, тобто синхронного, зміщення.

Внаслідок високотемпературної пластичної деформації матеріалу, наприклад, аустеніту, створюється структура з вищою загальною густиною недосконалостей - мартенсит. Оскільки аустеніт перетворюється у мартенсит бездифузійно, то дефекти повинні якось успадковуватись мартенситом, у якого, очевидно, в зв'язку з цим збільшаться міцність і пластичність. Крім цього, саме мартенситне перетворення зумовлює рівномірніший розподіл дефектів, утворених під час деформації.

Термомеханічним обробленням (ТМО) називатимемо технологічний процес, а якому суміщуються термооброблення й деформація матеріалу з метою зміни його фізичних (насамперед механічних) властивостей.

5.2.3.1 Класифікація методів термомеханічної обробки

Розрізняють 5 класів термомеханічного оброблення матеріалів (табл. 5.1). 1-й клас охоплює всі види термомеханічних оброблювань сталі та сплавів, під час яких матеріал деформується у високотемпературній фазі перед поліморфним перетворенням. Цей клас оброблювань тепер найпоширеніший завдяки високим механічним характеристикам отримуваних після нього матеріалів.

До I-го класу за цим визначенням належить, насамперед, звичайне гаряче оброблення (вид А), що здавна застосовується як засіб

формоутворення у металургії та машинобудуванні. Таке оброблення супроводжується, як правило, частковою або повною рекристалізацією матеріалу в умовах повільного остигання на повітрі. Хоч гаряче оброблення призначене, в основному, для технологічних потреб і не використовується спеціально для поліпшення механічних властивостей, проте вони можуть покращуватись внаслідок зменшення розміру зерен, якщо правильно вибрані параметри формозмінення та охолодження.

Таблиця 5.1

Класифікація термомеханічних методів оброблення сталі та сплавів

Клас оброблення	Вид	Коротка характеристика виду оброблення
I клас. Термомеханічне оброблення із застосуванням деформації до поліморфного перетворення	А	Звичайне гаряче оброблення
	Б	Високотемпературне
	В	термомеханічне оброблення (ВТМО)
	Г	Низькотемпературне
		термомеханічне оброблення (НТМО)
	Д Е	Комбіноване або суміщене термомеханічне оброблення (ВНТМО)
		Термомеханомагнітне оброблення Термовібромеханічне оброблення (ТВМО)
II клас. Термомеханічне оброблення з деформацією після поліморфного перетворення	Є	Деформація невідпущеного мартенситу з наступним
	Ж	відпусканням
	З	Деформація немартенсистих продуктів розпаду, зокрема патентування (ПДО)

		Деформація відпущеного мартенситу з наступним старінням
III клас. Термомеханічне оброблення аустенітних сталей та жаростійких сплавів, які не піддаються поліморфному перетворенню	I Й К	Низькотемпературне механотермічне оброблення (НМТО) Механотермічне оброблення (МТО) Високотемпературне термомеханічне оброблення
IV клас. Термомеханічне оброблення з деформацією під час поліморфного перетворення	Л М	Оброблення з деформацією під час мартенситного перетворення Оброблення з деформацією під час перетворення в ферито-карбідний стан
V клас. Комбіновані методи оброблення	О	Оброблення з деформацією до і після поліморфного перетворення

Високотемпературне термомеханічне оброблення - ВТМО (табл. 5.1) - застосовується для підвищення й покращання механічних властивостей гартівних сталей та сплавів. Після аустенізації за температури вище від точки $A_{с3}$ інтенсивно деформується сталь із наступним швидким гартуванням на мартенсит. Оброблення закінчується низьким відпусканням. Щоб одержати максимальні механічні властивості, необхідно підібрати такі температурні деформації, ступінь формозмінення та швидкість охолодження, які запобігають рекристалізації аустеніту. ВТМО є ефективним засобом зміцнення сталей, а також підвищення їх пластичності. Воно усуває відпускну

крихкість й може застосовуватись для всіх гартівних (зокрема й простих) вуглецевих сталей.

Низькотемпературне термомеханічне оброблення – НТМО полягає у деформації сталей у стані переохолодженого аустеніту за температур, нижчих від порога рекристалізації, з наступним швидким охолодженням на мартенсит (інколи бейніт). Закінчується воно відпусканням за температур, не вищих від температури попередньої деформації матеріалу, НТМО може застосовуватись тільки для сталей із значними осередками стійкого метастабільного аустеніту, що забезпечується відповідним легуванням. НТМО зі значним формозміненням дає змогу досягти рекордно високих значень статичної міцності ($\sigma_B=3,5 \text{ кН/мм}^2$) і задовільної пластичності ($\varphi>30 \%$).

Зовсім недавно успішно закінчено спроби поєднати в одному технологічному процесі високо- й низькотемпературне оброблення. Це так зване комбіноване, або суміщене, термомеханічне оброблення - ВНТМО (вид Г). Таке оброблення можливе, звичайно, тільки для сталей з високою стійкістю переохолодженого аустеніту. Воно полягає у двоступеневому деформуванні аустеніту (спочатку високотемпературному, а потім метастабільному), охолодженні та відпусканні. Оброблення забезпечує вищі порівняно з НТМО значення міцності з одночасним збереженням високої пластичності матеріалу.

Термомеханомагнітне оброблення (вид Д) є різновидністю термомеханічного оброблення, під час якого гартування або відпускання сталі відбувається у магнітному полі, створюваному потужними електромагнітами. Воно виникло на основі термомагнітного оброблення, яке полягає у термічному обробленні (гартуванні та відпусканні) у магнітному полі.

Термовібромеханічне оброблення - ТВМО (вид Е) - полягає, на відміну від перерахованих вище видів ТМО, у застосуванні не значної

однобічної пластичної деформації, а циклічної знакозмінної пластичної деформації невеликої амплітуди. Матеріал підлягає такому оброблюванню в аустенітному стані протягом певного часу, з наступним гартуванням та відпусканням. Таке оброблення не супроводжується зміною форми оброблюваної заготовки й може використовуватись як засіб зміцнення у двох варіантах: високо- й низькотемпературному.

До II-го класу належать всі види оброблювань, в процесі яких деформація відбувається після поліморфного перетворення. Він охоплює велику групу технологій, які розвиваються особливо активно протягом останніх років і можуть застосовуватись для багатьох типів сталей - від простих маловуглецевих і до високолегованих.

Суть оброблювань цього класу полягає у підвищенні механічних характеристик сталі внаслідок деформаційного зміцнення, а також частково за рахунок старіння, стимульованого деформацією. Деформаційно зміцнити можна невідпущений мартенсит, який згодом повинен бути відпущений (вид Є), або відпущений мартенсит, що проходить старіння (вид З). Це оброблення супроводжується лише незначною деформацією (у декілька відсотків), тоді як під час оброблень I-го класу вона досить значна. На відповідних сталях цими оброблюваннями можна досягти різкого підвищення меж текучості та міцності з певним зниженням пластичності. Досліджуються також оброблення із застосуванням деформації немартенситних продуктів розпаду аустеніту (вид Ж). Згідно з прийнятою класифікацією, у останній вид оброблення входить також і широковідоме виготовлення надміцного дроту - патентування (ПДО).

III-й клас охоплює види термомеханічних оброблень сталей, непридатних для поліморфного перетворення - це, в першу чергу, аустенітні сталі та жаростійкі сплави. Мета таких оброблень полягає в підвищенні тривалої міцності та інших механічних властивостей за

робочих температур, які не перевищують температури рекристалізації.

Перша різновидність оброблень цього класу – низькотемпературне механотермічне оброблення (НМТО) (вид І) - полягає в пластичному деформуванні сталі на декілька відсотків за кімнатної температури з наступним нагріванням до робочих температур (нижчих від температури рекристалізації) для утворення у матеріалі полігональних структур, які забезпечують підвищення тривалої міцності.

Якщо пластична деформація і подальша полігонізація відбуваються за підвищених температур (декілька сот градусів), процес називають механотермічним обробленням (МТО) - (вид Й). Після оброблень видів І та Й не допускається нагрівання матеріалу до температури рекристалізації, за якої істотно послаблюється полігональна структура матеріалу.

В цьому класі чи не найбільш заслуговує на увагу високотемпературне термомеханічне оброблення (ВТМО) - (вид К), що є дійовим засобом підвищення жаростійкості багатьох аустенітних сталей. Сталь нагрівають до температур, які забезпечують гомогенізацію твердого розчину (для більшості аустенітних сталей 1200 °С), охолоджують до нижчих температур (900-1000 °С), за яких відбувається деформація на 25-30 %. Наступне охолодження фіксує в сталі дисперсну структуру, в якій під час старіння випадають карбідні й інтерметалідні фази, що зміцнюють, у першу чергу, межі зерен та субструктури.

IV-й клас оброблень полягає у деформуванні матеріалу під час поліморфного перетворення. До нього можна віднести, наприклад, оброблення нестаріючих і дисперснозатвердівальних нержавіючих сталей, для яких перша деформація стимулює мартенситне перетворення, а друга зміцнює мартенсит (вид Л). Таке оброблення застосовується також для сталей, які перетворюють у ферито-карбідний стан (вид М). Міра зміцнення істотно залежить від температури

аустенізації, ступеня деформації й безпосередньо від хімічного складу сплаву.

Застосовуються також комбіновані процеси, які містять елементи двох класів. Прикладами може бути зміцнення за схемами НТМО або ВТМО – холодна деформація мартенситу. Такі процеси належать до V-го класу оброблень.

Методи термомеханічного оброблювання за типом механічного впливу поділяють на 5 типів (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

Класифікація методів ТМО за типом механічного впливу

<i>Тип механічного впливу</i>	<i>Спосіб деформування</i>	<i>Види оброблення, в яких застосовується даний тип механічного впливу</i>
Тип 1. Значна наскрізна деформація за допомогою інтенсивних давильно-обтискувальних операцій	Прокатка, кування, волочіння, штампування, висаджування, згин, стиск тощо	Б В Г Д К О
Тип 2. Наскрізна або глибинна пластична деформація з незначною зміною або без зміни форми та розмірів	Розтягування, кручення, згинання, стискання	Усі види оброблень I-го класу Усі види оброблень II-го класу Усі види оброблень III-го класу
Тип 3. Поверхнєве оброблення	Механічне оброблення різцем, обкочування роликami, обдування дробом, віброударна деформація	Б В Усі види оброблення II-го класу З

Тип 4. Вібраційна пружно-пластична деформація	Циклічне кручення, циклічне розтягування – тискання, циклічне згинання	Е
Тип 5. Оброблення вибухом та ударними навантаженнями	Оброблення ударними хвилями, вибухове формоутворення	Б В Усі види оброблення II-го класу

Розглянемо детальніше деякі види оброблення сталей, зокрема НТМО і ВТМО.

5.2.3.2 Низькотемпературне термомеханічне оброблення

На рис. 5.3 показано принципову технологічну схему НТМО. Послідовність операцій НТМО така: аустенізація сталі нагріванням вище від точки $A_{сз}$ до температур, які забезпечують повне розчинення карбідів; охолодження сталі до температур стійкого переохолодженого аустеніту, які повинні бути нижчими від температури порога рекристалізації; інтенсивна пластична деформація метастабільного аустеніту з обтисканням на $\varepsilon=70...99\%$; негайне гартування в охолодженому агенті (залежно від марки сталі - вода, масло, повітря тощо); відпускання, як правило, низькотемпературне, до температур, нижчих від температури деформації метастабільного аустеніту.

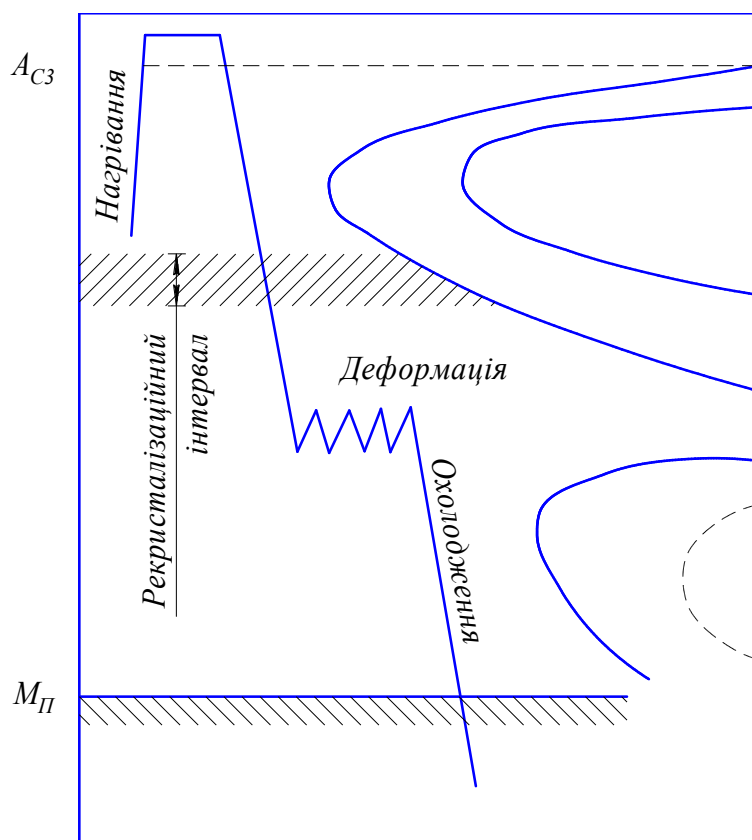


Рис. 5.3 Технологічна схема низькотемпературного термомеханічного оброблення

Як видно з наведеної технологічної схеми, НТМО можна застосувати тільки для сталей з широкою зоною стійкості переохолодженого аустеніту. Це, в першу чергу, сталі, леговані достатньою мірою хромом, нікелем, молібденом, ванадієм та іншими елементами.

Згідно з широко відомими даними, статична міцність конструкційних сталей після НТМО, може збільшитись до значення $\sigma_B = 3,5 \text{ кН/мм}^2$, якщо пластичність $\psi = 30\%$. Привертає увагу великий приріст опору сталі пластичним деформаціям, який характеризується значеннями коефіцієнта $K = \sigma_S / \sigma_B = 0,8 \dots 0,9$, що зберігаються в матеріалі після низького, а інколи й після середнього відпускання до температур $400\text{--}500^\circ\text{C}$.

НТМО збільшує втомну міцність сталей. Так, зокрема, за

допомогою НТМО було підвищено втомну міцність високоміцної інструментальної сталі Н-11 на 25%. Гранична витривалість цієї сталі під дією циклічного навантаження збільшилась в деяких випадках внаслідок НТМО на порядок порівняно із звичайним термообробленням. Одночасно з втомною міцністю під час НТМО різко зростає границя пружності, а це створює перспективи для НТМО як способу виготовлення пружинних елементів, зокрема підвісок, торсіонів, ресор.

5.2.3.3 Високотемпературне термомеханічне оброблення (ВТМО)

ВТМО сталей, які підлягають мартенситному перетворенню, відбувається за такою схемою (рис. 5.4):

- аустенізація сталі нагріванням вище від точки $A_{с3}$ до температури повного розчинення карбідів; інтенсивна пластична деформація високотемпературної аустенітної фази при температурах, близьких до $A_{с3}$ (якщо розчинення карбідів у сталі вимагає значного підвищення температури перед деформацією, бажано охолодити сталь до температури $A_{с3} + \Delta t$, де Δt - перепад температур, на який охолоне сталь за період між вийманням заготовки з печі й зануренням її в гартувальний агент);

- негайне гартування (вода, олія, повітря тощо);
- низьке відпускання при температурах, як правило, не вищих від 250 °С.

ВТМО сталей та сплавів, яким не властиве фазове перетворення, здійснюється за аналогічною схемою. Сплави деформуються за температур, вищих від температури рекристалізації, і їх негайно охолоджують, щоб запобігти рекристалізації. Оброблення закінчується відпусканням або старінням сплавів.

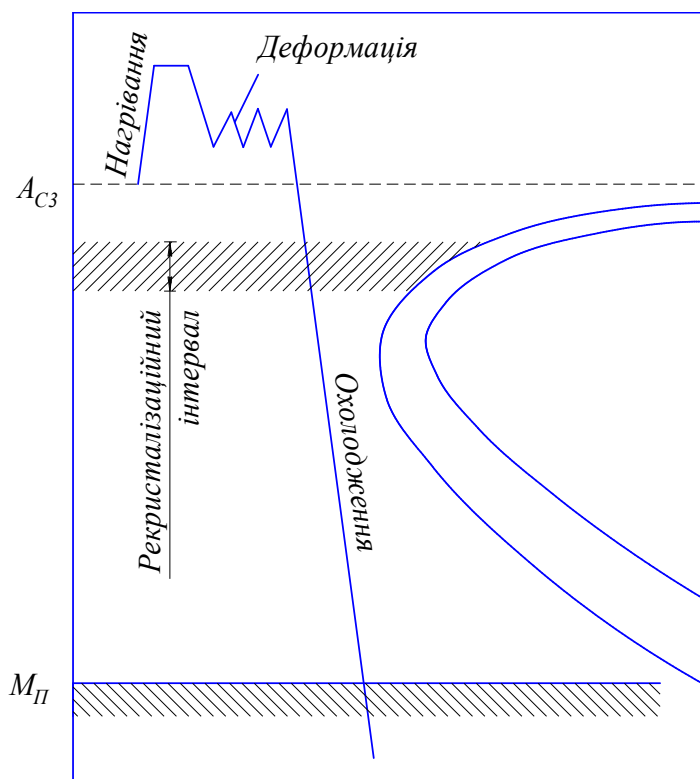


Рис. 5.4 Технологічна схема високотемпературного термомеханічного оброблення

ВТМО сталей, які гартуються на мартенсит, істотно підвищує їх міцність (до значення, $\sigma_B = 2,8 \text{ кН/мм}^2$). Однак найважливішою особливістю зміцнених сталей, як вказувалось вище, є значне підвищення пластичності ($\psi = 30 \dots 40 \%$), що робить їх придатними для широкого застосування у машинобудуванні. Отже, знижується чутливість сталей до концентраторів напружень, а також істотно підвищується втомна міцність. Велике значення має вплив ВТМО на відпускну крихкість сталей. Роботами В.Д. Садовського, Е.Н. Осколкова та ін. було показано, що за допомогою ВТМО можна ослабити, а інколи повністю усунути відпускну крихкість сталей, як зворотну, так і незворотну. Це пов'язано зі зміною характеру руйнування від інтеркристалітного, властивого для стану окрихчення відпусканням, до транскристалітного після оброблення.

5.3 Фізичні способи зміцнення

5.3.1 Використання фізичних ефектів та процесів

5.3.1.1 Зміцнення лазерним променем та електронно-променеве оброблювання

Прикладом комбінованих способів оброблення ППД, що базуються на поєднанні зміцнення із електрофізичним впливом, є зміцнення обкочуванням під час проходження крізь деформувальний ролик лазерного випромінювання. Лазерне випромінювання широко застосовується для зміцнення деталей. Так, цим способом зміцнення можна змінювати властивості різних ділянок деталі, виготовленої із недорогого конструкційного матеріалу і забезпечувати унікальні характеристики міцності, зносо- і корозійної стійкості.

Випромінювання оптичних квантових генераторів (ОКГ) впливає на невеликий об'єм поверхні металу нетривалий час. Температурний режим нагрівання визначається випромінюваністю лазера. Якщо випромінюваність низька (приблизно до 10^3 - 10^4 Вт/см²), метал нагрівається без плавлення і випаровування. Із зростанням цього значення до 10^6 - 10^8 Вт/см² матеріал плавиться, а якщо випромінюваність перевищує 10^6 - 10^7 Вт/см², він руйнується внаслідок випаровування.

Процеси, що відбуваються у металі під дією випромінювання, залежать не тільки від випромінюваності, але й від тривалості впливу на матеріал. Регулюючи ці дві характеристики випромінювання, можна створити енергетичні умови, за яких відбувається зміцнення внаслідок структурних перетворень або лазерного шокowego деформування.

Швидкість нагрівання під час лазерного опромінення матеріалів досить висока (до 10^5 – 10^6 °C/с). За дуже короткий час невеликі ділянки поверхні деталі встигають нагрітися до високих температур, перегрітися і розплавитися. У перегрітому металі домішки, які містилися у вигляді

фазових включень, розчиняються. Оскільки час нагрівання, товщина розплавленого шару і ступінь прогрівання матеріалу дуже малі, то має місце висока швидкість охолодження (10^6 °C/c) та кристалізації рідкого шару. Внаслідок цього утворюються надзагартовані зони (білі шари), характерні і для інших видів швидкісного нагрівання (електронним променем, електроіскровим впливом, вибуховою дією тощо.). Такі зони погано травляться звичайними травильниками, мають високу поверхневу твердість мілку кристалічну структуру і містять високотемпературні фази.

Якщо для зміцнення, матеріалів використовувати сканувальний лазерний промінь з високою швидкістю переміщення відносно оброблюваної поверхні, то розплавляється тільки дуже тонкий шар металу. Швидкість гартування іноді досягає 10^8 °C/c, внаслідок чого на поверхні деталі можуть виникати практично аморфні ділянки, з підвищеною зносостійкістю. ОКГ, що працюють в режимі модульованої добротності, дають змогу одержувати випромінювання великої пікової потужності, яке утворює на поверхні фокусування випромінюваності $10^8... 10^{12}$ Вт/см² з тривалістю імпульсу $10^{-6}... 10^{-9}$ с.

Поверхневий шар металу під дією лазерного опромінення переходить в стан плазми. Під час її розширення утворюється ударна хвиля, тиск якої може досягати дуже великого значення. Поширюючись в глибину металу, ударна хвиля призводить до незворотних процесів, викликаючи пластичну деформацію, наслідком чого є шокове лазерне зміцнення. Лазерне зміцнення має низку особливостей, що відрізняють його від інших способів зміцнення. До них належить локальність зміцнення, можливість отримати на поверхні матеріалу шар із заданими властивостями, вводячи легувальні елементи, а також змінити властивості металу у важкодоступних для оброблювання місцях. Лазерне зміцнення можна застосовувати як фінішну операцію, оскільки воно не супроводжується коробленням, завдяки чому можна отримати

задану шорсткість поверхні.

Обробляють поверхневий шар за допомогою ОКГ на промисловій технологічній установці "Квант-16". Зміцнюються відсікальні кромки паливних pomp, обкочувальні кулачкові ролики, розподільні вали двигунів внутрішнього згоряння, а також кромки інструментального спорядження.

Випробування зміцнених штампів у реальних умовах виробництва показали значне збільшення їх стійкості (в 5-7 разів).

Перспективним є поєднання лазерного оброблювання із ППД, яке дає змогу підвищити фізико-механічні параметри та покращити мікрорельєф поверхні. У пристрій для такого комбінованого оброблювання (рис. 5.5) входить корпус 4, що закріплений на супорті верстата. В отворі супорта на фторопластовому підп'ятнику 5 встановлено деформувальний елемент – кульку 6, виготовлену із прозорого для лазерного випромінювання матеріалу. Між кулькою 6 і встановленим на корпусі 4 випромінювачем - лазерним генератором 3 розміщена від'ємна лінза 1. Механізм навантаження кульки виконано у вигляді пружини 2, яка встановлена в корпусі 4. Центр деформувальної кульки розміщений на оптичній осі лінзи. Необхідна щільність світлового потоку в зоні контакту кульки і деталі 7, що забезпечує нагрівання до температури 1100-1200 °С і можливість змінювати розміри плями нагрівання поверхні, а відповідно, розміри і форму мікрорельєфу, під час імпульсної роботи генератора досягається зміщенням лінзи. Розташування фокальної площини і розміри зони, яку підігрівають, визначаються фокусною віддаллю від'ємної лінзи та її розміщенням відносно кульки. Швидке охолодження місця контакту внаслідок інтенсивного вбирання тепла основною масою металу забезпечує зміцнення поверхні.

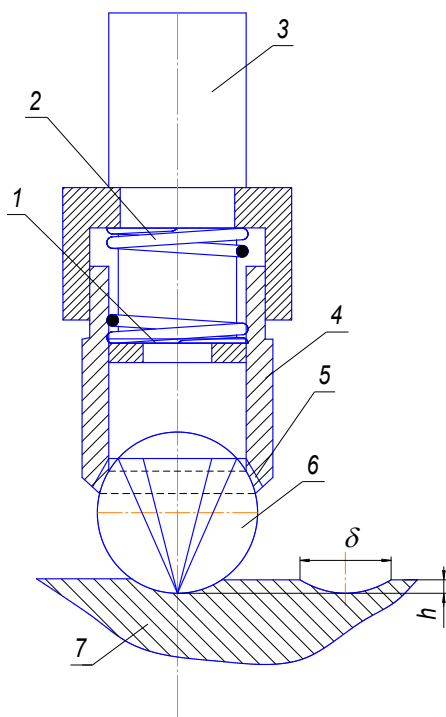


Рис. 5.5 Пристрій для комбінованого оброблення накочуванням в поєднанні із лазерним опромінюванням:

**1 - від'ємна лінза; 2 - пружина; 3 - лазерний генератор; 4 - корпус;
5 - під'ятник; 6 - кулька; 7 - оброблювана поверхня**

Корпус із деформувальною кулькою встановлюється на оброблювану поверхню, після чого пружиною 2 створюється певний натяг, що дорівнює зусиллю накочування, і вмикається випромінювач лазерного генератора із одночасним рухом кулькової головки вздовж оброблюваної деталі. Поперечне подання стола дає змогу отримати мікрорельєф по всій ширині оброблювання. Якщо підібрані відповідні режими роботи і зусилля деформування становить 100 Н, найпридатнішим з погляду зносостійкості є частково регулярний мікрорельєф із шаховим розміщенням зміцнених мікрозаглиблень, довжина яких 0,5-0,6 мм, глибина 0,0015 мм, висота напливів по краях 0.0003 мм. Отримання такого мікрорельєфу на деталях із цементованої та гартованої до HRC 60-62 сталі 20X з вихідною шорсткістю поверхні $R_a=0,16\ldots 0,08$ мкм підвищило в 1,5 рази зносостійкість поверхні порівняно із шліфованою.

Крім лазерних застосовують електронно-променеві установки. Оброблювання електронним променем базується на використанні теплової енергії, яка виділяється внаслідок співударяння електронів, що швидко рухаються, з поверхнею оброблюваної деталі. Для установок електронно-променевого оброблювання необхідні напруги у 60-150 кВ.

Робоча ширина променя змінюється від 3 до 30 мкм, а питома потужність енергії в плямі може досягати 10^8 Вт/см².

Собівартість електронно-променевого оброблення і зміцнення із застосуванням лазерів потужністю до 5 кВт є однаковою, але лазерний промінь порівняно із електронним має низку переваг: не потребує утворення вакууму в зоні оброблювання, внаслідок чого випромінення можна передавати на великі відстані; не спотворюється магнітними полями; може бути транспортований за допомогою простих оптичних систем; не є джерелом рентгенівського випромінення.

Головна мета *лазерної обробки* — підвищення твердості поверхні матеріалів внаслідок зміни їх структури. При нагріванні лазерним променем в поверхневих шарах деталей з вуглецевих сталей формується зона у вигляді стовбчастих кристалів з структурою мартенситу та залишкового аустеніту. Вона виникає внаслідок високих швидкостей нагрівання та охолодження, які перевищують критичну. Одержана структура має високу зносостійкість і опір корозії.

Методи обробки поверхні деталей за допомогою лазерного променя можна розділити на чотири групи: поверхнєве зміцнення, лазерне легування, загартування, глянцювання. Найбільш ефективно лазерне зміцнення вуглецевих сталей, на поверхні яких глибина зміцненого шару досягає 100...150 мкм.

Перевагами лазерної термообробки є: метод дозволяє забезпечити локальний вплив на поверхню без спеціального охолодження; після зміцнення не потрібна додаткова обробка; можна проводити вибіркову

обробку тонких поверхонь. Лазерне загартування забезпечує підвищення зносостійкості деталей з вуглецевих сталей в 2...5 разів. Наприклад, лазерне загартування молотків подрібнювачів млинів МД-300 та МД-600 дозволило збільшити їх втомлювальну міцність та зносостійкість, внаслідок чого, строк їх служби подвоївся.

Недоліками лазерного оброблення є висока вартість обладнання, необхідність дотримання суворих санітарно-гігієнічних та екологічних вимог.

5.3.1.2 Зміцнення способами іонно-плазмового оброблювання

Під час іонно-плазмового зміцнення метал для покриття у вакуумі послідовно перетворюють на газ, пару, іонізовану пару і плазму й осаджують в атмосфері реакційного або нейтрального газу на зміцнювану поверхню у вигляді конденсату. Різновидами іонно-плазмового зміцнення є термічне випаровування, катодне та іонно-плазмове розпилення і катодно-іонне бомбардування поверхні іонами речовини, що осаджується. Способи суттєво відрізняються якістю утворюваної плазми та наявністю у плазмі нейтральної або зарядженої іонізованої складової.

Як реакційний газ під час зміцнення використовують вуглець або азот. Відповідно покриття складається з нітритних або карбідних сполук тугоплавких металів. Термічне випаровування може відбуватись в безокислювальній атмосфері нейтральних газів або у повітряному середовищі. Іонно-плазмове оброблення здійснюють переважно у вакуумних установках.

Основні чинники, що визначають час експлуатації поверхонь з покриттями:

- матеріал основи, що забезпечує міцність, опір тепловому удару та деформації;

- з'єднання між покриттям та основою;
- матеріал покриття (найрозповсюдженішими є карбід титану TiC, нітрид титану TiN; оксид алюмінію Al₂O₃);
- товщина покриття (досить тонке покриття має поганий опір зношуванню, досить товсте - сколюється);
- якість підготовки поверхні.

Іонно-плазмове зміцнення застосовують для підвищення зносостійкості інструментів, а також відповідальних сталевих деталей машин, що працюють в умовах високих температур та агресивних середовищ, а також в умовах адгезійного та дифузійного зношування.

Розглянемо осадження покриття способом катодно-іонного бомбардування у вакуумі (КІВ). Використовується воно для зміцнення деталей машин, технологічного обладнання та інструментів, виготовлених із конструкційних та інструментальних матеріалів, зокрема твердих сплавів та швидкорізальних сталей. Під час оброблення на поверхні осаджують тонкоплівкові зносостійкі покриття.

Суть способу полягає в розпиленні тугоплавкого металу катода, утворенні іонів у низькотемпературній плазмі й бомбардуванні ними зміцнюваної поверхні. Матеріал катода (який напилюється) випаровується у вигляді високошвидкісних струменів (швидкість 1×10^6 см/хв), в яких містяться як заряджені, так і нейтральні частинки. Струмені складаються із плазмових потоків атомів та іонів з високим ступенем іонізації.

Деталь (анод) ставлять на шляху плазмових потоків і подають на неї від'ємний потенціал, що прискорює потік іонів. Вибиті з катода атоми розганяються до високих швидкостей, бомбардують поверхню анода, очищають її, входять в кристалові ґратки поверхневого шару і , накопичуючись та конденсуючись, утворюють на деталі мікроплівку осаджуваної речовини,

Спосіб дає змогу утворювати металеві зносостійкі покриття, які складаються з хімічних сполук - карбідів, нітридів, оксидів, карбонітридів та з тугоплавких металів (Ti, Mo, Cr, W, V тощо), а також багат шарові й багатоскладові (композиційні) покриття.

5.3.1.3 Зміцнення наплавлюванням

Зміцнення наплавлюванням підвищує стійкість деталей проти абразивного зношування, електрохімічної корозії, ерозії, кавітаційного руйнування, окалиноутворення, термічної й контактної втоми, дає змогу замінити високолеговані сталі вуглецевими, а кольорові метали – чорними. Методи наплавлювання використовують для відновлення й одночасно для зміцнення деталей, які відпрацювали у вузлах автомобілів, тракторів та інших машин.

Найрозповсюдженіші такі способи наплавлювання:

- наплавлювання під шаром флюсу;
- вібродугове наплавлювання;
- наплавлювання в середовищі діоксиду вуглецю;
- наплавлювання порошкового дроту без флюсового або газового захисту;
- плазмове наплавлювання.

Деталі, що підлягають наплавлюванню, ретельно очищають від оксидів, бруду, олії, іржі та фарби. Наплавлюють метал на очищену поверхню. Канавки, пази й отвори, що треба зберегти, закривають мідними, графітовими або вугільними вставками. Технічні характеристики обладнання для наплавлювання в середовищі діоксиду вуглецю наведено у табл. 5.3.

Під час наплавлювання спостерігаються високі швидкості розплавлення і застигання розплаву та значна інтенсивність хімічних та термохімічних процесів. Якість наплавленого шару залежить від

умов

Таблиця 5.3

**Технічні характеристики для наплавлювання в середовищі
діоксиду вуглецю**

Модель обладна- ння	Зварювальний струм, А		Електродний дріт		Модель джерела живлення
	Номіналь- не значення	межі регулю- вання	діаметр, мм	швидкість подачі, м/г	
A-547У	250	60-300	0,8-1,2	100-340	ВС-300
A-825М	300	80-300	0,8-1,2	120-620	ВСЖ-303
ПДПГ- 5000	500	50-500	0,8-2,0	150-720	ПСГ-500-1

роботи деталей й допустимого зношування поверхонь. Для деталей, що працюють в умовах тертя, товщина наплавленого шару не повинна перевищувати 4 мм, а в умовах невеликих ударних навантажень – 2 мм, якщо твердість наплавленого шару HRC 45-46, а теплостійкість -1000-3000°C.

Вирішальне значення для отримання необхідних експлуатаційних властивостей деталей мають правильний вибір наплавлюваного матеріалу і способу його нанесення. Так, для зниження інтенсивності абразивного зношування необхідне максимальне підвищення твердості деталей, для усунення теплового зношування - збільшення теплостійкості, а для запобігання пошкодженням внаслідок схоплювання необхідне наплавлювання матеріалом, що має малу схильність до схоплювання, а також здатність утворювати міцні плівки оксидів.

Розглянемо детальніше наплавлювання порошкового дроту.

Наплавлювання виконують під шаром флюсу або в середовищі захисного газу, але, якщо у дріт введені відповідні компоненти, можливе наплавлювання і без флюсового чи газового захисту. Широко використовується порошковий дріт, в складі якого є ферохром, феротитан, феромарганець, графітові та залізні порошки.

Порошковий дріт виготовляють на спеціальних верстатах способом волочіння. Вихідними матеріалами є стрічка з низьковуглецевої сталі й порошок, що містить необхідні складові елементи. Використовують два типи порошкового дроту: для наплавлювання під флюсом і для наплавлювання відкритою дугою без допоміжного захисту.

5.3.1.4 Зміцнення способами електроіскрового оброблення

Суть способу полягає у легуванні поверхневого шару виробу (катода) матеріалом електрода (анода) з використанням електроіскрового розряду в повітряному середовищі.

Внаслідок хімічних реакцій легувального матеріалу з дисоційованим атомарним азотом і вуглецем повітря, а також з металом деталі у поверхневих шарах виникають загартовані структури і складні хімічні сполуки (високодисперсні нітриди, карбонітриди і карбіди). Утворюється дифузійний зміцнений шар, який має високі твердість і зносостійкість. Він складається з верхнього білого шару, що не травиться, і нижнього перехідного дифузійного шару із змінною концентрацією легувальних домішок і карбіду. Нижній перехідний шар має сильнозмінну вихідну структуру, що поступово переходить в структуру основного металу. Здебільшого глибина нижнього шару дещо більша від глибини верхнього білого шару у зв'язку з наявністю дифузійного шару в зміцненому металі. Можливе багат шарове зміцнення, зокрема і з утворенням різнолегованих шарів.

Електроіскровому зміцненню піддають поверхні деталей машин та

механізмів типу напрямних, клинців, кулачків, фіксаторів, притискачів, шпонкових пазів, шліців, отворів корпусних деталей, виготовлених з конструктивних легованих та вуглецевих сталей (табл. 5.4).

Деталі, інструменти і технологічне обладнання, яке проходить електроіскрове зміцнення, попередньо підготовляють: заточують різальний інструмент, знімають бруд,пил, іржу, задирки із зміцнюваних поверхонь та кромek деталей. Шорсткість зміцнюваної поверхні R_z не повинна бути вищою за 80 мкм. Перед початком роботи вібратор і апарат регулюють відповідно до прийнятих режимів оброблення. Після увімкнення апарата електроди входять в контакт один з одним, а потім зміцнювальний електрод рухається відносно зміцнюваної поверхні. Тиск на вібраторі підтримується постійним.

5.3.1.5 Ультразвукове зміцнення

Останнім часом широко застосовується спосіб ультразвукового деформаційного зміцнення (УЗДЗ), сталевими кульками, що приводяться в рух стінками робочої камери, яка коливається із ультразвуковою частотою від спеціального ультразвукового пристрою. Характерною особливістю, яка відрізняє УЗДЗ від інших способів зміцнення, є "м'якість" оброблювання через відносно малу енергію удару кульки, повтореного багаторазово, що дає можливість зміцнювати тонкостінні деталі із мінімальною зміною геометрії після зміцнення. За допомогою УЗДЗ можливе як місцеве, так і об'ємне зміцнення. В останньому випадку деталь обробляється з усіх сторін одночасно, що знижує ймовірність поводок.

Встановлено, що УЗДЗ підвищує довговічність деталей у декілька разів внаслідок пізнішого утворення початкової макротріщини. Цьому сприяє рівномірний розподіл дислокацій у зміцненому шарі, у якому

відсутні піки внутрішніх напружень, що є потенційними місцями зародження тріщин втоми.

На застосуванні ультразвуку базується комбінований спосіб ультразвукового віброобкочування. Внаслідок накладання на деформувальний елемент коливань ультразвукової частоти зміцнення значно інтенсифікується, що дає змогу, використовуючи малі статичні зусилля обкочування, забезпечити високі експлуатаційні властивості оброблюваних поверхонь. Зниження зусиль обкочування пояснюється також високою температурою процесу, що досягає 1000-1200 °С. Отже, суть ультразвукового зміцнення полягає у термопластичному деформуванні поверхневого шару кулькою, що вібрує із частотою 18-25 кГц.

Таблиця 5.4

Режими електроіскрового зміцнення технічного спорядження

Технологічне спорядження		Електрод			Режим оброблення		Зміцнювана поверхня		
Назва	Сталь	Матеріал	Марка	Діаметр, мм	Струм короткого замикання, А	Робочий струм I_p , А	Товщина нанесеного шару, мм	Суцільність покриття, % площі	Параметри шорсткості R_a , мм
Різці, свердла, зенкери, фрези, розвертки, протяжки	P19, P18, P6M5	Вуглі спектральні, графіт Твердий сплав	ВГ-3 ЕГ-2 ЕГ-4 ВК-2 ВК-3	4 4 3	3.6-4.4	1.2-1.5	0.001	80	2.5
Штампи для холодного і гарячого штампування: гнуті, витяжні	У8, У8А, У10, У10А, У12	Ферохром Твердий сплав	ВК-8 Т15К6	4 4	3.9-4.7	2.0-2.5	0.1	80	2.5
Затискні цанги; кондукторні втулки; втулки напрямних колонок	65Г, 60Г, 60С2 А	Ферохром Твердий сплав	Т15К6	4	3.6-4.4	1.2-1.5	0.01	70	2.5

Схема обкочування із введенням в зону деформації ультразвукових

коливань є досить простою. Як приклад на рис. 5.6 наведений пристрій для зміцнення плоских поверхонь. Від генератора 2 струм ультразвукової частоти потрапляє в магнітострикційний вібратор 1. Останній зв'язаний із деформувальною кулькою 4 через трансформатор амплітуди (концентратор) 3, що дає можливість збільшити амплітуду коливань. Статичне зусилля під час обкочування заготовки 5 встановлюють за допомогою противаги 6. Для оброблювання зовнішніх циліндричних поверхонь схожий пристрій монтується на токарному верстаті замість різцетримача.

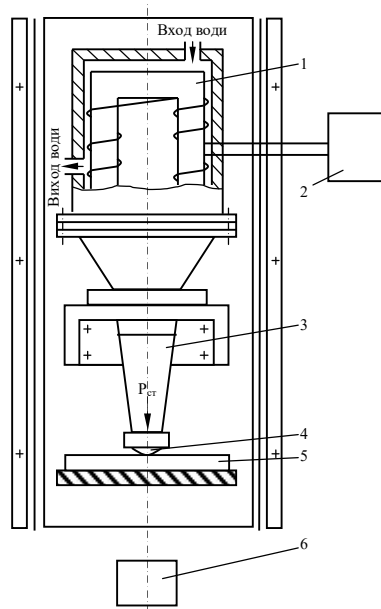


Рис. 5.6 *Схема ультразвукового зміцнення плоских поверхонь:
1 - вібратор; 2 - генератор; 3- трансформатор амплітуди;
4 - кулька; 5 - заготовка; 6 - противага*

5.3.1.6 Детонаційні покриття

Перше повідомлення фірми «Лінд» про використання детонації в газах для нанесення захисних покриттів з'явилося у 1956 році. У наш час цей процес використовується для нанесення зносостійких покриттів на поверхні багатьох виробів (див. табл. 17.1).

Для напилення частіше всього застосовують карбід вольфраму на кобальтовій основі, а також покриття з оксиду алюмінію і керметів більш складного вмісту та інші порошкові сплави.

Детонацією називається вибух, який поширюється з постійною і максимально можливою для даної вибухової речовини і даних умов швидкістю, яка набагато перевищує швидкість звуку в даному середовищі. На відміну від затухаючих вибухових хвиль, детонаційна - це сильна стаціонарна незатухаюча ударна хвиля. В залежності від природи вибухової речовини швидкість детонаційної хвилі знаходиться в межах 10^3 - 10^5 м/с. Тому і порошок, який розганяється детонаційною хвилею буде мати значно більшу швидкість, ніж при використанні газополуменового і плазмового струменя.

При детонаційному напиленні висока (в тисячі разів більша, ніж при газополуменовому напиленні) кінетична енергія частинок порошку дозволяє формувати покриття з матеріалів, температура плавлення яких вища за максимальну температуру вибуху киснево-ацетиленової суміші. Завдяки високій швидкості переміщення частинки порошку більш сильно сплющуються і механічно зчеплюються з нерівностями і порами поверхні деталі, ніж за інших умов напилення.

В Інституті проблем матеріалознавства НАН України розроблені установки для детонаційного напилення, які мають горизонтальне, вертикальне і комбіноване розташування ствола детонаційної гармати. Продуктивність цих установок по порошку становить 2-45 кг/год.

Технологічний процес напилення деталі включає три основних стадії: знежирення деталі, підготовка поверхні деталі під напилення і нанесення покриття на поверхню, яка відновлюється або зміцнюється. Підготовка поверхні така ж, як і в разі використання газополуменового та плазмового напилення.

В харчовій і переробній промисловості детонаційне напилення може знайти використання для зміцнення деталей кондитерської, м'ясомолочної, цукрової, тютюнової, хлібопекарської промисловості.

Так, в кондитерській промисловості використовується значна кількість загортувальних автоматів, в яких застосовуються ножі для розрізання етикеток з фольги та паперу. Це автомати типу ІЗМ, Futurus, EU, ЗКЦА, Rose Forgrove та ін.

В тютюновій промисловості експлуатуються ножі для подріблення тютюну, розрізання загортувальних матеріалів і цигаркового жгута. Велику кількість ножів застосовують для подрібнення цукрових буряків.

На кафедрі МІТМ НУХТ проведені дослідження з метою підвищення довговічності різального інструменту для загортувальних автоматів завдяки нанесення детонаційного покриття з твердого сплаву ВК15 на передню поверхню обертового ножа (рис. 5.7).

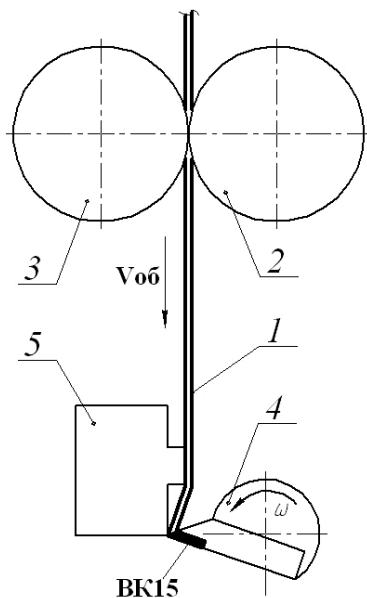


Рис. 5.7 *Схема поперечного перерізу паперорізального вузла ірисозагорткового автомата ІЗМ:*

1 – обгортка; 2,3 – ролики; 4 – вал з обертовим ножем; 5 – нерухомий ніж

На ножі з сталі 45, загартовані до твердості HRC_e 52, наносили детонаційне покриття товщиною 20, 25 і 40 мкм. Випробування ножів проводили на лабораторній установці, яка дозволяла імітувати реальний процес різання обгортувальних матеріалів в пакувальних автоматах типу ІЗМ і була оснащена лічильником різальних циклів.

Ножі з покриттями 20 і 25 мкм показали незначне (до 1,4 раза) підвищення стійкості порівняно з ножами із сталі ХВГ. Ножі з товщиною покриття 40 мкм пропрацювали більш ніж 6 млн. циклів і їх зносостійкість у три рази перевищувала стійкість серійних ножів. Збільшення радіуса заокруглення леза в період припрацювання до 20 мкм (рис. 5.8) пояснюється тим, що спочатку лезо заокруглюється на ділянці твердого

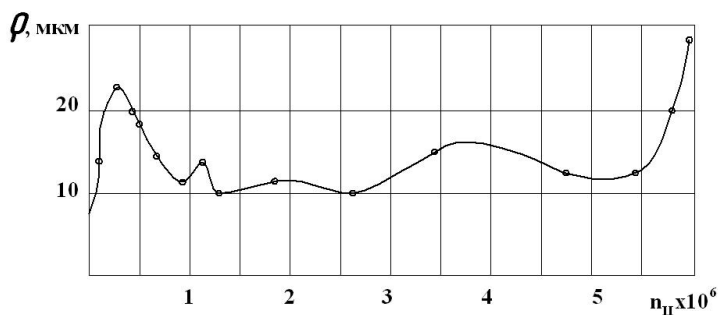


Рис. 5.8 Зміна радіуса заокруглення ножа залежно від кількості різальних циклів

сплаву, який при подальшій роботі сколюється і заокруглення виникає вже на перехідній зоні. Оскільки сили різання при затупленні ножа збільшуються, то і сколювання проходить більш інтенсивно. Після

того, як величина радіуса заокруглення леза досягає 10-14 мкм, вона стабілізується. Лезо ножа протягом тривалого періоду часу залишається гострим, а якість його роботи - задовільною. Таким чином реалізується ефект самозаточування ножів. Ножі з захисними покриттями були впроваджені у виробництво на кондитерських фабриках.

Підвищення зносостійкості в 2-3 рази було також досягнуто при напиленні сплавами ВК8 і ВК15 ножів для розрізання тютюну і паперу на тютюнових фабриках, а також ножів бурякорізок на цукрових заводах.

В харчових і переробних галузях агропромислового комплексу використовують значну кількість холодильних агрегатів. Найбільш складним механізмом холодильної машини є компресор, вартість якого співрозмірна з вартістю всієї холодильної установки, а трудомісткість ремонту є основною складовою частиною загальної трудомісткості ремонту. Імовірність виходу з ладу холодильної машини через відмову компресора є максимальною, а тому компресор є тим агрегатом, який

визначає довговічність машини в цілому.

На зносостійкість деталей компресорів значно впливає робоче середовище. Наприклад, взаємодія хладона з сталеною поверхнею призводить до утворення на ній твердих плівок хлоридів заліза, які захищають деталі від зношування. Проте відомі випадки, коли підвищення твердості плівок полегшує їх руйнування і схоплення настає при меншій деформації. Хладон в зневодженому стані нейтральний майже до всіх металів, а присутність в ньому парів води призводить до утворення соляної кислоти, яка сприяє корозійно-механічному зношуванню трибоспряжень. Рівень навантаження пар тертя до появи схоплювання при терті різних металів в повітряному середовищі і в хладоні 22 не однаковий. Схоплювання в хладоні відбувається при більш низьких питомих навантаженнях, ніж в повітрі. Відсутність в середовищі хладону відновлюваної оксидної плівки на поверхнях тертя, а також випаровування хладону в зоні тертя призводять до десорбції граничного шару мастила, що, в свою чергу, сприяє схоплюванню. Враховуючи викладене, за базові об'єкти для дослідження з метою встановлення доцільності зміцнення і відновлення були вибрані: колінчастий вал і поршневий палець поршневих компресорів, ексцентриковий вал ротаційних компресорів, пара “ротор-лопасть” в герметичному малому компресорі.

Для зміцнення і відновлення деталей компресорів вибрані наступні покриття: 1) для колінчастих валів і ексцентриків, що працюють в парі з антифрикційним алюмінієвим сплавом, – детонаційне покриття з порошку евтектичного сплаву на основі заліза, легованого алюмінієм системи Fe–C–Si–Al; 2) для колінчастих валів і ексцентриків, що працюють в парі з бронзовими сплавами, – детонаційне покриття з порошку евтектичного сплаву на основі заліза, легованого титаном системи Fe–C–Si–Ti; 3) для пари тертя ротор–циліндр, герметичного

ротаційного компресора – іонно-плазмове тонкошарове покриття на основі нітриду ванадію.

Авторами були зміцнені і відновлені колінчасті вали, поршневі пальці та ексцентрики холодильних машин (табл.5.5). На ремонтно-монтажному комбінаті Київської облспоживспілки було складено 25 компресорів з відновленими деталями. Досліджувалась також зносостійкість деталей герметичних поршневих компресорів типу ФГ-0,7-3(2). Для цього була складена дослідна партія з 20 компресорів. Випробування показали, що інтенсивність зношування трибоспряжень з детонаційним покриттям порошком евтектичного сплаву на основі заліза, легованого титаном, в 2,5–3 рази менша, ніж в серійних трибоспряженнях.

Таблиця 5.5

**Перелік відновлених детонаційним напиленням деталей
компресорів холодильних машин**

№ п/п	Найменування деталі	Тип компресора	Кількість	Матеріал порошку	Товщина шару покриття, мм
1	Колінчастий вал	ФАК–0,7У/КСА–600	20/5	Fe-C-Si-AL	0,8
2	Поршковий палець	ФАК–0,7У/КСА–600	25/15	Fe-C-Si-Ti	0,5
3	Ексцентрик	ФГС, ФГН	26	Fe-C-Si-Ti	0,8
4	Ексцентрик	Фгр 0,35–1(А)	15	Fe-C-Si-Ti	0,3

Досліджувалась також зносостійкість деталей герметичних поршневих компресорів типу Фгр 0,35-1(А) зміцнених тонкошаровими покриттями, нанесеними методом конденсації з іонним бомбардуванням – КІБ (лопать та ротор). Товщина покриття була в межах 5–7 мкм, тому використовувались лопаті та ротори ремонтних груп селекції. Результати промислових випробувань наведені в табл.5.6. Вони підтверджують високу зносостійкість трибоспряжень лопать-ротор та лопать-паз циліндра, що зміцнені нітридами титану і нітридом ванадію на установці

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

типу “Булат” по методу КІБ (опис технології подано у наступних підрозділах).

Також проведені ресурсні випробування холодильних компресорів ФАК-0,7 У та KSA-600 з валами, відновленими детонаційними покриттями евтектичним порошком на основі заліза, легованого алюмінієм. Укладки корінних та шатунних підшипників були виготовлені із сплаву АЛ-4 , нанесеного на сталеву основу. На ці ж компресори були встановлені також поршневі пальці, відновлені детонаційним напиленням сплаву системи Fe – C – Si – Ti.

Випробування проводили протягом 10 тис. годин на компресорах з холодильним агентом R22. Результати показали, що трибоспряження з відновленими колінчастими валами мають зносостійкість в 2,5 – 3 рази вищу, ніж серійні. А термін припрацювання знизився з 1000 – 1250 год до 250 – 300 годин.

Таблиця 5.6

Результати промислових випробувань компресорів типу Фгр 0,35–1(А) протягом 7,0 тис. год

№ п/п	Найменування поверхні тертя	Лінійний знос поверхонь компресорів зміцнених тонкошаровими покриттями					
		№1, №9 VN	№2, №7 VN	№3, №8 TiN	№4, №10 TiN	№5, №11 Серійний	№6, №15 Серійний
1	Торцева поверхня лопаті	2,5	3,5	9,5	10,5	47	53
2	Торцева поверхня лопаті по ширині	1,0	1,5	2,0	2,5	10,5	8,5
3	Торцева поверхня ротора	0,0	0,0	0,5	0,5	5,3	4,5
4	Паз циліндра	3,0	2,5	4,0	3,0	8,5	16

В результаті стендових та промислових випробувань встановлено:
а) використання тонкошарових зносостійких іонно-плазмових покриттів на основі нітриду титану і нітриду ванадію для зміцнення ротора і лопасті герметичного ротаційного компресора Фгр 0,35-1(А) підвищує

зносостійкість трибоспрямижень в 5 - 6 разів (табл.5.6); б) використання запропонованих покриттів для відновлення деталей герметичних компресорів холодильних машин збільшує ресурс роботи компресорів та терміни проведення капітальних ремонтів; в) середній ресурс роботи трибоспрямижень компресорів холодильних машин типу ФАК – 0,7 У та KSA – 600 з відновленими деталями підвищився в середньому в 2,3 – 2,5 рази; г) випробування показали, що для промислового використання, при зміцненні та відновленні деталей компресорів холодильних машин слід використовувати: детонаційні покриття з евтектичних порошків на основі заліза, легованих алюмінієм і титаном (з метою відновлення поршневих пальців, ексцентрикових і колінчастих валів герметичних і сальникових поршневих компресорів), та іонно-плазмові тонкошарові зносостійкі покриття на основі нітридів титану та ванадію (для зміцнення лопатей та роторів герметичних ротаційних компресорів).

5.3.1.7 Електродугові покриття

Одними з основних причин втрати працездатності обладнанням харчової промисловості є інтенсивне корозійне руйнування і корозійно-механічне зношування під дією хімічно-активних технологічних середовищ. Більша частина машин і апаратів, які потребують захисту від корозії, піддається фарбуванню або цинкуванню різними способами. Недостатня довговічність фарбових покриттів (інколи менше 1 року), їх дефіцитність, висока вартість для найбільш ефективних покриттів, значні витрати при їх відновленні і ремонтах ставлять під сумнів можливість підвищення довговічності сталевих конструкцій та виробів тільки за рахунок збільшення об'ємів фарбування. Відносно цинкування, то його можливості обмежені дефіцитністю цинку, недостатньою для ряду експлуатаційних умов корозійною стійкістю і санітарно-гігієнічними вимогами.

За таких умов перспективним способом підвищення довговічності сталевих виробів і економії сталі (поряд з цинкуванням та іншими покриттями) варто вважати розвиток алюмінування з використанням електродугової металізації (див. табл. 17.1).

Світовий і вітчизняний досвід свідчить, що в атмосферних умовах і при середній та слабкій агресивності середовищ захисна дія алюмінієвих покриттів зберігається 15-20 років, а в поєднанні з традиційними фарбовими покриттями – 35-40 років.

Алюмінуванням методом ЕЛМЕТ (електрометалізації) покриваються мости, конструкції промислових будинків, резервуари, витяжні труби широкого призначення в харчовій, переробній, нафтохімічній та інших галузях промисловості. Про масштаби використання технології ЕЛМЕТ свідчать такі дані: у Франції близько 80% всіх конструкцій для будівництва мають цинкове або алюмінієве покриття; в Японії більшість палубних надбудов і корпусів супертанкерів покрито алюмінієм; металізовані алюмінієм практично всі споруди нафтових комплексів Близького Сходу; в Чехії діють дві поточні повністю механізовані лінії алюмінування сталевих листів і профілів потужністю більше 60 тис.т на рік. В країнах СНД загальний об'єм сталевих виробів, які захищаються електродуговою металізацією щорічно, не перевищує 70-80 тис.т. щорічно, що є вкрай недостатнім. В Україні метод ЕЛМЕТ застосовують лише на деяких підприємствах у невеликих об'ємах.

При електродуговій металізації розплавлення двох дротів здійснюється електричною дугою. Розплавлений метал підхоплюється струменем стисненого повітря (або азоту), витікаючи з центрального сопла електрометалізатора, і з швидкістю 25-80 м/с переноситься на поверхню. Процес протікає стабільно і забезпечує отримання шару покриття з дрібнозернистою структурою (див. табл. 17.1).

Для нанесення покриттів з цинку, алюмінію, сталі, молібдену та інших металів найбільш часто використовуються металізаційний комплект типу КДМ-2. Його можна застосовувати для ручної і механізованої металізації.

Для антикорозійних покриттів найчастіше використовують цинковий марки III (ГОСТ 130073-77) та алюмінієвий марки АДІ, АМц (ГОСТ 7871-75) дріт. При нанесенні зносостійких покриттів на спрацьовані і нові деталі можна використовувати дріт з аустенітної маловуглецевої корозійностійкої сталі типу 12Х18Н10Т, а також з високохромистих корозійностійких сталей. Ці покриття характеризуються малою усадкою і не схильні до утворення тріщин. Ніхромовий дріт використовують для нанесення проміжного підшарку з великою міцністю зчеплення з основою. Дріт з алюмінієвої бронзи застосовують для отримання антифрикційних покриттів, які мають високу щільність і добре обробляються різанням.

В харчовій промисловості метод ЕЛМЕТ був застосований В.Супрунчуком та М.Роменським для збільшення довговічності корпусів колонних і нахилених дифузійних апаратів бурякоцукрового виробництва. Він використаний для нанесення алюмо-полімерного покриття на внутрішню поверхню корпусів апаратів. Захисне покриття складалось з алюмінієвого підшарку товщиною 0,15-0,2 мм та багат шарового покриття з ґрунту ЕП-01, емалі ЕП-711 і лаку ЕП-710, або з ґрунту ЕП-01, емалі ЕП-ХС та лаку ЛФЕ-42Х. Використання цієї технології дало змогу у декілька разів збільшити строк служби дифузійних апаратів.

Згадані електродугові покриття можуть бути використані в харчовій промисловості для захисту резервуарів, металоконструкцій і деталей обладнання, які працюють у контакті з різноманітними технологічними середовищами, а також для підвищення довговічності пар тертя.

Технологічний процес ЕЛМЕТ подібний до газополуменового і плазмового напилення за виключенням напилювальних пристроїв та типів газів.

5.3.2 Фізико-технологічні методи напилення та наплавлення

5.3.2.1 Газополуменові покриття

При газополуменовому напиленні температура киснево-ацетиленового полум'я не перевищує 3200°C , а швидкість польоту частинок порошку становить декілька десятків метрів за секунду. Це обумовлює високу пористість і невелику міцність зчеплення з основою газополуменових покриттів. Для формування захисних покриттів використовують такі матеріали, температура плавлення яких нижча від температури полум'я. Так, при напиленні порошком, на відстані 60-70 мм від сопла напилюючого пристрою температура полум'я не перевищує 2000°C , на відстані 100 мм — 1900°C , 150 мм — 1400°C .

Залежно від призначення та матеріалу деталей, умов їх експлуатації, при відновленні розмірів і зміцненні деталей використовують такі способи газополуменового нанесення порошкових покриттів: газопорошкова наплавка (напилення з одночасним оплавленням), напилення з наступним оплавленням, напилення без оплавлення «холодне напилення».

При газопорошковому наплавленні і напиленні найбільш часто використовується ацетилен, пропан, бутан, або суміші пропану і бутану. Найбільш високу температуру забезпечує ацетилено-кисневе полум'я, а тому воно знайшло найбільше використання.

Газопорошкове напилення і наплавка потребує використання спеціальних пальників та пристроїв. Часто для отримання газопорошкових покриттів використовуються установки типу УПТР -1-

78М, призначені для нанесення порошків самофлюсованих сплавів системи Ni(Co) - Cr - В - Si, які після оплавлення забезпечують безпористість покриття, високу зносостійкість, стійкість проти корозії, ерозії, кавітації, теплових факторів тощо. В дрібносерійному виробництві для ручної газопорошкової наплавки застосовують пальники ГН-2 (ГН-1, ГН-3), а також пістолети серії «Могул У-9 і пальники для наплавки і напилення серії «Євро-Джет» (Австрія). Простота обслуговування і незначна маса пістолетів і пальників дозволяє використовувати це обладнання «Інтерфакела» для зміцнення і відновлення деталей безпосередньо на харчових підприємствах.

Для оплавлення напиленого шару самофлюсованих сплавів і попереднього нагрівання габаритних деталей використовують ацетилено-кисневі пальники ГС-3А з кінцевиками №№ 6,7 і сітчастими мундштуками, або пальники для газового замітника ацителену типу ГЗУ-3 і ГЗУ-4, які широко застосовуються в зварювальному виробництві.

Найбільш часто для газотермічного напилення в Україні використовують порошки Торезького заводу наплавлюваних твердих сплавів (ТЗНТС). Завод виробляє за ліцензійною технологією самофлюсовані порошкові матеріали для газопорошкової наплавки, «холодного» напилення. Номенклатура, хімічний склад і твердість сплавів регламентовані ТУ48-19-383-84 і приведені в табл. 5.7.

На підґрунті лабораторних і виробничих випробувань, а також з урахуванням рекомендацій літературних джерел можна запропонувати для використання в харчовому машинобудуванні і на підприємствах харчової промисловості такі порошкові сплави.

Порошок самофлюсованого сплаву **ПГ-10Н-01** варто використовувати для нанесення покриттів на сталеві та чавунні деталі при значному вмісті в технологічному середовищі, де вони працюють, абразивних частинок. Порошок призначений переважно для методу

газополуменевої порошкової наплавки. Можливе використання порошку для газотермічного напилення з наступним оплавленням. Максимально допустима робоча температура для покриття – 700 °С. Рекомендується під час газополуменевої наплавки наносити шар товщиною до 2,0 мм, а під час напилення з оплавленням — до 1,0 мм.

Покриття можна використовувати для зміцнення та відновлення захисних втулок компресорів і насосів, шийок валів, кулачків, ексцентриків, а також деталей, які працюють в умовах абразивного зношування (змішувачів, ланцюгів транспортерів в цукровому виробництві) і в агресивних технологічних середовищах.

Порошок самофлюсованого сплаву **ПГ-12Н-02** застосовують для газотермічного напилення з наступним оплавленням покриттів на деталі і інструмент з вуглецевих і нержавіючих сталей, а також з чавуну, які працюють в умовах корозійно-механічного зношування. Напилений шар має високі антифрикційні властивості, стійкий проти корозії та окислення при нормальних та підвищених (до 700°C) температурах і проти абразивного зношування. Опір ударам у цього покриття занижений. Допускається наносити покриття товщиною 0,3-1,5 мм. Покриття з порошку **ПГ-12Н-02** обробляються шліфувальними кругами із карбіду кремнію зеленого, а також твердосплавним інструментом. Сплав використовується для зміцнення і відновлення валів і поршнів насосів, напрямних роликів, деталей запірної арматури, гідроприводів.

Матеріал марки **ПС-12НВК-01** — це механічна суміш порошків сплаву **ПГ-10Н-01** і **карбіду вольфраму**. Суміш добре напилюється на деталі з вуглецевих і нержавіючих сталей та чавуну. Високі антифрикційні властивості показує цей матеріал при терті в парі з бронзою. Наплавлений

Таблиця 5.7

**Номенклатура і хімічний склад порошків,
які випускає ТЗНТС за ТУ 48-19-283-84**

№ п/п	Марка сплаву	Спосіб нанесення	Хімічний склад, % по масі										Твердість HRCe
			Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	Cu	W	Al	
1.	ПГ-10Н-01	НОО	14,0-20,0	2,8-4,2	4-4,5	3,0-7,0	0,6-1,0	Решта	-	-	-	-	65-62
2.	ПГ-10Н-04	НОО	-	1,2-1,8	2,3-2,8	До 2,0	До 0,2	Решта	-	-	-	-	86-96HRB
3.	ПГ-10К-01	НОО	21,0-25,0	1,2-1,8	0,8-1,3	До 2,0	1,3-1,7	28,0-32,0	-	-	3,5-4,5	-	45-50
4.	ПГ-12Н-01	ННО	8,0-14,0	1,7-2,8	1,2-3,2	2,0-5,0	0,3-0,6	Решта	-	-	-	-	35-44
5.	ПГ-12Н-0,2	ННО	10,0-16,0	2,0-4,0	3,0-5,0	3,0-6,0	0,4-0,8	Решта	-	-	-	-	45-54
6.	ПГ-19М-01	НБО	-	-	-	До 4,0	-	-	-	Решта	-	8,5-10,5	65-72HRB
7.	ПТ-НА-01	НБО	-	-	-	-	-	Решта	-	-	-	4,0-5,5	Проміжний шар
8.	ПГ-19Н-01	НБО	8,0-14,0	1,7-2,8	1,2-3,2	2,0-5,0	0,3-0,6	Решта	-	-	-	0,8-1,3	28-40
9.	ПС-12НВК-01	ННО	35% карбіду вольфраму + 65% ПГ-10Н-01										

Примітка: 1. НОО – наплавка з одночасним оплавленням; 2. НБО – напилення без оплавлення; 3. ННО – напилення з наступним оплавленням; 4. Гранулометричний склад всіх порошків 40-100 мкм.

шар стійкий проти корозії і окислення при нормальних і підвищених (до 700⁰С) температурах, має високу зносостійкість при абразивному і ерозійному зношуванні. Рекомендується наносити шар покриття товщиною від 0,5 до 1,5 мм, а обробку здійснювати шліфуванням алмазним або ельборовим інструментом.

Порошок може використовуватись для зміцнення і відновлення деталей змішувачів абразивних матеріалів, транспортуючих шнеків, лез ножів тощо.

Порошок **ПТ-19М-01** використовують для газотермічного напилення покриттів «холодним» способом на деталі з вуглецевих та нержавіючих сталей і чавунів. Йому притаманні екзотермічні властивості. Порошок наноситься на деталі через проміжний шар порошку **ПТ-НА-01**. Завдяки пористості, покриття працює як спечений антифрикційний матеріал. Протидія ударам задовільна. Товщина покриття досягає 3 мм. Захисний шар обробляється різанням.

Порошок використовується для відновлення і зміцнення деталей машин і агрегатів, які працюють в умовах тертя ковзання.

Термореагуючий матеріал марки **ПТ-19Н-01** - це біметалічний порошок, що складається з гранул самофлюсованого сплаву на нікелевій основі, покритих тонким шаром алюмінію. Використовується для газотермічного напилення «холодним» способом. Під час його напилення коефіцієнт використання порошку складає 75-90%. Матеріал **ПТ-19Н-01** має екзотермічні властивості. Для забезпечення високих адгезійних характеристик покриття його слід напилювати з відстані до зміцнюваної поверхні 180-210 мм тільки через прошарок порошку **ПТ-НА-01**.

Напилений шар товщиною 0,5-1,0 мм має добрі антифрикційні властивості, стійкий проти корозії і окислення, але відзначається недостатньою стійкістю при ударному навантаженні і абразивному

зношуванні. Покриття обробляється шліфуванням. Воно може застосовуватись для відновлення і зміцнення колінчастих валів холодильних компресорів і двигунів, поршнів гідравлічних машин, підшипників ковзання та інших опорних поверхонь.

Крім названих порошків у практиці газотермічного напилення використовуються різноманітні метали і сплави, оксиди, бориди, силіциди, нітриди, карбіди та інтерметаліди.

Покриття з нержавіючих сталей, хрому, нікелю, молібдену, ніобію характеризується високою корозійною стійкістю. Покриття оксидами алюмінію, цирконію, хрому, титану відзначаються теплостійкістю, твердістю, корозійною стійкістю і зносостійкістю в умовах абразивного зношування.

В Україні застосовують не тільки порошки ТЗНТС, але і порошки ОП «Леговані порошкові сплави» (Росія), дослідного заводу інституту електрозварювання ім. Патона, а також порошки іноземних фірм: «Union Carbide» і «Wall Colmonoy» (США), «Plazmatechnik AG» і «Castolin» (Швейцарія), «Metco» (Італія) та ін. В ФМІ ім. Г.В. Карпенка розроблено порошки системи Fe - Mn - B - C з недефіцитних і дешевих компонентів для отримання евтектичних покриттів з необхідною структурою і експлуатаційними властивостями (відносно велика товщина і висока твердість, підвищена пластичність та зносостійкість).

Процес нанесення шару покриття на робочу поверхню деталей включає в себе підготовку порошкових матеріалів і деталі для напилення, налагодження режиму наплавлення або напилення, попереднє підігрівання деталі, нанесення зміцнюючого шару і охолодження деталі.

Підготовку поверхні деталі під напилення і наплавку можна виконувати механічною, абразивоструменевою, електроіскровою обробкою та хімічним травленням. Для збільшення адгезії покриття з

деталлю інколи (при товщині покриття більшій за 1 мм і великих зрізувальних навантаженнях на деталь) проводять спеціальну обробку поверхні: нарізання «рваної» різьби, фрезерування пазів, насічку поверхні та накатування різьби роликом.

Обробка відновлених або зміцнених деталей ведеться на типовому металорізальному обладнанні. Якщо твердість покриттів не перевищує 40 HRCe, то їх обробляють лезовим твердосплавним інструментом типу ВК, а при більшій твердості використовують шліфування кругами з карбіду кремнію зеленого, алмазними і ельборовими кругами з використанням мастильно-охолоджувальних рідин.

Технологія газополуменевого напилення дає можливість зміцнювати та відновлювати великий асортимент деталей основного і допоміжного обладнання харчових і переробних виробництв.

Більшість деталей вузлів тертя машин галузі виготовляється з вуглецевих сталей, чавунів та бронзи. Тому при виборі найбільш ефективних покриттів для досліджень за схемою вал-укладка підшипника на машині тертя СМЦ-2 були використані зразки-ролики із сталі Ст3 з газополуменевими покриттями порошками ТЗНТС (див. табл. 17.2), а контртіла-укладки - зі сталі 45 і чавуну СЧ20. Дослідження (при навантаженні 5МПа, швидкості ковзання 1,3 м/с, змащуванні мастилом І-20А) показали, що практично всі випробувані матеріали можуть бути використані для роботи в умовах граничного тертя. Найкращі результати були отримані при випробуванні порошкових матеріалів марок ПС-12НВК-01 та ПГ-19М-01.

Проведені дослідження дали змогу рекомендувати ці матеріали для покращення працездатності, підвищення довговічності та відновлення ексцентрикових і колінчастих валів холодильних агрегатів ВС_e0,7 та ФАК-0,7У, які широко розповсюджені на молоко- і м'ясопереробних комбінатах, пивзаводах та підприємствах торгівлі (рис. 5.9). Зношені

колінчасті вали відновлювали сплавом ПС-12НВК-01, а ексцентрикові вали — сплавом ПГ-19М-01 з використанням напилювача «Могул-У9С». Після наплавки і оплавлення твердість покриття ПС-12НВК-01 становила 62 HRC_e, а покриття ПГ-19М-01 — 68 HRB. Міцність зчеплення покриття ПС-12НВК-01 після його оплавлення СВЧ складала 120 МПа, а покриття ПГ-19М-01 — 32 МПа. Після шліфування і доводки шорсткість відновленої поверхні не перевищувала Ra = 1,6 мкм.

Всебічні випробування відновлених і зміцнених деталей на підприємствах України показали, що зносостійкість колінчастих валів збільшилась в 3-5 разів, а стійкість ексцентрикових валів після «холодного» напилення порошком ПГ-19М-01 була в 2-3 рази більшою у порівнянні зі серійними із сталі 45.

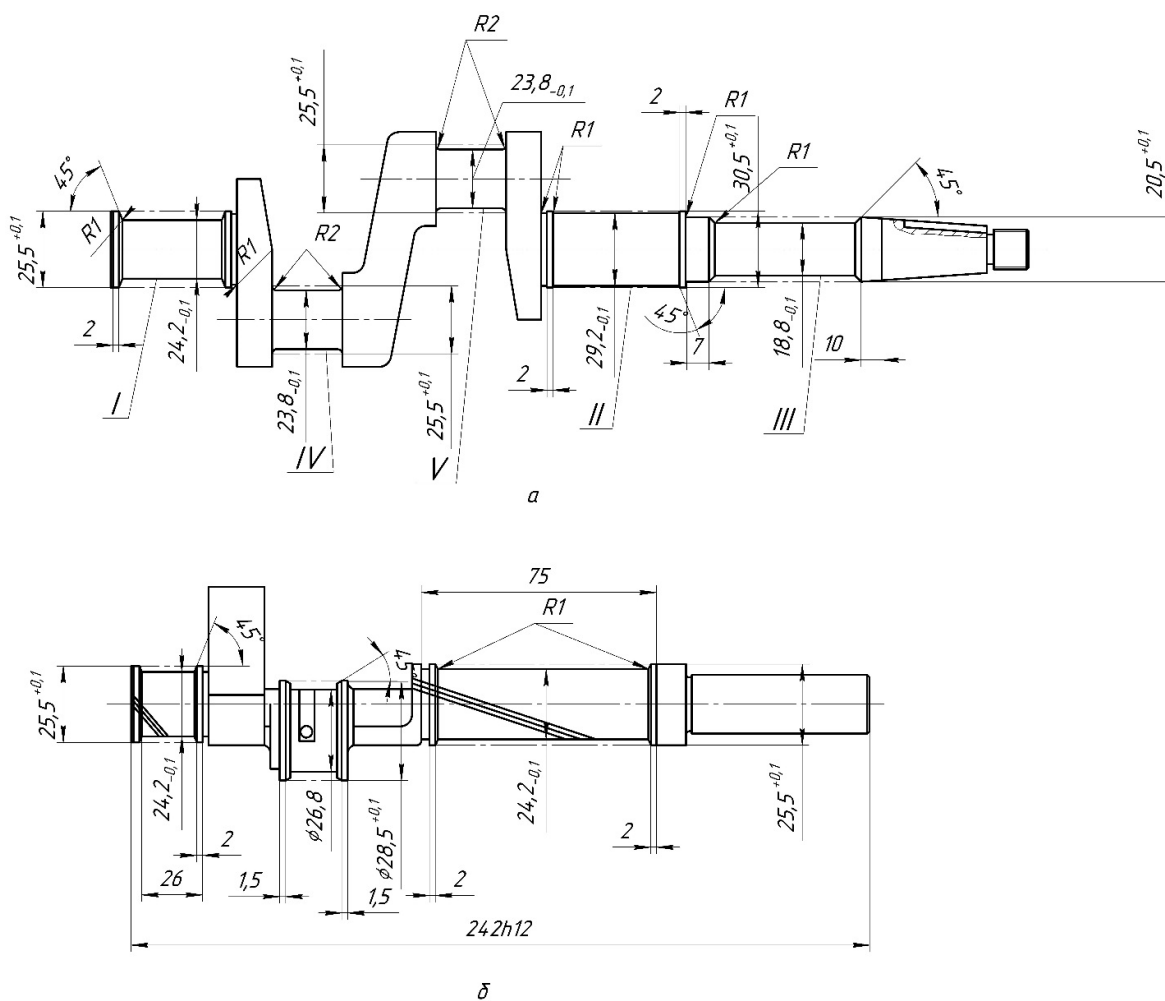


Рис. 5.9 Колінчастий (а) та ексцентриковий (б) вали холодильних компресорів ФАК-0,7У і ВСе 0,7 (пунктиром і цифрами I-IV - поверхні, які відновлювали)

Для багатьох деталей харчових виробництв абразивне зношування є основною причиною виходу їх із ладу. З метою визначення абразивної зносостійкості матеріалів були проведені дослідження по схемі торцевого тертя зразка по абразивній шкурці 14A16NM230 при навантаженні 1 МПа і швидкості ковзання 1 м/с. За еталон при визначенні відносної зносостійкості була вибрана відпалена сталь 45.

Дослідження нанесених на зразки зі сталі Ст3 напилювачем «Могул-У9С» покриттів показали (рис. 5.10), що найбільш високу зносостійкість при терті по закріплених абразивних зернах мають покриття з порошку ПС-12НВК-01, які складаються з матриці ПГ-10Н-01 з включенням 35% карбіду вольфраму. Для нікелевих самофлюсованих сплавів системи Ni - Cr - B - Si абразивна зносостійкість знаходиться в прямій залежності від твердості покриттів. Важливе значення для забезпечення максимальної твердості та зносостійкості має вибір режиму термообробки покриттів. Наприклад, максимальна твердість 60HRC_e покриття з сплаву ПГ-10Н-01 досягається оплавленням його при температурі 1040-1060⁰С. Оплавлення покриття забезпечує його високу щільність, безпористість і гарантує утворення дифузійної зони на межі покриття з сталеву основою (рис. 5.11), що забезпечує достатній рівень зчеплення з деталлю.

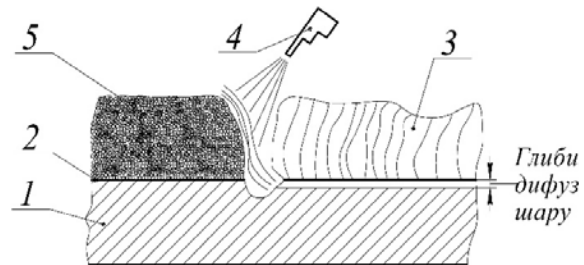
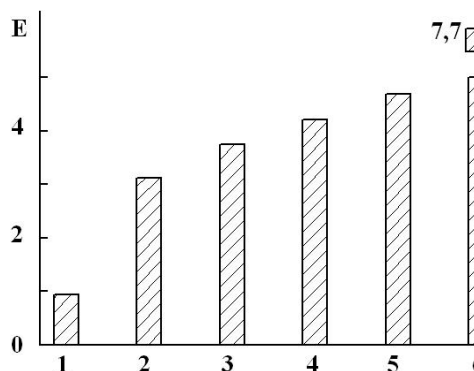


Рис. 5.10 Відносна зносостійкість матеріалів в умовах абразивного зношування: 1 – сталь 45; 2 – ПГ-12Н-01; 3 – ПГ-12Н-02; 4 – ПГ-10Н-01; 5 – ПГ-10К-01; 6 – ПС-12НВК-01

Рис. 5.11 Схема оплавлення самофлюсованого порошку: 1 – деталь; 2 – оксидна плівка; 3 – оплавлене покриття; 4 – газовий пальник; 5 – напилене покриття

Сплав ПГ-10Н-01 був використаний для зміцнення деталей ланцюгів бурякоелеватора на Лохвицькому цукровому комбінаті, зносостійкість яких визначає надійність роботи елеватора. В бурякоелеваторах використовують втулко-роликові ланцюги, деталі яких працюють в умовах абразивного зношування за відсутності змащування.

Пальці втулко-роликового ланцюга (рис. 5.12) зазвичай виготовляють із сталі Ст3, піддають цементації і термообробці до 240-250 HRB. Втулки виготовляють із сталі Ст5, а пластини зі сталі Ст3 без термообробки. Деталі ланцюгів працюють при швидкості ковзання 0,05 м/с і навантаженні 45-50 МПа.

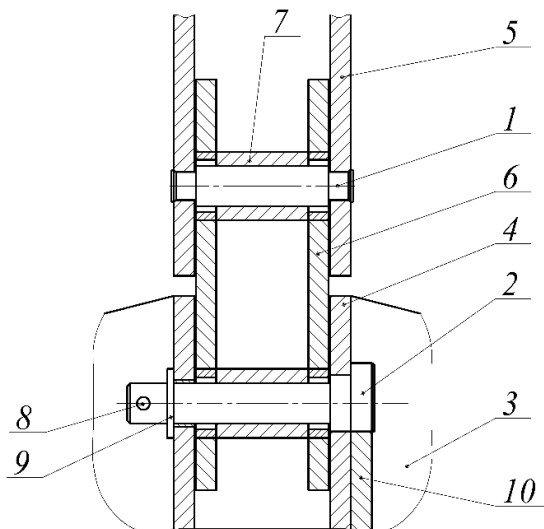


Рис. 5.12 Ланка втулково-роликового ланцюга бурякоелеватора: 1 – палець; 2 – причепний палець; 3 – ківш; 4,5,6 – пластини; 7 – втулка; 8 – шплінт; 9 – шайба; 10 - упор

Випробування пальців після нанесення покриття з порошку ПГ-10Н-01 і оплавлення СВЧ (HRC_e 60) на Лохвицькому цукровому комбінаті показало, що їх стійкість підвищилась у 5 разів.

Позитивні результати були отримані при зміцненні деталей обладнання газополумєневими евтектичними покриттями, які розроблені ФМІ ім. Г.В. Карпенко. На підставі результатів лабораторних досліджень авторів було

проведено зміцнення валів насосів 4К-12, які перекачують ропу в холодильних системах на міськмолзаводі № 2 м. Києва. Змащування пари «втулка-вал» в цих насосах здійснюється соляним розчином, що спричиняє інтенсивне корозійно-механічне зношування. Використання евтектичного сплаву з фазовим складом α - Fe + Fe_{0,4}Mn_{3,6}C + Fe₃C + Fe₂B для захисту поверхні тертя дозволило збільшити напрацювання до відмови пари «вал-втулка» з 300 до 1200 годин.

Наведені приклади однозначно свідчать про високу ефективність використання газопорошкового напилення і наплавлення для підвищення довговічності обладнання харчової промисловості.

5.3.2.2 Плазмові покриття

Плазмове напилення — це подальший розвиток металізації напиленням (див. табл. 5.7). Воно дозволяє отримувати покриття більш щільні, ніж при газополуменевому напиленні, а робочі поверхні деталей - з мінімальною шорсткістю після механічної обробки.

Характерними ознаками плазми є її квазінейтральність, тобто концентрації позитивних і негативних складових (іонів, електронів і полярних молекул) в плазмі приблизно рівні, внаслідок чого просторовий заряд практично дорівнює нулю. Висока ступінь іонізації забезпечує високу температуру дугового розряду (близько 6000⁰С). Для підвищення температури дугу стискають у плазмотронах (наприклад, температура аргонної плазми становить 20-25 тис. ⁰С). При плазмово-порошковому напиленні і наплавленні використовують три типи плазмової дуги: пряму та побічну (рис. 17.5) і комбіновану (рис. 17.6). Кращі технологічні можливості має комбінована дуга. Така схема металізації дає можливість виконати роздільне регулювання струменя для нагрівання напилюваного матеріалу та основи.

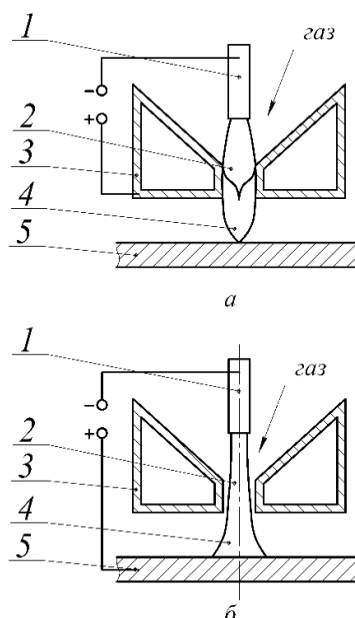


Рис. 5.13 Схема будови плазмотронів з дугою побічної (а) та прямої (б) дії: 1 – електрод; 2 – електрична дуга; 3 – охолоджуване водою сопло; 4 – плазмовий струмінь; 5 – деталь

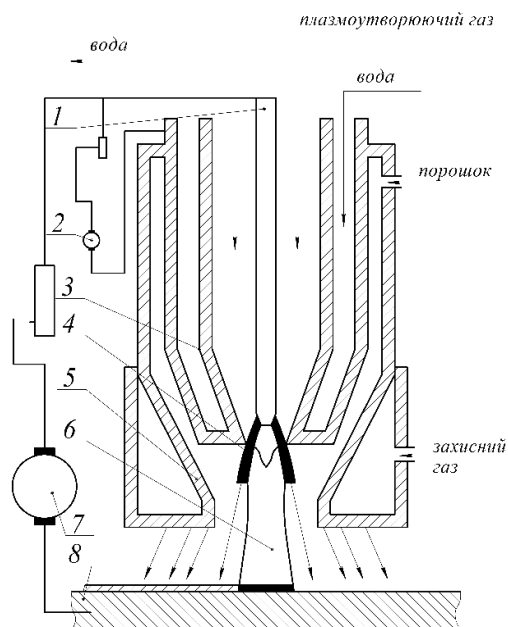


Рис. 5.12 Схема будови плазмотрона з дугою комбінованої дії: 1 – електрод; 2 – джерело живлення дуги побічної дії; 3 – внутрішнє сопло; 4 – плазмовий струмінь побічної дії; 5 – зовнішнє сопло; 6 – плазмовий струмінь прямої дії; 7 – джерело живлення дуги прямої дії; 8 – деталь

Плазмове наплавлення має ряд переваг в порівнянні з широко відомим наплавленням під шаром флюсу. Якщо при одношаровому наплавленні під шаром флюсу доля основного матеріалу в наплавленому складає 60%, то при плазмовому наплавленні не перевищує 5%.

Для нанесення плазмою зносостійких покриттів при виготовленні та ремонті деталей харчового обладнання можна використовувати багато матеріалів з різними властивостями і широким діапазоном експлуатаційних характеристик. Висока температура дозволяє використовувати для цієї мети практично будь-які матеріали. Напилювані матеріали поділяються на такі, що безпосередньо мають властивість утворювати надійні захисні покриття та на такі, яким ці властивості

надаються штучно. Вони можуть використовуватися у вигляді порошку, дроту, прутків або «керамічного шнура».

Для плазмового напилення можна використовувати всі ті матеріали, які використовуються для газополуменового напилення, а також оксиди, бориди, силіциди, нітриди, карбіди тощо. Ці сполуки мають високу твердість і зносостійкість. Такий асортимент матеріалів, які використовуються для плазмового напилення, робить перспективним його використання для підвищення надійності та довговічності і покращення експлуатаційних характеристик деталей харчового обладнання.

Технологічний процес плазмового зміцнення і відновлення деталей включає такі основні операції: підготовку порошків, налагодження обладнання, механічне оброблення і знежирювання деталей, напилення або наплавку порошку, керамічного шнура чи дроту, механічне оброблення напиленого шару та контроль якості покриття.

Для знежирювання можна використовувати спирт, ацетон або інші розчинники і знежирювачі.

Абразивоструменеве оброблення проводиться на спеціальних установках для забезпечення необхідної шорсткості поверхні і її активування. Для цього застосовують електрокорунд, пісок, сталевий дріб.

Підготовка напилюваного порошку, сушіння і просіювання на ситі, проводиться для забезпечення його необхідної транспортабельності. Нанесення прошарку здійснюють для збільшення міцності зчеплення з деталлю основного покриття і отримання її необхідних експлуатаційних характеристик. Після операції напилення і у разі отримання пористого з слабкою адгезією покриття, його оплавляють струмом високої частоти (СВЧ), в печі або газовим пальником.

Можливості плазмових технологій у підвищенні надійності і довговічності обладнання харчових і переробних виробництв надзвичайно широкі.

В НУХТ досліджували перспективність підвищення довговічності деяких деталей обладнання харчових виробництв за допомогою плазмових покриттів з порошків нікель-алюмінієвого сплаву ПН85Ю15, оксиду хрому Cr_2O_3 , плазмотексу - ОТЗ ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\%\text{TiO}_2$), нормального електрокорунду Мн28 і титанистого, бронз БрА10 і БрО10, рутилового концентрату, порошків ПГ-19М-01 і ПТ-19Н-01.

Досліди на зношування проводились за схемою вал-укладка підшипника на машині тертя СМЦ-2, яка комплектувалась спеціальною камерою з органічного скла (рис. 5.15) для робочої рідини, в якій розміщена пара тертя диск 2 і колодка 1.

Покриття наносилось на диски із сталі 45 на лінії «Плазматехнік АГ» (Швейцарія), а колодки виготовляли з сталі 45 і чавуну СЧ20.

Випробування проводили при швидкості ковзання 0,78 м/с, тиску 1 МПа і температурі робочого середовища $60 \pm 2^\circ\text{C}$, що відповідає параметрам роботи багатьох деталей обладнання харчових підприємств. Знос пари тертя оцінювали по втраті маси дисків і колодок за 1 годину випробувань. Випробування покриттів здійснювали в умовах

сухого тертя і в водяних розчинах, що моделюють тістові, бурякоцукрові і молочні середовища харчових виробництв.

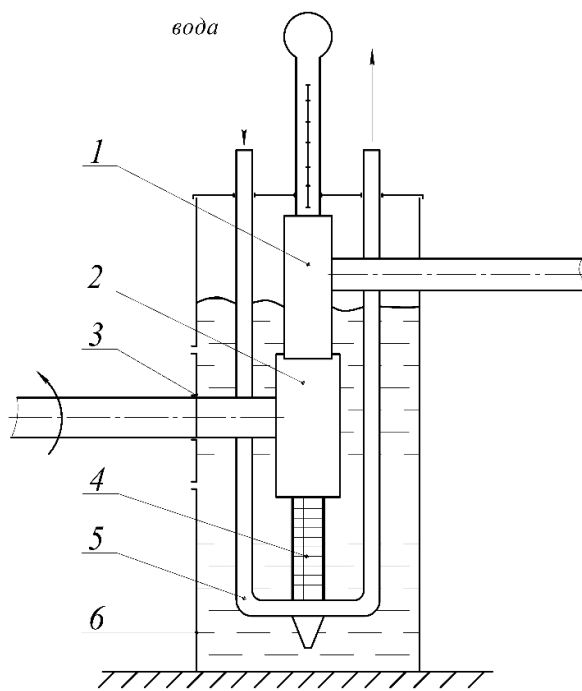


Рис. 5.15 Схема камери для машини тертя СМЦ-2: 1 – колодка; 2 – диск; 3 – сальник; 4 – термометри; 5 – змійовик; 6 – корпус

Дослідження показали (рис. 5.15), що зносостійкість плазмових покриттів і контртіл визначається їх складом і властивостями та залежить від умов роботи. При сухому терті найбільш високу зносостійкість в парі з чавуном СЧ20 мають покриття з рутилового концентрату і титанистого електрокорунду, а найменшу — покриття з оксиду хрому і алюмінієвої бронзи. Ті ж покриття, які вміщують з'єднання титану, найбільш зносостійкі і в парі тертя зі сталлю 45. Виключенням є покриття плазма текс ОТЗ, яке поряд з покриттям з бронз і нормального електрокорунду, менш стійке.

В модельному розчині тіста процес корозійно-механічного зношування ускладнюється пористістю покриттів, що сприяє активуванню корозійних процесів по глибині покриття і на поверхні контртіла. В цих умовах кращими є покриття з оксиду хрому і титанистого електрокорунду, гіршими — покриття з бронзи Бр А10. Тертя бронзових покриттів в парі з чавуном СЧ20 і сталлю 45 супроводжується перенесенням на останні міді, яка, в свою чергу, при контакті з бронзою сприяє зчепленню поверхонь зразка та контртіла і приводить до підвищеного зношування самого покриття. Низьку зносостійкість мають і покриття з порошку сплаву ПН85Ю15.

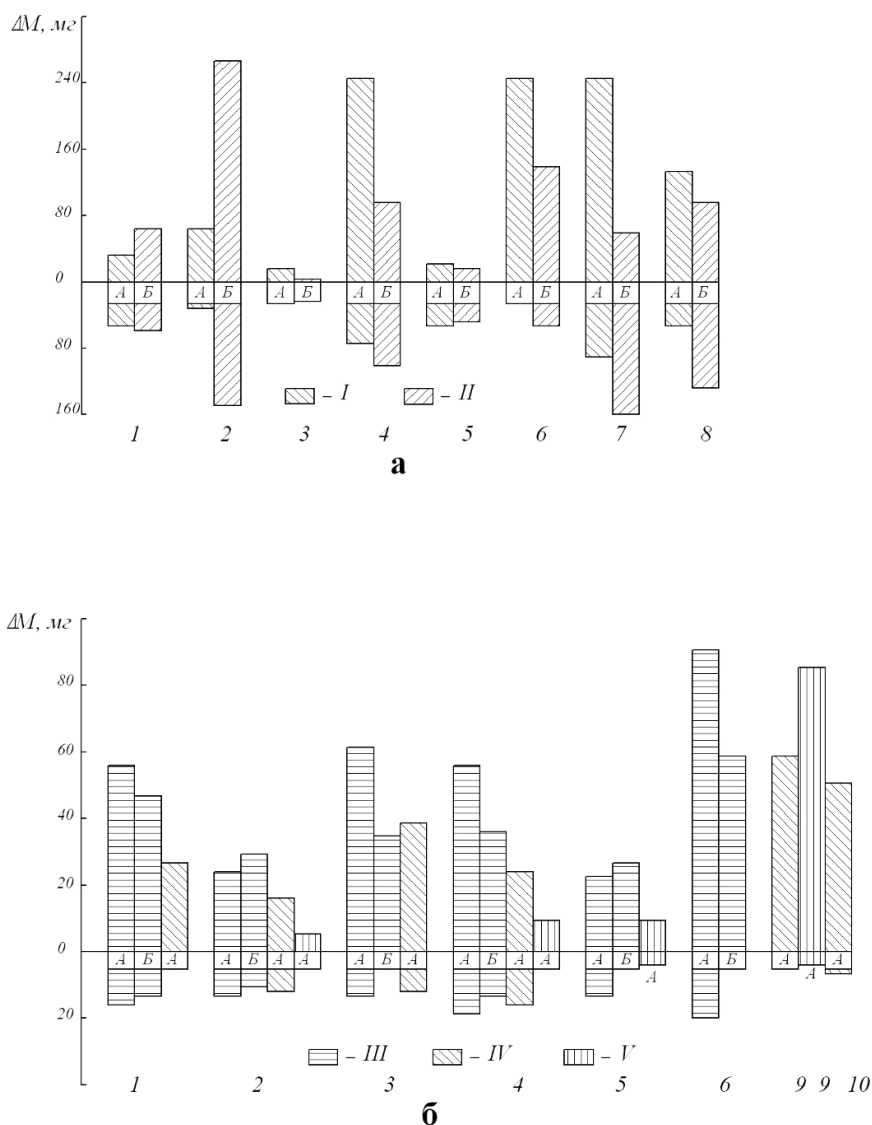


Рис. 5.16 Втрата маси ΔM покриттів з порошків: нікельалюмінієвого сплаву(1); оксиду хрому (2); рутилового концентрату (3); нормального (4) і титанового (5) електрокорунду; бронз Бр А10 (6) і Бр 010 (8); плазма тексту ОТЗ (7); ПГ-19М-01 (9); ПТ-19Н-01 (10) і контртіл із сталі 45 (А) і чавуну СЧ20 (Б) при сухому терті (I,II) – а, в модельних розчинах тіста (III), бурякоцукрового виробництва (IV) і в молочній сировотці (V) – б

В кислому середовищі, яке моделює середовища бурякоцукрового виробництва з рН 4,4, найбільш зносостійкими в парі тертя зі сталлю 45 є покриття з нормального електрокорунду, оксиду хрому та нікельалюмінієвого сплаву (рис. 5.16). Зносостійкість покриттів з порошків ПГ-19М-01 і ПТ-19Н-01 приблизно в 2-2,5 рази нижча.

Зносостійкість сталі 45 в парі тертя з покриттями, які випробувались у цьому середовищі, приблизно однакова.

Розташування покриттів по зносостійкості в молочній сироватці не відрізняється від порядку в інших кислих середовищах, але інтенсивність зношування зразків в цьому випадку приблизно в 3 рази менша. Це пояснюється присутністю в сироватці залишків білків і жиру, які додатково змащують поверхні тертя.

Результати випробувань покриттів показали, що їх порядок в ряду зносостійкості для всіх вибраних середовищ однаковий. Це дозволяє використовувати для визначення відносної зносостійкості плазмових покриттів в кислих технологічних середовищах харчових виробництв модельні розчини (зокрема буферний розчин двохзаміщеного фосфорно-кислого натрію і лимонної кислоти в дистильованій воді, який характеризується великою стабільністю властивостей).

Металографічний аналіз показав, що механізм руйнування робочих поверхонь зразків з металевими і оксидними покриттями різний. Поверхні з металевими покриттями зношуються в кислих середовищах, на думку Г. Прейса і М. Сологуба, з проявленням хемомеханічного ефекту, але при цьому вплив механічного фактору є більш значним, тому в ряду зносостійкості покриття розташовується згідно з їх мікротвердістю. Зносостійкість оксидних покриттів в цих умовах визначається співвідношенням фізико-механічних властивостей (крихкості, пластичності), а також адгезією і когезією шарів, які наносяться при напиленні, і мало залежить від електрохімічних властивостей робочих середовищ. Зношування цих покриттів протікає шляхом викришування мікрочастинок, які утворюють на робочих поверхнях тіл тертя видимі неозброєним оком рівчаки. Шорсткість робочих поверхонь зразків в процесі досліджень втрачає регулярність (висота мікронерівностей на окремих ділянках зразків після випробувань коливалась в межах від 0,2

до 25 мкм), але після припрацювання це не спричиняє помітної інтенсифікації зношування.

Оксидні покриття мають високу твердість і значно більшу несучу здатність, чим покриття з бронзових порошків. Різке збільшення моменту і коефіцієнту тертя, а також інтенсивності зношування пари тертя сталь-бронза в 15 %-ному розчині цукрози з рН 4,5 настає в результаті зчеплення при тиску в зоні тертя 2-3 МПа. Для пар тертя "сталь 45 - оксид хрому" і "сталь 45 - рутиловий концентрат" в аналогічних умовах інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя при збільшенні тиску в зоні тертя до 12 МПа практично не змінюється. Це обумовлює перспективність використання плазмових покриттів з порошків оксидів для зміцнення деталей технологічного обладнання харчових виробництв, які працюють при великих навантаженнях. Покриття з порошку сплаву ПН85Ю15 також може бути рекомендоване для підвищення довговічності деталей обладнання, яке працює в кислих технологічних середовищах.

Встановлено також доцільність використання плазмових покриттів в технологічних середовищах харчової промисловості при абразивному зношуванні. Результати випробувань були застосовані при зміцненні захисних втулок валів відцентрових насосів, які перекачують ставкову, транспортерно-мийну, жомопресову і кислу жомову води, дифузійний і сатурований соки та вапняне молоко.

Проведені на ряді цукрових заводів дослідження виявили ділянки цукрового виробництва, де захисні втулки насосів зношуються найбільш інтенсивно (табл. 5.8). Встановлено, наприклад, що знос втулок в кислій жомовій воді в 22,5, а в транспортно-мийній в 11,2 рази більший, ніж в конденсаті випарних апаратів. Провідним видом зношування захисних втулок в сальникових ущільненнях насосів для перекачування ставкової і кисло-жомової води, дифузійного соку першої сатурації є корозійно-

Середньодобовий знос і захисних втулок відцентрових насосів, їх відносна зносостійкість ε і вплив плазмових покриттів на знос

Технологічне середовище	l, мкм	ε, мкм/мкм	Рекомендоване плазмове покриття	Коефіцієнт збільшення зносостійкості, K
Ставкова вода	15	0,4	ПГ-10Н-01	7,2
Кисла жомова вода	135	0,04	ОТЗ	5,1
Транспортерно-миюча вода	67	0,09	ПГ-10Н-01	5,6
Вапняне молоко	45	0,13	ОТЗ	6,3
Дифузійний сік	33	0,18	ПН85Ю15	3,0 - 5,2
Сік 1 сатурації	20	0,3	Мн28	3,1
Конденсат випарних апаратів	6,0	1	ПН85Ю15	9,2

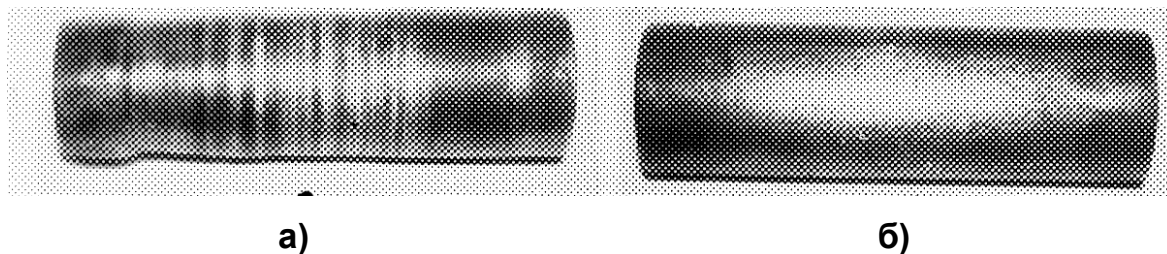


Рис. 5.17 Захисні втулки (Ст 3) відцентрових насосів для перекачування транспортерно-мийної води на цукровому заводі: а – після 80 діб експлуатації; б – відновлена та зміцнена плазмовим напиленням порошком ПГ-10Н-01 з наступним оплавленням

406

застосування зміцнених втулок дало змогу зменшити в 2-5 разів втрати напівпродуктів цукрового виробництва.

Доцільно зміцнювати деталі обладнання цукрової промисловості газотермічними покриттями безпосередньо на машинобудівних заводах, які його виготовляють. Так, на Болоховському машинобудівному заводі (Росія) за допомогою, Тульського національного технічного університету (Росія) і НУХТ була впроваджена технологія і лінія по нанесенню газотермічних покриттів на вузли транспортної системи дифузійних апаратів.

Найбільшому корозійно-механічному зношуванню в апаратах типу ПДС-20 (рис. 5.18) піддається корпус і транспортна система в середній частині дифузійного апарата. Знос досягає 3-4 мм/рік для транспортної системи і 1,5-2,0 мм/рік для корпусу. Руйнування поверхонь стрічкових шнеків транспортної системи залежить від відстані їх розміщення відносно вісі дифузійного апарата: чим ближче до трубовала розташована поверхня спіральної стрічки, тим менше спрацювання. Це пояснюється тим, що спіральні стрічки на периферії апарата працюють у більш жорстких умовах: знаходяться то в рідкій, то в пароподібній фазі середовища і піддаються дії абразивних забруднень сокостружкової суміші.

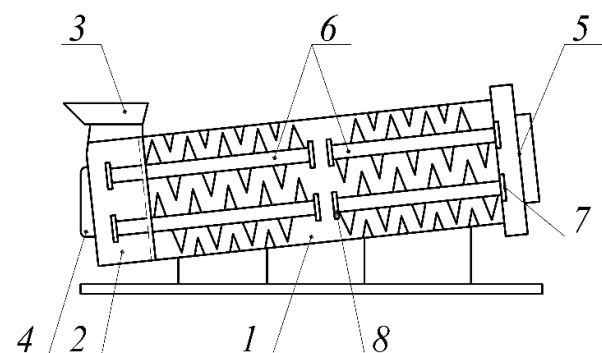


Рис. 5.18 Схема похилого дифузійного апарата типу ПДС-20: 1 – корпус; 2 – камера; 3 – шахта; 4,5 – нижній та верхній приводи; 6 – шнек; 7,8 – зовнішня та внутрішня підшипникові опори

Дослідження, проведені на ряді цукрових заводів України і Росії показали, що строк служби опор ковзання дифузійних апаратів типу ПДС-20 та ПДС-30 не перевищує 230-350 діб, що складає 2-3 виробничих сезони.

Середня швидкість ковзання цапфи вала в опорі транспортної системи дифузійного апарата складає 0,025 - 0,035 м/с, тиск на контакт з цапфою трубовалу, за розрахунками Болоховського машинобудівного заводу (БМЗ), не перевищує 0,35 - 0,45 МПа, а невисока стійкість опор пов'язана з складом технологічного середовища, яке попадає в опору.

Зношення цапфи вала за період експлуатації складає 0,35 - 0,8 мм, а знос укладки за той же період досягає 2 - 7 мм.

З приведених викладок випливає, що для забезпечення безремонтного строку експлуатації апарата ПДС-20 (ПДС-30) протягом 12 років (згідно з технічними умовами) потрібно значно збільшити зносостійкість його деталей та вузлів. Це може бути досягнуто збільшенням довговічності опор ковзання та шнеків дифузійних апаратів.

Для зміцнення деталей транспортної системи нахилених дифузійних апаратів була використана назка захисних покриттів, однак, найкращим за зносостійкістю виявилось покриття ПН55Т45 (у мас. %: Ni-55, Ti-45).

Випробування зміцненої покриттям ПН55Т45 транспортної системи на Гулькевичському цукровому заводі показало її високу надійність і довговічність. Після трьох років експлуатації помітних змін в технологічному стані транспортної системи не виявлено.

Відомо, що кавітація суттєво впливає на зношування деталей машин, які контактують з рідкими технологічними середовищами. Встановлено, що кавітаційне руйнування конструкційних матеріалів має механічну природу. Разом з тим, не можна нехтувати впливом корозійних процесів, внесок яких у загальне спрацювання обладнання при порівняно низькому рівні зовнішнього мікроударного впливу є досить суттєвим. Тому дослідження закономірностей кавітаційно-ерозійного зношування має матеріалів і покриттів важливе наукове і практичне значення.

Для дослідження зносостійкості покриттів застосовували розроблені М.Кіндрачуком зі співробітниками порошки евтектичних сплавів системи 12Х18Н9Т-ТіВ₂ (марки ТН), 12Х18Н9Т - ТіВ₂ - СгВ₂ (ХТН) і 12Х18Н9Т-ТіВ₂-VC (ВТН) (ТУ14-127-161-80, НВО "Тулачермет", (Росія). Металева матриця сплавів відповідає сталі 12Х18Н9Т, а зміцнювальними компонентами служать дибориди титану та хрому і монокарбід ванадію (табл. 5.9).

Таблиця 5.9

Хімічний та фазовий склад порошкових евтектичних сплавів

Сплав	Вміст компонентів, мас. %							Фазовий склад		Вміст зміцнюючих фаз, об. %
	Сг	Ni	Ti	V	B	C	Fe	Матриця	Зміцнюючі сполуки	
ТН	15,7	7,8	8,9	-	4,0	-	63,6	-18Cr-9Ni	TiB ₂	20,0
ВТН	15,4	7,7	3,2	8,1	1,4	1,9	62,3	-18Cr-9Ni	TiB ₂ +VC	21,3
ХТН	20,5	8,6	2,5	-	2,6	-	65,8	-18Cr-9Ni	TiB ₂ +CrB ₂	13,0

Плазмове напилення здійснювали на установці УПУ-3Д. Наносили покриття на зразки мало- і середньовуглецевої сталі, а також на сталь 12Х18Н9Т. Товщина випробуваних покриттів становила 200...250 мкм. У напилених евтектичних покриттях, при дослідженнях за допомогою оптичного мікроскопа спостерігалися слабо протравлені області, названі нами білими шарами, нерозплавлені або частково розплавлені порошинки, а також невелика (біля 10%) пористість. З метою дослідження впливу структури на корозійну і кавітаційну стійкість, плазмові покриття піддавали оплавленню струмами високої частоти (СВЧ) та лазерним променем. Спочатку визначали інтенсивність і швидкість корозії в статичних умовах, а потім випробували в умовах ультразвукової кавітації у водопровідній воді та 3%-му розчині NaCl у воді. Вплив корозійного фактору при дії ультразвукової кавітації на поверхню зразків кількісно оцінювали за даними потенціостатичних вимірювань.

Результати проведених досліджень на корозію в статичних умовах (інтенсивність I_k і швидкість h_k) свідчать, що корозійна стійкість сплавів в основному визначається складом металевої матриці і, в меншій мірі, залежить від кількості та структурного складу зміцнюючих фаз (табл. 5.10).

Таблиця 5.10

**Інтенсивність (I_k) і швидкість (h_k) корозії сталі 12X18H9T та
евтектичних сплавів**

Сплав	Прісна вода		3% розчин NaCl	
	I_k , г/(м ² /год)	h_k , мм/рік	I_k , г/(м ² /год)	h_k , мм/рік
ТН	0,00037	0,00040	0,0032	0,0036
ВТН	0,00040	0,00042	0,0037	0,0041
ХТН	0,00032	0,00036	0,0030	0,0032
12X18H9T	0,00031	0,00034	0,0029	0,0032

Результати випробувань кавітаційної стійкості покриттів свідчать, що наявність у воді хлоридів інтенсифікує процес кавітаційного руйнування покриттів на 20-30%. При цьому кінетика втрати маси зразків з плазмовим покриттям відрізняється ступінчастістю при загальній тенденції зростання втрати маси зі збільшенням часу випробувань (табл. 5.11). Очевидно, це зумовлено шаруватістю структури покриття. Завдяки високій хімічній стійкості евтектичних покриттів вплив корозії в технологічному середовищі незначний. Руйнування мікрооб'ємів поверхневого шару покриття спричинене циклічними навантаженнями від багаторазової дії рідини з протіканням втомних процесів у матеріалі. Воно починається з накопичення субмікроскопічних дефектів, що генерують зародження мікротріщин. Їх ріст до критичних розмірів, коли енергія, накопичена дефектом, більша за енергію сил зчеплення частинок у його вершині, викликає елементарний акт руйнування. Орієнтація мікротріщин свідчить про їх переважне зародження на межах окремих частинок і на поверхневих дефектах покриття. Утворення системи мікротріщин є механізмом

дисипації енергії кавітації, а відокремлення частинок зношування - результатом крихкого руйнування. У плазмових покриттях можливі також інші дисипативні явища, зумовлені їх нерівно-важним станом (розпад пересичених розчинів $\gamma \leftrightarrow \alpha$, перетворення в метастабільному аустеніті тощо). Сприятливі реологічні властивості евтектичних покриттів не можуть бути повністю реалізовані через їх низьку адгезійно-когезійну міцність (міцність зчеплення покриттів з основою 16...20 МПа).

Таблиця 5.11

**Втрата маси евтектичними покриттями при
кавітаційно-ерозійному руйнуванні, $\Delta M \cdot 10^3$, кг/м²***

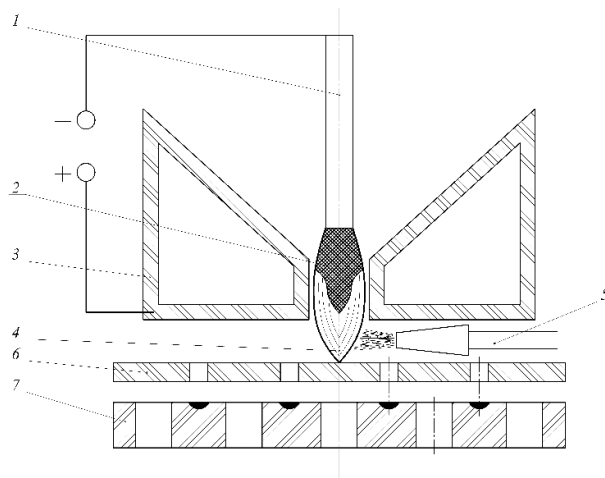
Матеріал	Тривалість випробування, год		
	4	8	12
ТН (плазмове напилення)	30/37	80/95	122/140
ВТН (плазмове напилення)	50/62	70/92	75/91
ХТН (плазмове напилення)	38/45	55/68	62/75
ХТН (обробка СВЧ)	19/23	40/49	45/57
ХТН (обробка лазером)	5/6	20/23	32/38
12Х18Н9Т	8/10	17/24	37/40
*В чисельнику - у прісній воді; в знаменнику - у 3%-му розчині NaCl.			

Відомо, що оплавлення плазмових покриттів суттєво впливає на їх структуру, фізико-механічні та триботехнічні властивості. Для визначення впливу швидкості нагрівання та охолодження на структуру і кавітаційну стійкість покриттів, оплавлення проводили струмом високої частоти (СВЧ) і лазером. Мікроструктура оплавлених покриттів має стовп-частодендритну будову, яка пояснюється тим, що внаслідок дії концентрованої енергії метал, розплавляється, під впливом значного температурного градієнта і великої швидкості кристалізації головні вісі дендритів ростуть паралельно напрямку тепловідведення. Оплавлені

покриття практично безпористі. Кавітаційна стійкість плазмових покриттів, оплавлених лазером, виявилась вищою, ніж оплавлених СВЧ. Це обумовлено більш високим ступенем диференційованості складових евтектики після лазерної обробки. Очевидно, що керувати кавітаційною стійкістю плазмових покриттів можна за допомогою регулювання дисперсності їх структури. Управління величиною дисперсних кристалів фаз проникнення і станом металевої матриці дає можливість підібрати таку технологію обробки концентрованими джерелами енергії, яка робить покриття зносостійким при кавітаційному зношуванні.

Способи зниження спрацювання і втрат потужності на тертя завдяки використанню антифрикційних матеріалів у м'ясопереробленні не набули значного поширення. Відомо про використання антифрикційної пластмаси з підкладкою у вигляді металевого диска для виготовлення перфорованої решітки м'ясорізального вовчка, про який уже ішла мова раніше. Раціональне також використання м'ясорізальних решіток з бронзовими вставками або ножів, на яких позаду різальних лез розміщені вставки з мідних сплавів (див. підрозділ 15.2.2). Але такі засоби підвищення зносостійкості або не технологічні, або мають ряд інших вад.

Так, випробування хрестоподібних ножів вовчків з бронзовими вставками, завдяки яким реалізується ефект вибіркового переносу у подрібнювальному вузлі, показало, що леза ножів у процесі роботи піддаються руйнуванню від втоми, а в решітках з бронзовими вставками виникають тріщини і під тиском фаршу вони руйнуються, через це було прийнято рішення формувати бронзові антифрикційні вставки плазмовим напиленням.



Перед напленням у решітці (рис.5.19) свердлили сфероподібні заглиблення, а потім, за допомогою плазми і спеціального екрана вони заповнювалися бронзою, яка допущена санітарними службами до контакту з

м'ясом (БрАЖ-9-4).

Рис. 5.19 Схема плазмового наплення м'ясоподрібнювальної решітки:
1 – електрод; 2 – електрична дуга; 3 – сопло; 4 – плазмовий струмінь; 5 – транспортер бронзи; 6 – екран; 7 – решітка

Технологічний процес плазмового наплення включав такі основні операції: підготовку порошків, налагодження обладнання, механічне оброблення та знежирювання деталей, наплення бронзового порошку.

Отвори в решітці можуть мати різний діаметр, в залежності від необхідного технологічного призначення м'ясного фаршу, а заглиблення в решітці (допоміжні отвори), які заповнюються бронзою, мають розміщуватися між основними отворами на концентричних колах так, щоб радіус кожного наступного кола перевищував радіус попереднього на величину радіуса допоміжного отвору (рис. 5.20).

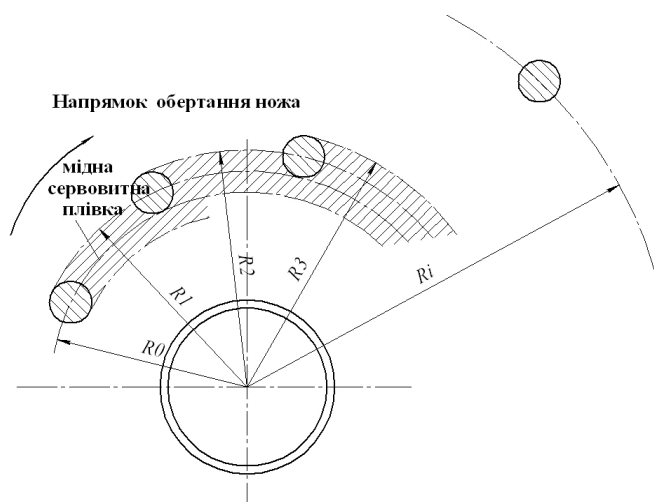


Рис. 5.20 Схема розміщення наплених плазмою вставок на решітці м'ясоподрібнювального вовчка

Кількість і діаметри напилених плазмою антифрикційних вставок можуть бути різними, але на концентричному колі i -го радіуса має бути хоча б одна вставка для збереження безперервності утвореної на поверхні решітки мідної сервовитної плівки, яка потрібна для реалізації ефекту вибіркового переносу.

Радіус кожного концентричного кола може вибиратися із співвідношення

$$R_i = R_{i-1} + D_B / n, \quad (5.1)$$

де R_i – радіус першого кола, на якому розміщена i -а вставка; R_{i-1} – радіус найближчого меншого кола, на якому розміщена вставка $i-1$; D_B – діаметр антифрикційної мідної вставки; n – коефіцієнт, що враховує нерозривність утвореної сервовитної мідної плівки ($n \geq 1$) і залежить від умов роботи різального комплексу та характеристик технологічного середовища (підбирається експериментально).

Запропонований спосіб дає можливість підвищити ресурс решітки до перезаточування з 7...8 до 15...20 год, а зносостійкість ножів із сталі 65Г у разі роботи з напиленими решітками зростає на 70% у порівнянні з ножами, що працюють у парі з серійними решітками із сталі У8, і на 30 % у порівняно з ножами з бронзовими вставками (табл. 5.12).

Таблиця 5.12

**Середнє лінійне спрацювання різальних лез
м'ясоподрібнювальних ножів вовчків**

Маса переробленої яловичини 1-ї та 2-ї категорій, т	Знос ножів із сталі 65Г, мм		
	без напилення	з антифрикційною пластиною	в умовах контакту з напиленою плазмою решіткою
10	0,110	0,025	0,010
20	0,175	0,065	0,040
30	0,210	0,085	0,065
40	0,270	0,125	0,095

Таким чином, ефективність використання напилених плазмою решіток обґрунтована скороченням потреб м'ясопереробного підприємства в запасних ножах і решітках завдяки підвищенню довговічності різального комплексу, зменшенню енергетичних затрат на перероблення м'ясопродуктів внаслідок зниження сил тертя і покращення різальної здатності м'ясоподрібнювального комплексу, та якості м'ясопродуктів.

Дослідження, проведені на ряді тютюнових фабрик, дозволили скласти номенклатурний перелік деталей, перспективних для відновлення і зміцнення газотермічним напленням, який налічує більш ніж 70 найменувань деталей імпортного обладнання. Серед них колінчасті і ступінчасті вали, кулачки, ролики, напрямні, форматна гарнітура, корпусні деталі та лезовий інструмент.

Після плазмової наплавки сплавом ПС-12НВК-01 (рис. 5.21, а) термін служби входних конусів виріс з 40 годин (загартована сталь 45) до 160 год (сталь 45 + ПС-12НВК-01). Причому, на зношеній поверхні зміцнених деталей були відсутні виразки, а рівчаки від абразивного зношування були набагато меншими (рис. 5.21, в). Зносостійкість вітчизняних наплавлених конусів наблизилась до зносостійкості імпортних, виготовлених способами порошкової металургії з твердих сплавів.

Для зміцнення деталей, які працюють в умовах дії зважених часток абразиву, що пересуваються з великою швидкістю (абразивна ерозія) ефективні оксидні покриття. Це стосується вентиляторів для відсмоктування забрудненого тютюновим пилом повітря. Низька довговічність (0,5 – 1 рік) вентиляторів ВІ-01-000 обумовлена низькою зносостійкістю корпусу та крильчатки. В свою чергу, зносостійкість корпусу визначається зносостійкістю його радіусної частини (рис.5.22, а), а зносостійкість крильчатки обумовлена зносостійкістю лопаті.

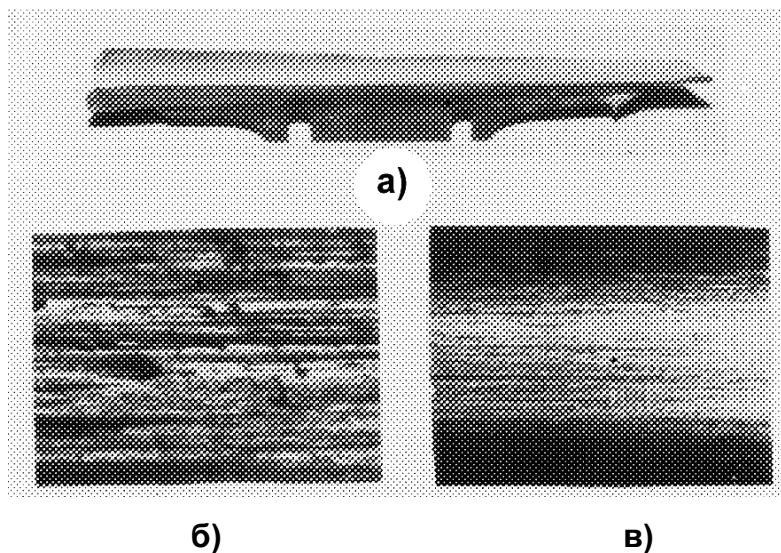


Рис. 5.21 Вхідний конус цигаркової машини, зміцнений плазмовою наплавкою самофлюсованого сплаву ПС-12НВК-01 (а) та зношені поверхні серійного (б) і зміцненого (в) конусів після 40 годин експлуатації

Для захисту від абразивної ерозії радіусна частина корпусу вентилятора та лопаті крильчатки були зміцнені плазмовими покриттями порошком електрокорунду Мн28 з прошарком порошку ПН85Ю15 (рис. 5.22, б). Зміцнення вказаних деталей дозволило в 3-4 рази збільшити довговічність вентиляторів.

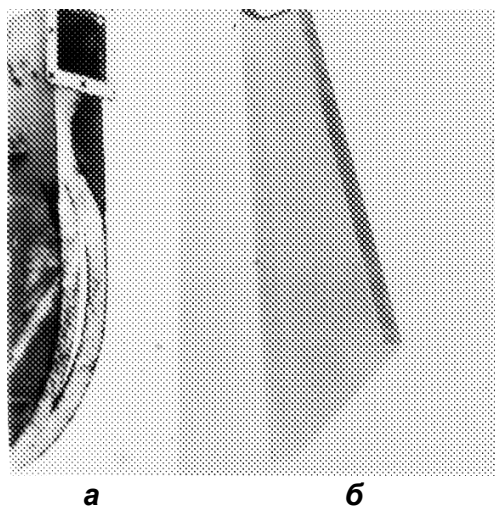


Рис. 5.22 Зношена радіусна частина (а) та зміцнена електрокорундом лопать (б) вентилятора ВІ-01-000 виробництва Кременчуцького РМЗ

Нанесення електрокорунду Мн28 на ролики транспортування паперу цигаркової машини “Марк9-СМ” (Великобританія) і вали тютюнового обладнання дозволило підвищити їх зносостійкість у декілька разів.

З метою забезпечення захисту деталей від зносу і корозії та збільшення строку експлуатації, а також зменшення витрат дорогих нержавіючих і кольорових сплавів був проведений аналіз продукції ряду підприємств харчового машинобудування.

Для зміцнення плазмовим напиленням по Ростовському можна рекомендувати деталі шнекпресів (шнеки, вали, напівмуфти), фрезерів (циліндри, ножі), сирних пресів (полиці, траверси), шестерінчастих насосів (вали, кришки, деталі торцевих ущільнень), деталі борошновозів (сальникові ущільнення редуктора) і гомогенізаторів (вали), цапфи валів і деталі транспортної системи дифузійних апаратів опорні ролики хлібопекарських печей, які працюють при температурах до 300⁰С, великогабаритні вали дискових фільтрів ДФ-80 та ДФ-100, а також вали цукронасосів для бурякоцукрових заводів.

Аналогічний аналіз проведено на ряді підприємств харчової промисловості.

На хлібозаводах можна виділити такі деталі і вузли для захисту і відновлення плазмовими та газополумєневими покриттями: опорні ролики хлібопекарських печей, вали шестерінчастих насосів, робочі органи тістозмішувачів, робочі органи (вал, поршень, циліндр) тістороздільних машин, вали-шнеки гвинтових насосів.

На макаронних фабриках захисту від спрацювання і відновленню плазмовим напиленням підлягають шнеки і циліндри пресів макаронного виробництва, сталеві ролики барабанів, сушарок, алюмінієві напрямні пересадників попередньої та кінцевої сушарки, деталі дозаторів борошна на пресах.

Особливо доцільним є використання газотермічного напилення для великогабаритних деталей в цукровій промисловості: валів і втулок дифузійних апаратів, вакуумапаратів, змішувачів, фільтрів, буряконасосів, відцентрових насосів типів СОР, НД, НПСФ для

перекачування технологічних середовищ, пальців бурякоелеваторів і транспортерів та ін.

В молочній промисловості відновленню газотермічним напиленням підлягають запірні крани, вали і захисні втулки насосів, а також деталі автоматів для фасування молока в багатошарові паперові пакети, пляшкових транспортерів, пляшкомиїних машин, машин розливу та ін.

Обстеження обладнання м'ясопереробних заводів і м'ясокомбінатів України дозволило виділити такі деталі для газотермічного напилення та наплавлення: привідні вали в установках для оброблення кишок; вісі ножів відцентрових машин; вали сепараторів, привідні вали установок для зняття шкір; вали вовчків; вали-шестерні кутерів; ножові вали кутерів; осі та вали кутерів-змішувачів; вали та вісі фаршезмішувачів; вали насосів, фаршезмішувачів, котлетних автоматів і пельменних автоматів та ін.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що газотермічні покриття можуть бути використані при виготовленні і ремонті деталей харчового обладнання на машинобудівних і ремонтних заводах та безпосередньо на харчових підприємствах з використанням невеликих високопродуктивних установок для газотермічного напилення. Але більш доцільною є організація спеціалізованих ділень газотермічного напилення.

5.3.3 Хіміко-термічна обробка елементів системи

5.3.3.1 Методи нанесення термо-дифузійних покриттів

При дифузійній хіміко-термічній обробці (ХТО) поєднуються термічний і хімічний вплив на матеріал деталей з метою підвищення довговічності. На поверхні деталі утворюється шар, що має істотні відмінності від серцевини. По суті на поверхні маємо новий сплав, що за

своїми фізико-хіміко-механічними властивостями може значно відрізнятися від матеріалу основи.

На рис. 5.23 приведено класифікацію основних видів ХТО. Насичення поверхневого шару при ХТО може здійснюватись різними методами. Основні з них такі: насичення з порошкових сумішей (порошковий метод); дифузійне насичення з розплавів солей або металів, що містять насичуючий елемент (з електролізом і без застосування електролізу); прямоточний і циркуляційний методи дифузійного насичення з газових середовищ; насичення з паст і суспензій (шлікерний спосіб); дифузійне насичення з використанням вакууму.

Дифузійне насичення з порошкових сумішей в даний час широко застосовують для проведення хромування, алітування та силіціювання.

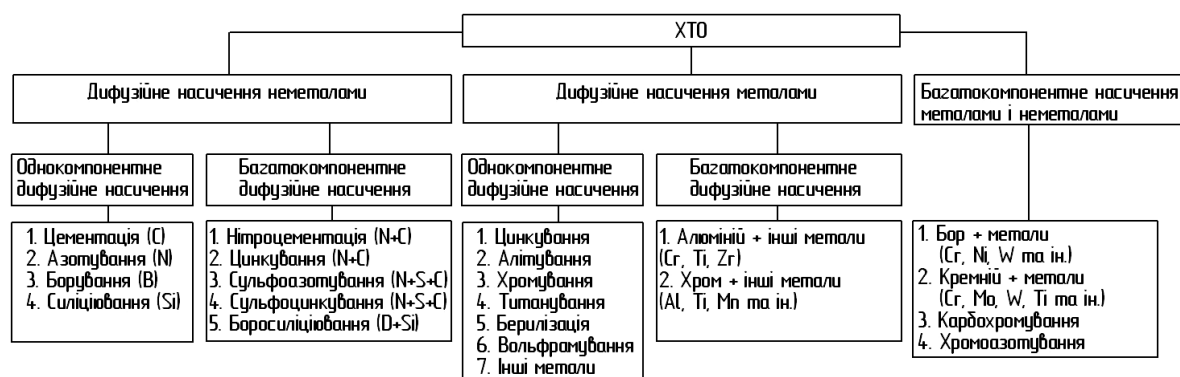


Рис. 5.23 Класифікація основних видів хіміко-термічної обробки

Розрізняють контактний і неконтактний варіанти цього методу. Контактний спосіб здійснюють в герметичних або негерметичних контейнерах, а неконтактний - лише в герметичних камерах або контейнерах. Оброблювані вироби поміщають у порошкову суміш, якою заповнюють контейнер, виготовлений із звичайної або жаростійкої сталі. До складу суміші входять необхідні компоненти для дифузійного насичення поверхні деталі під дією високих температур.

Перспективним для зміцнення деталей харчового обладнання є дифузійне насичення із суспензій і паст (шлікерний метод). Шлікерний метод в порівнянні з порошковим має наступні переваги: більш висока технологічність і економічність; можливість наносити покриття на частину деталі, а також обробляти великогабаритні деталі; можливість легко одержувати багатокомпонентні покриття.

Суспензія (шлікер) містить тверду та рідку фази. В якості рідкої фази використовують різні органічні сполуки (канцелярський клей, колоксилін, декстрин, целюлозу, оліфу тощо). Тверда фаза - це порошок насичуючого елементу з розміром частинок меншим 40 мкм. Суспензію наносять щіткою, зануренням, пульверизатором на якісно очищені, знежирені поверхні і, після сушіння на повітрі відпалюють у вакуумі, в середовищі нейтральних газів, або в повітряній атмосфері.

Значний інтерес для підвищення довговічності деталей обладнання харчової промисловості викликають способи нанесення багатокомпонентних покриттів: хромоалітування, титаноалітування, боросиліціювання, борохромування, боротитанування, хромосиліціювання, титаносиліціювання та інші.

При **хромоалітуванні** (одночасному або послідовному насиченні поверхні деталі хромом і алюмінієм) значно підвищується зносостійкість, корозійна і ерозійна стійкість. Так, зносостійкість хромоалітованої сталі У8 в умовах тертя ковзання без змащування в 1,5...2 рази вища ніж без ХТО. Корозійна стійкість у водяних розчинах NaCl, H₂SO₄, HNO₃, HCl, H₃PO₄, і CH₃COOH збільшується, у порівнянні з незахищеними вуглецевими сталями, в 5...10 разів, а ерозійна стійкість - в 4 рази.

Бороалітування застосовують для підвищення зносостійкості і жаростійкості, корозійної стійкості металів і сплавів. Корозійна стійкість вуглецевих сталей 20 і 45 в розчинах кухонної солі підвищується в 9...11 разів.

Боросиліціювання застосовують, в основному, для підвищення зносостійкості і корозійної стійкості деталей.

Широке застосування **борохромування** обумовлене значним підвищення фізико-хімічних характеристик боридних шарів у поєднанні з хромом.

Боротитанування надійно захищає вироби від корозії в агресивних середовищах харчової промисловості, від інтенсивного абразивного і кавітаційно-ерозійного зношування.

Хромосиліціювання сталей підвищує їх зносостійкість, ерозійну і кавітаційну стійкість, опір газовій і електрохімічній корозії. В результаті хромосиліціювання кавітаційна стійкість сірого чавуну підвищується в 4...6 разів.

5.3.3.2 Хіміко-термічні методи зміцнення деталей

5.3.3.2.1 Цементация

Цементация - хіміко-термічне оброблення, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару сталі вуглецем під час нагрівання у відповідному середовищі - карбюризаторі (табл. 3.16), після якої сталь проходить термічне оброблення – загартування та низьке відпускання. Внаслідок такого зміцнення у сталі утворюється в'язка серцевина.

Призначення цементации та термічного оброблення - підвищення твердості, теплостійкості, зносостійкості та межі витривалості поверхневого шару.

Остаточних властивостей цементовані вироби набувають після термічного оброблення. Це робиться для виправлення структури, подрібнення зерна серцевини і цементованого шару, отримання високої твердості цементованого шару та якісних механічних властивостей

серцевини, вилучення з цементованого шару карбідної сітки, яка може виникнути через перенасичення його вуглецем.

Цементациї піддають низьковуглецеві сталі (15, 20, 15Х, 15ХФ, 18ХГТ, 25ХГТ, 18ХНМА, 30ХГМ, 20ХНМ, 12ХН3А, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА та ін.). Для цементациї, як правило, необхідна температура, вища від точки $A_{сз}$ (930-950°C), коли аустеніт стійкий і може розчиняти у великій кількості вуглець. При цій температурі дифузійний шар складається тільки з аустеніту, а після повільного охолодження - із продуктів його розпаду: фериту та цементиту і концентрація вуглецю звичайно не досягає межі насичення. У структурі цементованого шару концентрація вуглецю за глибиною зменшується. Після повільного охолодження в ньому можна розрізнити (в напрямі від поверхні до серцевини) три зони:

- заевтектоїдну, що складається із перліту і вторинного цементиту, які утворюють сітку по колишньому аустеніту (зона в цементованому шарі часто відсутня);
- евтектоїдну, що складається тільки з одного пластинчастого перліту;
- зону, що утворена з фериту.

Розглянемо детальніше цементацию у різних середовищах (табл. 5.13).

При здійсненні **цементациї в твердому карбюризаторі** на днища ящиків засипають шар карбюризатора завтовшки 30-40 мкм, на нього кладуть перший ряд деталей, витримуючи відстань 10-15 мм між ними, до бокових стінок ящика та між рядами деталей по висоті. Останній (верхній) ряд засипають шаром карбюризатора 35-40 мм, щоб компенсувати його усадку. Проміжки між кришкою та стінками ящика замащують вогнетривкою глиною і просушують. Часто ящик завантажують у піч доверху дном.

Таблиця 5.13

Цементация сталі

Карбюризатор	Температура, °C	Загальна тривалість процесу, год	Глибина шару, мм	Примітка
Цементация в твердому карбюризаторі				
Деревне вугілля (березове) в суміші з 20-25% BaCO_3 і 3.5-5% CaCO_3 Кам'яний напівкокс у суміші з 10-15% BaCO_3 і 3.5-5% CaCO_3 . Зернистість 5-10 мм, вологість не більше за 5-6%. Робоча суміш складається з 25-30% свіжого відпрацьованого карбюризатора	930-950	4-15	0,5-1,5	Ящик завантажують у піч нагріту до 600-700°C. Охолоджують ящик на повітрі.
Газова цементация				
Ендотермічна атмосфера (близько 20% CO , 40% H_2 , 40% N_2) + 5-8% природного газу CH_4	930-950	6-10	0,7-1,5	У безмуфельних шахтних і камерних печах. В печі підтримують постійний тиск (25-30 мм вод.ст.) Охолодження – в середовищі для загартування В шахтах або камерних печах. Завантажують вироби в піч при 930-950 °C. Перед початком цементации з муфеля печі
Ендотермічна атмосфера + 3-5% природного газу (до 98% CH_4)	930-950	6-10	0,7-1,5	
Ендогаз (20% CO , 20% H_2 , 60% N_2 + 0.5-5% CH_4)	930-950	4-10	0,8-1,6	
Гази, що отримують із гасу, сінтину, різних спиртів, карбофлюїду, карбодрілу,				

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

суміші етанолу та пропану, тощо, безпосередньо в печі для цементації				повинно бути видалене повітря, щоб запобігти знеуглецюванню
Цементация в рідинному карбюризаторі				
78-85% Na_2CO_3 , (або K_2CO_3) + 10-15% NaCl)	870-900	0,5	0,15-0,2	Для дрібних деталей і нормалей. Недолік – нерівномірна глибина шару. Карбід кремнію додають після розплавлення солей. Регенерація ванни здійснюється через 3 год доданням 0,5-1,0% SiC від маси солей і Na_2CO_3 до необхідного рівня ванни

Недоліки цементації твердим карбюризатором:

- непродуктивна витрата енергії на прогрівання карбюризатора та ящиків;
- велика тривалість процесу;
- необхідність великих виробничих площ;
- труднощі регулювання процесу;
- неможливість безпосереднього загартування після цементації.

Однак універсальність та простота цементації твердим карбюризатором зумовлюють її широке застосування, особливо у дрібносерійному виробництві.

Газова цементация. Газова цементация порівняно з цементациєю у твердому карбюризаторі дає змогу:

- скоротити тривалість процесу в 1,5-2 рази;

- зменшити собівартість виробництва;
- регулювати глибину цементованого шару і вміст вуглецю в ньому;
- механізувати та автоматизувати процес.

Газову цементацію застосовують на заводах масового та великосерійного виробництва, але вона може використовуватись і в дрібносерійному виробництві. Під час газової цементації вироби нагрівають до температури цементації у газовій атмосфері (найчастіше CH_4 , CO , H_2 , CO_2 , H_2O , N_2). Сталь насичується вуглецем в основному через реакцію розпаду оксиду вуглецю та метану.

При реалізації **цементації в рідкому карбюризаторі** висока термічна стійкість і випаровування рідинних вуглеводів дають змогу в одному робочому просторі отримати газ і провести цементацію. Цей процес застосовується для зміцнення деталей невеликих розмірів.

Рідинні карбюризатори повинні забезпечити:

- мінімальне сажо- та коксоутворення;
- утворення великої кількості газу з одиниці маси (об'єму) під час його розпаду;
- мінімальний вміст сірчаних сполук, що роз'їдають деталі і арматуру печі.

Найменшою схильністю до сажо- і коксоутворення та найбільшим газоутворенням характеризуються карбюризатори, що складаються з парафінових вуглеводнів ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$).

Для прискорення газової цементації температуру інколи підвищують до $1000-1050^\circ\text{C}$.

У індивідуальному виробництві інколи застосовують цементацію пастами. Деталі покривають шаром паста завтовшки 3-4 мм, завантажують в ящики, кромки яких замащують глиною і нагрівають до $930-950^\circ\text{C}$ протягом 1,5-3,0 год. для отримання шару завглибшки 0,6-1,0 мм.

5.3.3.2 Азотування

Азотування - хіміко-термічне оброблення, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару азотом нагріванням у середовищі, яке містить аміак.

Азотування застосовується для підвищення поверхневої твердості і зносостійкості, межі витривалості, а також корозійної та ерозійної стійкості металорізальних інструментів, колінчастих та кулачкових валів, важелів керування, шпинделів, деталей насосів, шнеків, циліндричних насосів тощо.

Азотуванню можна піддавати будь-які сталі, але найчастіше конструкційні 30X, 40X, 490XФА, 20X3МВФ, 30X3МФ1, 38ХНМФА, 40ХГМ, 20X3ВА, 20ХН2МФ, 18Х2Н4ВА. Азотують також корозійностійкі жароміцні, інструментальні та штампувальні сталі (Р9, Х12М, Х6ВФ, 5ХНМ, 5ХНТ, 40ХСМФ, 4Х5МФС та ін.)

Можна відзначити наступну послідовність даного технологічного процесу.

1. Попереднє термічне оброблення заготовки. Ця операція складається із загартування і високого відпускання сталі для підвищення міцності і в'язкості серцевини виробу.

Загартовують сталь 38Х2МЮА, нагріваючи її до 930-950 °С з наступним охолодженням у воді або олії. Температура відпускання 600-675 °С, що перевищує максимальну температуру послідовного азотування і забезпечує отримання твердості, при якій сталь можна оброблювати різанням. Після відпускання сталь має структуру сорбіт.

2. Механічне оброблення деталей, зокрема шліфування.

3. Загартування ділянок, що не підлягають азотуванню. На них наносять тонкий шар (0,01-0,015 мкм) олова (електролітичним методом) або рідкого скла. Олово під час азотування розплавляється і утворює на поверхні сталі тонку плівку, через яку не проникає азот.

4. Азотування.

5. Остаточне шліфування або доведення виробу відповідно до заданих допусків.

Азотування ведуть у шахтних печах з примусовою циркуляцією газу і максимальною робочою температурою до 700 °С. Шахтні печі можуть мати два змінні муфелі або один стаціонарний.

Іонне азотування здійснюють у розрідженій азотній атмосфері, підключаючи оброблювані деталі до від'ємного електрода (катода). Анодом є контейнер пристрою. Обробляючи деталі складної конфігурації, застосовують спеціальні профільовані аноди. Між катодом (деталлю) і анодом виникає тліючий розряд і іони газу, бомбардуючи поверхню катода, нагрівають її до температури насичення. Іонне азотування має дві стадії: перша - очищення поверхні катодним розпиленням; друга - власне насичення.

Тривалість катодного розпилення 5-60 хв, напруга 1100-1400 В, тиск 0,1-0,2 мм рт. ст., температура поверхні деталі не перевищує 250°С. Температура іонного азотування 470-580 °С, тиск 1-10 мм рт. ст., робоча напруга 400-1100 В, тривалість від 1 до 24 год.

Іонне азотування застосовують для оброблення різних сталей і сплавів: інструментальних, мартенситно-старіючих, хромистих і хромонікелевих сталей, нітралоїв, чавунів тощо.

5.3.3.2.3 Нітроцементация

Нітроцементация - дифузійне насичення поверхневого шару сталі одночасно вуглецем і азотом у газовому або рідинному середовищах, що складається з насиченого вуглецем газу й аміаку. Основним призначенням нітроцементации є підвищення твердості та зносостійкості сталевих виробів, а також поліпшення їх механічних властивостей.

Товщина нітроцементованого шару звичайно дорівнює 0,2-1,5 мм.

Тривалість нітроцементатації 4-10 год.

Для нітроцементатації легованих сталей рекомендується використовувати ендотермічну атмосферу, до якої додають 2,5-5,5 % необробленого природного газу і 2,0-3,5 % NH_3 . Інколи застосовують також екзоендотермічну атмосферу, яка містить 20 % H_2 , 20 % CO і 60 % N_2 , що підвищує опір крихкому руйнуванню і межу витривалості оброблюваних виробів. Нітроцементатація здійснюється у шахтних та ретортних шнекових печах. У шахтних печах нерідко застосовують рідинний карбюризатор - триетаноламін, який у вигляді крапель вводять в робочий простір.

Після цементатації виконують загартування безпосередньо із печі з охолодженням, а повторно нагрівши виріб, ступеневе загартування. Останньою операцією є загартування. За оптимальних умов насичення структура нітроцементованого шару повинна складатися з дрібнозернистого мартенситу, невеликої кількості дрібних рівномірно розподілених карбонітридів і 20-30 % залишкового аустеніту.

5.3.3.2.4 Борування

Борування - хіміко-термічне зміцнення поверхневого шару металу дифузійним насиченням бором у відповідно нагрітому середовищі.

Борування найчастіше застосовують для підвищення зносостійкості деталей механізмів, що працюють в агресивних і абразивних середовищах, а також в умовах підвищених температур.

Використовується також для зміцнення поверхонь, що працюють переважно на зношування: металорізальні інструменти, прес-форми, деталі роздрібнювальних і для миття під тиском машин, витяжні та згинальні штампи тощо. Стійкість вказаних виробів після борування зростає у 2-10 разів.

Поверхневий шар, що насичується бором, відзначається

підвищеною корозійною стійкістю, теплостійкістю, високою твердістю, стійкістю проти зношування.

Методи борування сталі представлено в табл. 5.14.

Таблиця 5.14

Методи борування сталі

Боризатор	Темпе- ратура, °C	Час, год	Глиби -на шару, мм	Примітка
Борування в порошкоподібних сумішах				
Порошки аморфного карбіду бору або феробору + 30-40% глинозему + 1-3% NH ₄ Cl	950-1050	3-6	0,1-0,3	Вироби вміщують в ящики, що заповнені боризатором. Застосовують борування порошками в середовищі водню і в вакуумі
Електролізне борування				
Розплавлена бура (Na ₂ B ₄ O ₇). Розплавлена бура + 40-60% борного ангідриду	900-950 900-950	2-6 2-4	0,1-0,4 0,15-0,35	Щільність струму на катоді (деталь) 0,15-0,2 А/см ² (анод-графітовий стержень), напруга 6-24 В. При введенні в буру 50-60% В ₂ О ₃ або 30% Na ₂ SiO ₃ швидкість насичення зростає. Для підвищення рідинотекучості до бури додають 10-15% NaCl. Рекомендується для деталей простої геометричної форми
Газове борування				
Диборан (В ₂ Н ₂), розбавлений воднем (від 1:25 до 1:150). Трихлорид бору, розбавлений воднем (ВCl ₃ Н ₂ =0,05)	800-850 750-950	2-4 3-6	0,05-0,2 0,05-0,25	Дозволяє здійснювати процес при низьких температурах (500-550 °C). Недоліки: вибухонебезпечність та токсичність газів.

Рідинне борування				
Розплавлена бора + 30-40% карбіду бору (B_4C) або феробору.	950-1000	3-5	0,15-0,4	Рекомендується для деталей складної геометричної форми
Розплавлені солі 50% BCl_2 + 30-40% $NaCl$ + 10% B_4C або 20% феробориду	900-1000	1-3	0,05-0,25	

Боруванням можна обробляти будь-які сталі, але найчастіше цим способом зміцнюють низьковуглецеві сталі.

Боризований поверхневий шар має характерну "голчасту" будову. Він утворений з - боридів FeB і Fe_2B , під якими розташований перехідний шар α -розчину бору в залізі. На легованих сталях під шаром суцільних боридів утворюється зона α -розчину боридів заліза і легувальних елементів.

5.3.3.2.5 Насичення складними сполуками кремнію, алюмінію, сірки, цинку

Силіціювання - хіміко-термічне оброблення, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару кремнієм, як правило, при температурі 800-1100 °C у порошкоподібному, рідинному або газовому середовищах.

У силіційованого шару висока стійкість проти корозії у морській воді, у кислотах, при кімнатній та підвищеній температурах; підвищена зносостійкість (після попереднього проварювання при 175-200 °C) і порівняно низька твердість (HV 200-250).

Силіційований шар являє собою твердий розчин кремнію у α -залізі. Після газового силіціювання на поверхні може утворюватися шар впорядкованої сполуки Fe_3Si (α -фаза), що має високу твердість (HV 700-800). Вміст кремнію в шарі 15-20 %.

Силіційований шар крихкий і нерідко пористий. Якщо дифузійний шар повинен мати антифрикційні властивості, пористість зберігають, особливо для систем із постійним наповненням мастилами. Якщо метою силіціювання є підвищення корозійної стійкості, шар повинен бути щільним. Пористість можна ліквідувати спіканням. Для цього деталей за участю рідинної фази швидко нагрівають до 1200-1210 °С і дають коротку витримку (10-30 с). Дифундуючи в сталь, кремній витискає вуглець із поверхні вглиб. Тому під силіційованим шаром у середньовуглецевих сталях утворюється високовуглецева зона (0,8-1,0%).

Алітування - хіміко-термічне оброблення, що полягає в дифузійному насиченні поверхневого шару сталі алюмінієм, як правило, при температурі 700-1100 °С у відповідних середовищах (табл. 5.15): у порошкоподібних сумішах, у ваннах з розплавленим алюмінієм, металізацією з наступним відпаленням.

Алітуванням зміцнюють деталі ковшів для розливання, пальники в газогенераторних машинах, чохли термопар, клапани та інші деталі, що працюють при високих температурах. Алітований шар відзначається високою корозійною стійкістю в атмосфері та морській воді. Твердість алітованого шару (на поверхні) до HV 500.

Таблиця 5.15

Способи алітування сталі

Метод алітування	Насичувальне середовище	Температура, °С	Час, год	Глибина шару, мм	Примітка
У порошкоподібних сумішах	а) 49,5% порошку амонію +49,5% Al_2O_3 + 1,0% NH_4Cl ; б) 99% фероалюмінію + 1% NH_4Cl ; в) 48% фероалюмінію + 48% піску + 4% NH_4Cl	950-1050	6-12	0,25-0,6	Алітування здійснюють у залізних або ніхромових ящиках. Упаковка, як і для цементації. Суміш застосовують багаторазово з додаванням 10-15 % свіжої суміші
У ваннах з розплавленим алюмінієм	Розплавлений алюміній + 8-12% Fe (щоб запобігти розчиненню деталей)	720-750	0,25-1,0	0,1-0,3	На поверхні розплаву рекомендується утворювати шар флюсу (наприклад, 40 % NaCl, 40% KCl, 10 % Na_3AlF_6 , 10 % AlF_3) для очищення деталей, кращого знешкодження металу, що приліпився, а також зменшення роз'їдання

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

					деталей	
Металізація наступним відпаленням	з	На поверхню деталі напиляють шар алюмінію (0,7-1,2мм), на який наносять обмазку (сріблястий графіт 50 %, вогнетривка глина 20 %, кварцовий пісок 30 %, рідке скло 10 %)	900-950	2-4	0,2-0,4	Товщина обмазки 0,8-1,5 мм, обмазка просушується при 80-100°C

Сульфідкування - насичення поверхневого шару металу сіркою. Сульфідкуванням обробляють технологічне обладнання, виготовлене з швидкорізальної сталі всіх марок і сталі типу ХВГ і 9ХС для покращення антифрикційних якостей поверхонь.

Цинкування - дифузійне насичення поверхневого шару сталі цинком, як правило, при температурі 300-550 і 700-1000 °С у відповідному середовищі. Застосовують для підвищення корозійної стійкості в атмосфері, бензині, оліях і гарячих газах (300-500 °С), що містять сірководень.

У дифузійному шарі на поверхні може утворюватись η -фаза (твердий розчин заліза у цинку), далі шар інтерметалідних фаз FeZn_{13} , FeZn_7 , FeZn_{10} і твердий розчин цинку у залізі.

До основних способів цинкування належать: гаряче цинкування - протравлений і промитий виріб занурюють у розплавлений цинк (440-480 °С) і витримують у ньому 15-25 год, глибина шару 0,02-0,08 мм; цинкування у порошку цинку (75-90 % Zn) здійснюють у ящиках або печах, в яких є реторта, що обертається при температурі 350-450 °С протягом 1-10 год., глибина шару 0,03-0,08 мм; цинкування у парах цинку відбувається при 700-1000 °С в печі, через яку пропускається водень. Для отримання парів цинку у піч вводиться цинковий пил у суміші з 20-40 % глинозему, глибина шару 0,15-0,2мм і більше.

5.3.3.3 Застосування хіміко-термічної обробки у переробних і харчових виробництвах

Значна кількість деталей технологічного обладнання підприємств харчової промисловості піддається інтенсивному зношуванню. В деяких випадках його інтенсивність настільки велика, що деталі не витримують одного сезону роботи (наприклад, пальці та втулки соломовловлювачів, укладки і вали бурякомийок, бурякоелеваторів і жомомішалок, втулки і вали насосів СОТ, НЖФ -200, шестерні насосів КН-20 на цукрових заводах). При вдалому виборі дифузійних покриттів тривалість служби обладнання харчової промисловості в середньому збільшується в 5...8 разів.

Чисельні дослідження показали, що дифузійне хромування підвищує корозійну стійкість залізовуглецевих сплавів в дифузійному соці до рівня корозійностійких сталей. Рекомендується хромувати ножі із сталі У7 для різання буряків, а електролізне борування дозволяє в три рази підвищити їх довговічність.

При випробуванні у вині на низьковуглецевих сталях найбільш корозійностійкими виявились дифузійні шари на основі Cr, Cr + Si, Cr + Ti, Cr + Ti + Al. Вони підвищують опір корозії сталі 20 в 20...25 разів. Аналогічні результати одержані і на сталях з середнім вмістом вуглецю.

Хромотитанування підвищує корозійну стійкість сталі 45 у вині в 44 рази, хромосиліціювання - в 31, хромування - в 27, борування, титаноалітування, хромосиліціювання - в 5...8, хромотитаноалітування, хромоалітування, хромотитаносиліціювання і титаноалюмосиліціювання і алітування — в 1,3...1,5 рази. Силіціювання, хромоалітування і титаносиліціювання не захищають сірий чавун від корозії у виноградних винах.

Хромування підвищує корозійну стійкість сталі 10 в цукровому сиропі в 10...50 разів, хромоалітування в 6...12, алітування — в 5...10,

цинкування — в 3...7 разів. Таким чином, найбільш ефективним для вуглецевих сталей в середовищі цукрового сиропу є дифузійне хромове покриття.

Для роботи в середовищах з рН 4,5...8 рекомендуються силіцидні покриття, які дозволяють підвищити строк служби валів в сальникових ущільненнях насосів СОТ в 5...10 разів.

В останній час у промисловості почали застосовувати новий спосіб ХТО — іонне азотування (азотування в тліючому розряді), що має ряд переваг перед пічним газовим азотуванням. Зносостійкість сталі 38ХМЮА після іонного азотування в 2...3 рази вища, ніж після газового азотування. Зносостійкість азотованих сталей в 1,5..4 рази вища, ніж загартованих, цементованих, нітроцементованих і ціанованих.

Підвищена зносостійкість азотованих деталей (порівняно з незміцненими) в технологічних середовищах цукрового виробництва дозволяє рекомендувати іонне азотування для збільшення довговічності деталей насосів СОТ. З цією метою на ряді цукрових заводів було проведено випробування покращених і азотованих захисних втулок насосів СОТ-100 із сталі 45.

Встановлено, що у дифузійному соці захисні втулки мають найменшу зносостійкість. В той же час іонне азотування суттєво підвищує їхню довговічність у технологічних середовищах з нейтральною і лужною реакцією. Виробничі випробування показали, що товщина дифузійного шару 0,15 мм на захисних втулках насосів дозволяє в 2...3 рази підвищити їх довговічність в лужних і в 3...4 рази в нейтральних середовищах.

Аналіз роботи втулково-роликів ланцюгів на цукрових заводах дозволив встановити, що тривалість їх служби визначається головним чином зносостійкістю причіпних пальців. Проведені дослідження показали, що середнє спрацювання азотованих пальців із сталі

38Х2МЮА, які мають найвищу твердість, в 12 разів менше ніж незміцнених із сталі Ст3 і в 2,8 рази менше цементованих.

5.3.3.4 Кавітаційно-ерозійна стійкість деталей після хіміко-термічної обробки

Для підприємств харчової промисловості недоцільно застосовувати складні види ХТО, тому що це веде до великих матеріальних витрат, ускладнює технологію, потребує додаткового обладнання і дефіцитних матеріалів і не завжди можливе, виходячи з санітарно-гігієнічних вимог до обладнання. На деяких підприємствах харчової промисловості вже є досвід застосування дифузійного хромування для підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості деталей обладнання.

В даний час актуальним питанням є розробка методів і способів, а на їх основі і технології, що забезпечує інтенсифікацію дифузійних процесів в порошках, як найбільш простому, дешевому і технологічному виду ХТО. Крім того, враховуючи технологічну оснащеність ремонтних дільниць підприємств харчової промисловості, необхідно добиватися простоти і недефіцитності задіяного обладнання, устаткування і матеріалів.

В результаті термодифузійного хромування кавітаційна стійкість за 3 години випробувань на МСВ у 3%-вому розчині NaCl підвищилася для зразків із сталі 20 в 4,4, сталі 45 в 4,0 і СЧ18 в 6 разів. Вплив зміцнення на кавітаційно-ерозійну стійкість сталей і чавунів поданий у табл. 5.16. Одержані результати пояснюються тим, що після термодифузійного хромування на поверхні зразків утворюється твердий шар, що складається з карбідів хрому. На сталі 45 товщина карбідного шару складає 30...35 мкм, на сталі 20 карбідний шар досягає 12 мкм, на

сірому чавуні — біля 38 мкм. Мікротвердість карбідного шару на сталі 45 складає 16680 МПа, на сталі 20 — 15490 МПа і на СЧ18 — 17460 МПа.

Таблиця 5.16

Вплив термодифузійного хромування на кавітаціо-ерозійну стійкість вуглецевих сталей і чавунів (температура хромування 1673 К для сталей і 1273 К для чавуну)

№ п/п	Матеріал	Втрати маси за час дослідження, мг			Примітка
		1 год	2 год	3 год	
1.	Сталь 20	5,1	33,7	56,0	нормалізація
2.	Сталь 45	5,6	17,4	36,4	нормалізація
3.	СЧ 18	6,9	17,3	39,6	лиття в землю
4.	Сталь 20	2,3	7,4	12,6	після хромування
5.	Сталь 45	1,9	5,3	9,0	після хромування
6.	СЧ 18	1,7	4,0	6,6	після хромування

Одержані експериментальні дані і їх статистична обробка дозволили встановити, що із збільшенням товщини карбідного шару довговічність хромованого покриття при кавітаційно-ерозійному зношуванні в корозійно-активних середовищах лінійно зростає. При цьому значну роль відіграють захисні властивості покриття (відсутність несучільності, мікропор тощо).

В поверхневих шарах сплавів після термодифузійного хромування внаслідок структурних і фазових перетворень виникають залишкові стискаючі напруження. З їх наявністю пов'язане підвищення зносостійкості, межі втомлюваності і опір корозії.

Відомо, що азотування підвищує поверхневу твердість, межу втомлюваності, а також корозійну і кавітаційну стійкість сталей у прісній воді та в соляних розчинах. Тому перспективним для підвищення довговічності і зносостійкості деталей технологічного обладнання і інструменту може бути іонне азотування. Так, в розчинах солі умовна межа корозійної втомлюваності після газового азотування збільшується в 4,5 рази, а після іонного — в 6,5 разів, що пояснюється збільшенням у деталях стискаючих залишкових напружень до 500...1000 МПа.

Порівняння кінетики зношування азотованих і нормалізованих зразків свідчить (рис. 5.24) про значне підвищення (для сталі 45 в 5,3; для сталі 20 в 4,7, а для чавуну СЧ20 в 8,9 разів) зносостійкості при випробуванні на МСВ в 3%-вому розчині кухонної солі, що пояснюється одночасним підвищенням їх корозійної стійкості і характеристик міцності.

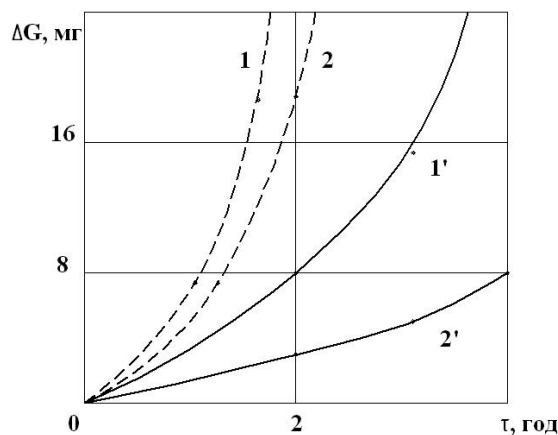


Рис. 5.24 Кінетика зношування сталей 20 (1,1') і 45 (2,2') в 3%-ному розчині кухонної солі на установці з МСВ: 1,2 – без покриття; 1', 2' – після іонного азотування

Результати виробничих випробувань робочих коліс і кришок насосів, які піддавалися іонному азотуванню на ряді молочних заводів, показали, що тривалість їх служби при перекачуванні роп солі збільшується більш ніж в 6 разів. Таким чином, проведені дослідження показали доцільність використання ХТО (зокрема іонного азотування і термодифузійного хромування) для підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості сталевих і чавунних деталей обладнання.

5.3.4 Використання електромагнітного поля при обробці

5.3.4.1 Електрохімічне зміцнення

Електрохімічне зміцнення - метод отримання покриттів з металевою або полімерною матрицею, армованою дисперсними частками. Порошкові покриття наносяться на робочі поверхні сталевих деталей складної конфігурації, таких, як деталі прес-форм, штампів, вимірювального інструменту, різного технологічного обладнання. Нанесення покриття безвольфрамового твердого сплаву на основі

карбиду хрому з нікель-фосфорною зв'язкою складається з двох основних операцій: електрофоретичного осадження суміші порошкоподібних компонентів покриття і припікання електрофоретичного осаду до сталевий підкладки при 1160-1180 °С в захисному неокисленому середовищі або у вакуумі.

Електрохімічне полірування - анодне розчинення металу в електроліті. Це один із найефективніших способів підвищення стійкості інструментів. Він забезпечує зменшення шорсткості поверхні, зниження коефіцієнта тертя інструмента по деталі, що обробляється, і стружці, виключення припалювання поверхні.

Як електроліт використовують водні розчини солей, кислот і лугів.

Якість оброблюваної поверхні залежить від складу електроліту, його температури і анодної щільності струму. В табл. 5.17 наведені режими електрохімічного полірування конструкційних матеріалів.

Таблиця 5.17

Режими електрохімічного полірування конструкційних матеріалів

Оброблювані матеріали	Склад електроліту	Вміст компонента, %	Температура, °С	Анодна щільність струму, А/дм ²
Сталі вуглецеві й низьковуглецеві	Кислота: сірчана фосфорна Карбоксиметил целюлоза	40 50 0,2-0,2	26-30	100-200
Сталі хромонікелеві і високохромові	Кислота: сірчана фосфорна	20 60	40-300	60-80
Сплав мідний	Фосфорна кислота Сульфонал	50-70 0,1-0,2	30-50	20-30
30-Сплав нікелевий	Сірчана кислота	60-70 0,2-0,3	70-150	30-50

	Сульфонал			
Тантал	Кислота: сірчана плавикова Сульфонал	40-60 8-15 0,2-0,3	50-100	80-90

5.3.4.2 Електроіскрове та іонно-плазмове оброблення

Процес **електроіскрового легування** (ЕІЛ) для підвищення довговічності деталей є однією з універсальних зміцнювальних технологій. ЕІЛ металевих поверхонь ґрунтується на явищі електричної ерозії та полярного переносу матеріалу анода у вигляді вібруючого електрода на катод (деталь) при протіканні електричних розрядів тривалістю $10^{-3} \dots 10^{-6}$ с в повітрі або іншому газоподібному чи рідкому середовищі.

До основних специфічних особливостей ЕІЛ можна віднести: високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою; локальність проведення процесу (обробку можна здійснити в певних місцях, без захисту інших поверхонь деталі); можливість легування чистих металів, сплавів, металокерамічних композицій, важкоплавких з'єднань тощо; незначне нагрівання деталі; відносну простоту технологічного процесу; малі габарити технологічного обладнання.

Для реалізації процесу ЕІЛ у більшості випадків доцільно використовувати тверді сплави типу ТК і ВК (особливо при зміцненні інструментів), а також ферохром, хром, білий чавун, графіт тощо. Задовільні результати можуть бути при використанні комбінацій цих матеріалів (наприклад, легування графітом і ферохромом). Якщо для легування використати електрографіт, то зміцнення відбувається за рахунок науглецьовування і, одночасного, загартування поверхневих шарів металу.

В технології ЕІЛ застосовуються установки для зміцнення пилок, ножів, фрез і свердел, вальців прокатних станів, зубів та шліців,

зубчастих коліс, прес-форм для формування силікатної цегли, посеребріння контактів високовольтної апаратури тощо.

Дослідження кавітаційного зношування покриттів на основі карбіду титану на вуглецевих сталях на установці з магнітострикційним вібратором (МСВ) з використанням ультразвукового генератора УЗДН-1 показали, що їх доцільно застосовувати тільки для підвищення стійкості маловуглецевих сталей (до 0,3 % вуглецю).

Електроіскрові покриття надзвичайно ефективні там, де використовується в значній кількості різальний інструмент (кондитерські фабрики, м'ясокомбінати, молочні заводи, тютюнові фабрики, підприємства для виробництва харчконцентратів та ін. Цей метод можна застосовувати на машинобудівних і ремонтних заводах і безпосередньо на харчових підприємствах.

Набули поширення установки типу “Булат” і “Пуск” різних модифікацій для нанесення покриттів, які формуються за рахунок **конденсації плазми коронного розряду**, що збуджується між катодом (матеріалом покриття) і анодом (корпус вакуумної камери) у вакуумі. Основним катодним матеріалом у цих умовах є титан. На поверхні деталей утворюється нітрид титану, який дозволяє в ряді випадків підвищити зносостійкість деталей в 1,5...3 рази.

Основний напрямок використання цього методу — зміцнення деталей та інструментів з високолегованих і швидкоріжучих інструментальних сталей. Використання методу для зміцнення виробів з вуглецевих сталей може не дати бажаного ефекту, тому що процес нанесення покриття проходить при температурі 350...500⁰С, що призводить до відпуску сталей та зменшення їх твердості.

Захисна дія плівок, товщиною до 10 мкм, конденсованих на поверхні ріжучого інструменту, твердих речовин полягає не лише в механічному протистоянні зношуванню, але і в забезпечені

перерозподілу температур в різальному лезі інструменту під час роботи, що збільшує його теплостійкість. Випробування зразків ножів загортувальних автоматів типу ІЗМ на зношування за схемою “ніж (сталь Р6М5) – контртіло (сталь Х6ВФ)” при швидкості ковзання 1,2 м/с і навантаженні 0,43 кН показали, що інтенсивність зношування зразків з покриттями із нітриду титану в 2,5 рази менша, ніж непокритих. Випробування зміцнених рухомих ножів із сталі Р6М5 в парі з ножами з сталі ХВГ для загортувальних автоматів ІЗМ-2 на Харківській кондитерській фабриці показали, що зносостійкість їх збільшилась в 1,5 рази.

Відмітимо, що технологія іонно-плазмового напилення має ряд недоліків (досить високі температури процесу; невеликі габарити технологічних камер і деталей; вимоги простої конфігурації напилюваних деталей; значна тривалість процесу та складність технології), які обмежують її поширення для підвищення довговічності деталей в умовах підприємств харчової промисловості.

Іонне осадження, іонне легування та впровадження (імплантація) — це також один із перспективних способів підвищення зносостійкості деталей. Найбільш розроблений з методів іонної імплантації — метод іонного азотування. Азотування іонізованим азотом з успіхом використовують для зміцнення деталей різних габаритів із легованих і вуглецевих сталей.

Перед обробкою вироби термічно обробляють (покращують) для надання сталі необхідних властивостей. Глибина та поверхнева твердість азотованого шару залежить від температури азотування, тривалості процесу, марки сталі.

Процес **іонного азотування** здійснюється так. В герметичному контейнері утворюється розріджена атмосфера, яка включає азот. Для цього використовується чистий азот, аміак, або суміш азоту з воднем.

Всередині контейнера розміщують деталі, які підключають до негативного полюса джерела постійного струму. Вони є катодом, а анод - стінки контейнера. Між катодом та анодом утворюється висока напруга (500...1000В). В цих умовах газ іонізується. Позитивно заряджені частки переміщуються до негативного полюса (катада) під дією електростатичного поля. Поблизу катада виникає висока напруженість електричного поля, яке розганяє іони азоту до великих швидкостей і вони, співударяючись із зміцнювальною деталлю, впроваджуються в її поверхню. Висока кінетична енергія іонів перетворюється в теплову, деталь розігрівається до температури 470...580⁰С, при якій проходить дифузія азоту в металеву підкладку.

До недоліків методу відносяться: значна тривалість процесу і невелика продуктивність (процес може відбуватись протягом двох діб); конструкція робочих камер потребує виготовлення додаткового оснащення для розміщення деталей; обладнання для ведення процесу дороге і має великі габарити.

Азотовані деталі мають висока зносостійкість, завдяки великій твердості поверхні. О.Рудик, зміцнюючи іонним азотуванням бурякорізальні ножі, збільшив їх зносостійкість в 1,4 рази. Азотовані захисні втулки насосів бурякоцукрового виробництва СОР-100 із сталі 45Х на перекачуванні вапняного молока, сульфітованого соку і соків І та ІІ сатурації мали зносостійкість в 6 разів вищу від серійних. Зносостійкість причіпних пальців бурякоелеватора була збільшена завдяки застосуванню азотування у середньому в 5...7 разів.

5.3.4.3 Гальванічні методи оброблення

5.3.4.3.1 Зміцнення способами електролітичного осадження і розчинення

Розглянемо зміцнення способами електролітичного осадження і розчинення на прикладах нікелювання та хромування.

Нікелювання. Використовується для підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин та механізмів, збільшення довговічності, стійкості до кислот і лугів, захисту поверхонь від корозії, пошкоджень і заїдань.

Послідовність типового технологічного процесу нікелювання така: механічне оброблення (шліфування або полірування) для зняття дефектного шару і надання поверхні відповідної геометричної форми, знежирювання, декапірування, електрохімічне нікелювання, промивання і контроль. Найякісніше покриття дає осадження трьох шарів нікелю із різних за складом електролітів. Нікелеве покриття наносять у ваннах, футерованих вініпластом, у типових розчинах (табл. 5.18).

Таблиця 5.18

Електроліти для нікелювання

Склад	Вміст компонента, кг/м ³	Параметри оброблення		
		Температура, °C	Кислотність, pH	Щільність струму, А/м ³
Сульфат нікелю	180	60	5,6	500
Хлорид нікелю	30			
Борна кислота	30			

Хлорид амонію	25			

Хромування. Застосовується для підвищення стійкості та відновлення деталей машин, механізмів , різального, контрольного і вимірювального інструмента, а також формоутворювальних елементів штампів, прес-форм, діркопробивних пуансонів і матриць.

Послідовність типового технологічного процесу хромування: механічне оброблення (шліфування або полірування) для зняття дефектного шару і надання поверхні відповідних геометричних параметрів; знежирювання поверхні для зняття слідів органічних речовин; декапірування; хромування; виловлювання хрому із електроліту; оброблення у розчині метабісульфіту натрію; промивання і висушування покриття.

Хромування відбувається у стандартних сталевих ваннах, футерованих листовим вініпластом. Для завантаження виробів у ванну застосовують спеціальні контактні пристрої. Вироби, що оброблюються, служать катодом. Як джерела струму застосовують низьковольтні генератори постійного струму.

Товщина хромованого покриття для гладких вимірювальних інструментів становить 30-100 мкм, для різбових калібрів і металорізальних інструментів 2-20 мкм, для прес-форм, матриць і пуансонів - 40-100 мкм. Мікротвердість хрому, що осаджується, знаходиться в межах 900-1000 МПа. Стійкість різального інструменту після хромування збільшується в 2-3 рази, контрольного-вимірювального - в 5-10 разів.

Найефективнішим є хромування металорізального інструменту, який застосовується для оброблення кольорових металів та їх сплавів.

5.3.4.3.2 Гальванічні та комбіновані електрохімічні покриття

Електролітичні металопокриття отримують осадженням на поверхні деталі металу з утворенням шару незначної товщини при пропусканні через електроліт струму між анодом (з металу, який утворює покриття) і катодом (оброблюваною деталлю). Технологія нанесення цих покриттів відзначається простотою, низькою собівартістю, можливістю автоматизації та регулювання технологічного процесу, незначним впливом покриттів на властивості основного матеріалу деталей.

Найбільш часто в практиці використовують електролітичне хромування. Номенклатура хромованих деталей тільки в харчовому машинобудуванні нараховує кілька сот найменувань.

Хром відзначається високою твердістю, міцністю зчеплення зі сталлю та хімічною стійкістю. Властивості хромового покриття залежать від режиму осадження. За даними Г.Левитського, змінюючи тільки густину струму та температуру розчину електроліту, можна регулювати його твердість в межах HRCe 450...1000 і, тим самим, забезпечувати належну зносостійкість. Можна одержувати гладенькі, пористі, плямисті та інші хромові покриття з заданими експлуатаційними властивостями.

Процес осадження заліза з водяних розчинів закисних солей заліза називається електролітичним залізнінням (осталенням). При цьому використовують сірчаноокислі, хлористі та змішані електроліти. Залізо осаджують на катоді, а анодом служать маловуглецеві сталі. Часто для осадження заліза використовують гарячі хлористі електроліти, які забезпечують високу якість покриття та велику продуктивність процесу. Найбільш широке використання залізніння знайшло для відновлення внутрішніх і зовнішніх поверхонь деталей. Наприклад, на рис. 5.25 показана схема процесу відновлення зношеної шайки вала. Склад електроліту може бути таким, г/л: хлористе залізо — 200; йодистий калій — 20...30; сірчана кислота — 1, соляна кислота — до рН 1,5.

Температура електроліту — 18...30⁰С. Площу анода зазвичай потрібно брати більшу за площу відновлюваної деталі. При осталенні отримують покриття завтовшки до 4...5 мм.

Осталення зношених валів обладнання можна проводити практично на будь-якому харчовому підприємстві з використанням способу гальванічного натирання (рис. 5.26). Основними його перевагами, у порівнянні з ванним способом, є висока продуктивність процесу при великій густині струму та простота обладнання. Цей спосіб можна застосовувати для отримання покриттів товщиною до 0,2 мм.

В НУХТ розроблені нові електролітичні покриття для зміцнення та відновлення деталей харчового обладнання.

Електролітичне покриття типу “вольфрам-нікель-азот” (склад, мас. %: вольфрам — 10,0...30,0; азот — 2,0...5,0; нікель — залишок) відзначається підвищеною твердістю та зносостійкістю. Воно наноситься з електроліту, до складу якого входять, г/л: вольфрамовоокислий натрій — 50..100; сірчаноокислий нікель — 15...20; щавлева кислота — 30...50; карбамід — 1...5 і моноетаноламін — 30..50. Осадження покриття ведуть при густині струму 2...3 А/дм², температурі електроліту 35...45 ⁰С. Тривалість нанесення 40 хв. Аноди нікелеві марок НПА1 та НПА2. Товщина покриття складає близько 10 мкм. Після термообробки протягом однієї години при температурі близько 400 ⁰С мікротвердість покриття досягає 11 ГПа. Утворене за такою технологією покриття (за даними рентгеноструктурного аналізу) - це твердий розчин вольфраму і азоту в нікелі.

Висока твердість, теплостійкість (до 800 ⁰С) вольфрам-нікель-азотистих покриттів і добрі триботехнічні характеристики дозволили рекомендувати їх для зміцнення опорних елементів хлібопекарських печей типу, які працюють при температурі близько 300 ⁰С.

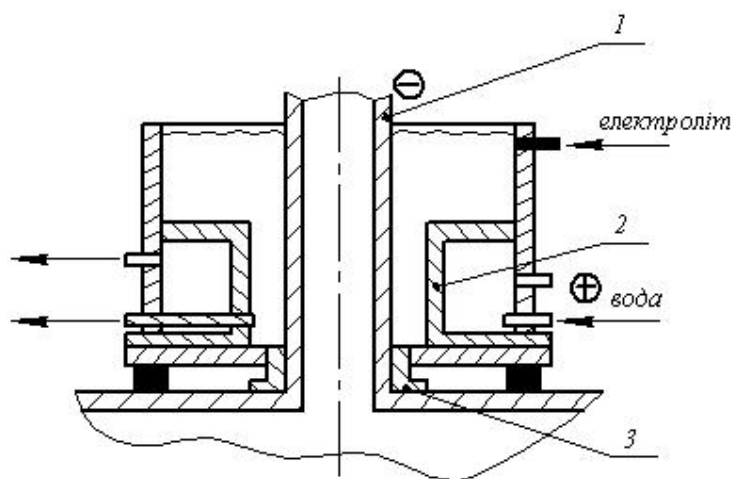


Рис. 5.25 Схема осталення зношеної шийки вала: 1 – вал; 2 – анод; 3 – вініплатові прокладки

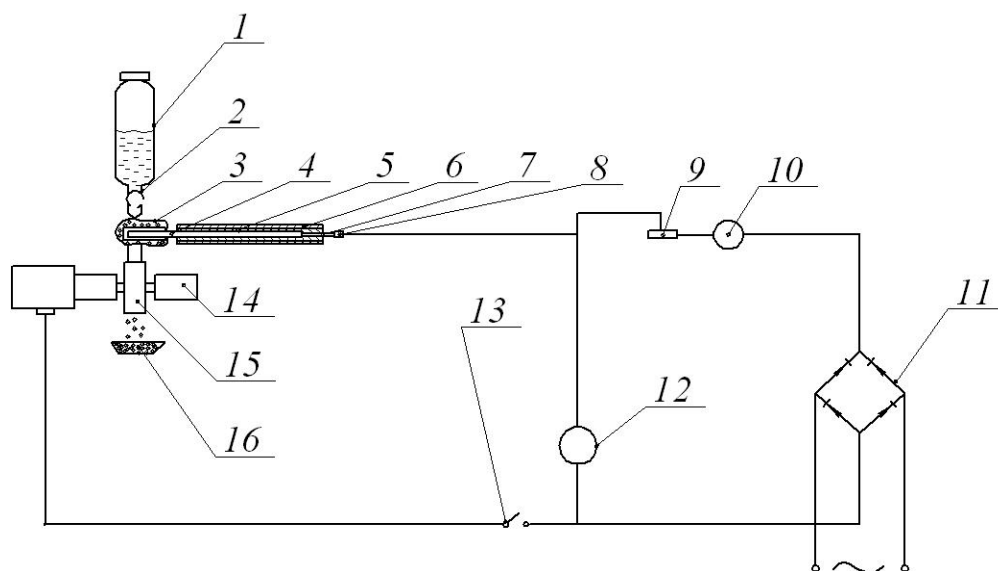


Рис. 5.26 Схема відновлення зовнішньої поверхні циліндричної деталі способом гальванічного натирання: 1 – резервуар з електролітом; 2 – трубопровід; 3 – тампон; 4 – анод; 5 – корпус анода; 6 – ізоляція; 7 – гніздо клеми; 8 – клемма; 9 – реостат; 10 – амперметр; 11 – випрямляч; 12 – вольтметр; 13 – вимикач; 14 – обертач; 15 – деталь; 16 – ванна

Використання способу азотування сталевих деталей в електролітах з наступною термообробкою дозволило в 1,5...2 рази підвищити зносостійкість ножів пакувальних машин для загорткування харчоконцентратів, цигарок і дріжджів. Реалізація електролітичних способів насичення поверхні азотом, у порівнянні з відомими (наприклад, іонне азотування), відзначається простотою обладнання і меншими енерговитратами.

Аналіз роботи ірисозагортувальних автоматів типу ІЗМ на ряді кондитерських фабрик показав, що їх довговічність і надійність в значній мірі обумовлена зносостійкістю пар тертя, які працюють без подачі мастила або з періодичним змащуванням. До їх числа відноситься ряд деталей шарнірів вузла закрутки, головного вала та вала револьверної голівки, механізму штовхача та ін. Шарнірні з'єднання і паперорізальні пристрої, відносяться до найменш надійних вузлів ірисозагортувальних автоматів.

При дослідженні зношування пальців механізму закручуючих голівок ротора автомата ІЗМ, виготовлених з сталі 18ХГТ та загартованих до твердості HRC_e 55 виявилось, що після двох-трьох місяців роботи їх знос на сторону становить близько 70-100 мкм, що помітно впливає на кінематичну точність і надійність вузла закрутки. На поверхні тертя пальців (рис. 18.3) при дослідженні було виявлене окислювальне зношування. Значному зносу піддалися також отвори в закручуючих губках автомата (до 1 мм за 2-3 місяці роботи). Закручуючі губки виготовлені з сталі 45 твердістю HRC_e 52 -55. Великі величини зносу були також зафіксовані на пальцях важеля штовхача і пальцях підймання штовхача (0,17 та 0,12 мм). Ці пальці періодично змащуються консистентним мастилом.

Часто пальці виготовляються в ремонтних майстернях кондитерських фабрик і встановлюються в шарніри без відповідної термообробки. В цьому випадку, навіть якщо вони виготовлені з якісних за характеристиками сталей, термін їх служби не перевищує 1-2 місяці . Це обумовлено не лише низькою твердістю пальців, а й тим, що деталі шарнірних з'єднань працюють в умовах граничного тертя і тертя без змащування, тому що в шарнірах створення режимів рідинного тертя неможливе через малу швидкість руху і його переривчастість.

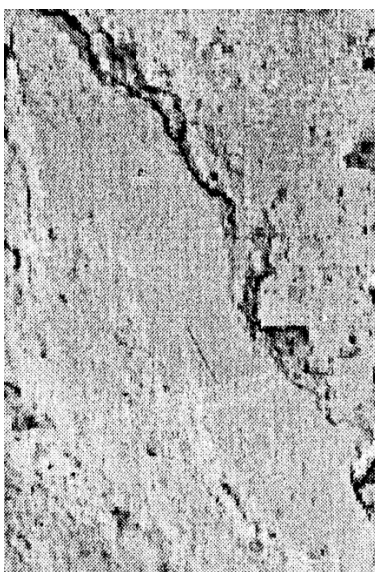
Дослідження на електронному мікроскопі УЕМВ-100 В показали, що

оксидні плівки під дією пластичної деформації відділяються шарами з поверхні тертя (рис. 5.27, а, б), але спочатку на поверхні тертя виникає сітка тріщин (рис. 5.27, в) які, змикаючись, створюють частинку оксидної плівки, яка видаляється з поверхні. На утворення цієї сітки тріщин особливий вплив мають знакозмінні навантаження, що сприяє інтенсифікації втомаювальних процесів на поверхнях тертя. Процес утворення та руйнування оксидних плівок проходить одночасно.

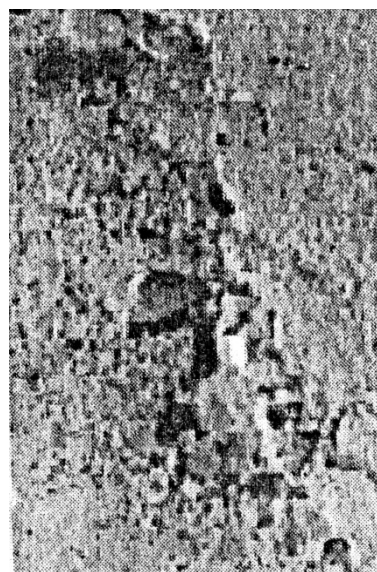
На мікроелектронограмі оксидної плівки (рис. 5.27, г), механічно видаленої з зношеної поверхні, видно, що вона має точковий характер, який свідчать, що оксидні плівки - кристалічні тіла. Ідентифікація мікроелектронограми показала, що оксидна плівка на шарнірних пальцях ірисозагортувальних автоматів складається в основному з δ модифікації гідрооксидів заліза типу $\text{FeO}(\text{OH})(\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$, який має гексагональну кристалічну ґратку. Чітко видимі точки на мікродифракційній картині свідчать про монокристалічну структуру, яка орієнтована найбільш упакованими площинами в площині тертя. В плівці виявлено також незначну кількість магнетиту (Fe_3O_4) і шніпелі ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).



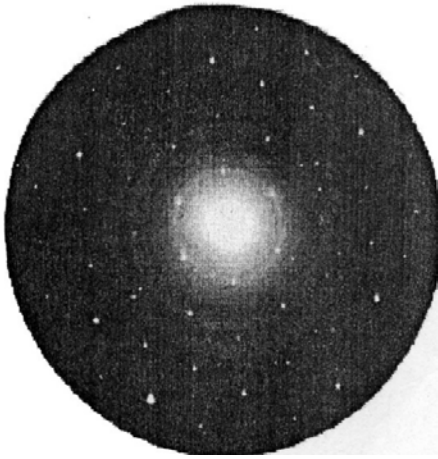
а



б



в



г

Рис. 5.27 Зношені поверхні пальців ірисозагортувальних автоматів ІЗМ з сталей 18ХГТ ($a^x 200$) і 45 ($b, в^x 20000$), загартованих до HRCe 55, та мікро електронограма оксидної плівки, видаленої з поверхні тертя (г)

Проведені дослідження показали, що для зміцнення пальців потрібний такий матеріал, який би мав високу зносостійкість при роботі в умовах тертя без змащування. Таким матеріалом може бути, наприклад, політетрафторетилен (фторопласт-4Д), нанесений електрофоретичним способом.

Технологія електрофорезу може бути ефективною для одержання перспективних в харчовій промисловості покриттів на основі фторетиленових полімерів, які мають високу хімічну інертність, зносостійкість і малий коефіцієнт тертя. Технологія їх нанесення полягає в електроосадженні поліелектролітів, які містять плівкоутворювач (емаль В-ФЛ-149 “Е”) і наповнювач (суспензія фторопласта Ф-4ДВ). Композиція є водною дисперсією негативно заряджених колоїдних часток. При накладенні електричного поля постійного струму в середовищі заряджені частки направлено переміщуються і осаджуються на аноді. Утворення покриття відбувається в результаті електрофоретичного осадження колоїдних часток фторопласту та хімічного утворення нерозчинних у воді форм органічного плівкоутворювача на аноді. Такий метод дозволяє отримати адгезійноміцні покриття на металевих поверхнях.

Електрофоретичне покриття (ЕФП) може бути нанесене на корозійностійкі і конструкційні сталі та титанові сплави. ЕФП стійке в

умовах фретинг-корозії і тертя ковзання та є інертним по відношенню майже до всіх технологічних середовищ харчових виробництв.

Фторопластові електрофоретичні покриття були використані для підвищення зносостійкості шарнірів ірисозагортувальних та цукеркозагортувальних машин. Шарніри загортувальних автоматів працюють при незначних питомих навантаженнях і невеликих швидкостях (до 0,15 м/с) зворотньо-обертового руху деталей в умовах сухого або напіврідинного чи граничного тертя. Нанесення на пальці шарнірів фторопласту – 4ДВ електрофоретичним способом збільшило зносостійкість пари тертя більш ніж в 3 рази (рис. 5.28).

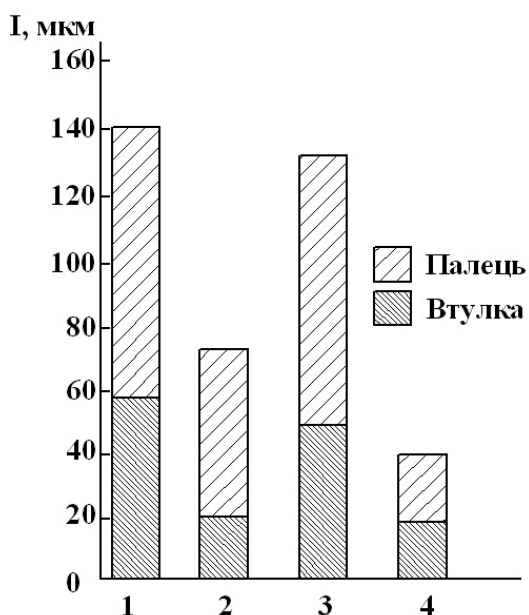


Рис. 5.28 Знос втулок із сталі 45 (HRC_e 52-55) закручуючих губок і пальців з різних матеріалів, термооброблених до твердості HRC_e 52-55, у вузлі закрутки (ірисозагортувальних машини ІЗМ після 50 робочих змін експлуатації: 1- сталь У8; 2 – 18ХГТ (цементована на глибину 0,8-1,0 мм); 3-сталь 20 (цементована на глибину 0,8-1,0мм); 4-сталь 45 з ЕФП товщиною 40 мкм

Відзначимо, що електрофоретичні фторопластові покриття в харчовій промисловості найбільш доцільно використовувати у вузлах тертя, які працюють в умовах корозійно-механічного зношування та фретинг-корозії за відсутності в технологічному середовищі абразивних частинок. Іноді такі покриття можуть виконувати протиадгезійну функцію і попереджувати наливання харчових продуктів на деталі технологічного обладнання.

5.4 Експлуатаційні властивості захисних покриттів обладнання переробних і харчових виробництв

5.4.1 Полімерні і металополімерні покриття

Серед різноманітних покриттів, які можна застосувати для підвищення довговічності обладнання, широко розповсюджені покриття різними полімерами.

До полімерних покриттів, які контактують з харчовими технологічними середовищами, ставляться відповідні вимоги. Вони повинні мати добру адгезію до поверхні деталі і антиадгезійні властивості по відношенню до продуктів, незначну пористість, бути еластичними, механічно-міцними, теплостійкими, інертними до технологічних і допоміжних середовищ харчових виробництв, технологічними і економічними. Жоден із відомих полімерів не може повністю відповідати всім цим вимогам. Матеріали з достатньою хімічною стійкістю, як правило, мають недостатню адгезію до металу. Полімерні покриття з задовільною адгезією до поверхні легко руйнуються внаслідок хімічної та механічної дії агресивних середовищ. Крім того, для харчової промисловості особливе значення мають їх хіміко-токсикологічні і медико-біологічні характеристики.

В різних галузях харчової промисловості для захисту внутрішніх поверхонь апаратів, трубопроводів, арматури набули поширення покриття: сополімервінілхлоридні, фторопластові, поліолефінові, поліуретанові, фенолформальдегідні, кремнійорганічні, каучукові, епоксидні тощо. Для покращення властивостей покриттів їх часто використовують з наповнювачами. Наприклад, покриття на основі пентапласту А, наповнені залізним суриком і оксидом хрому в кількості 0,5-1,5 % по масі, були застосовані в консервному виробництві для захисту пружин наповнювачів томатної пасты і зеленого горошку, в

цукро-рафінадному — для деталей автоматичних ліній типу “Шамбон” пресування швидкорозчинного цукру-рафінаду. Вони наносились на поверхні металевих деталей напиленням порошку або суспензії. Ці покриття показали в 2-5 разів більшу довговічність ніж, наприклад, хромонікелеві.

Для покриття деталей полімерами використовують тільки термопласти у вигляді високодисперсного порошку, який при нагріванні переходить у в'язкотекучий стан. Процес напилення не відрізняється від процесу металізації напиленням, але при цьому необхідно підігріти деталі до відповідної температури. Так, при напиленні поліетилену високого тиску ця температура повинна бути 180-200 °С, поліпропілену — 220-240 °С, а фторопласту — 260-270 °С.

Полімерні захисні покриття можуть наноситись також у вигляді рідких лакових композицій з подальшим гарячим сушінням або полімеризацією за допомогою затверджувачів. Наприклад фторлоно-епоксидні лаки виробництва Охтирського ВО “Пластполімер” (Росія) холодного сушіння марок ЛФЕ-32х-1, ЛФЕ-32х-2, ЛФЕ-42х-1, ЛФЕ-42х-2, ЛФЕ-26х, ЛФЕ-23х та гарячого сушіння марок ЛФЕ-32Г, ЛФЕ-42Г, ЛФЕ-23Г – це розчин фторлону і епоксидної смоли в суміші органічних розчинників. Вони використовуються в харчовій і переробних галузях промисловості для отримання захисних антикорозійних, електроізоляційних, антифрикційних, антиадгезійних покриттів на металах, склопластиках, пластмасах, дереві та інших матеріалах. Покриття і плівки, отримані на основі ЛФЕ, поєднують у собі цінні технічні властивості вихідних полімерів: високі хімічну і атмосферостійкість, термостійкість, еластичність, адгезію.

ЛФЕ наносять щіткою, зануренням, повітряним та іншими видами розпилення на попередньо очищені піско-, дрібоструменевою, або хімічною обробкою від бруду і пилу та знежирені поверхні. Для

забезпечення міцності покриття рекомендується використання ґрунтів: шпатлювки, фосфатуючої ґрунтовки. Товщина багат шарового покриття ЛФЕ складає 30-150 мкм, а одношарового 10-30 мкм.

Частіше за інші полімери для зносостійких покриттів в харчовій промисловості використовують поліуретани, пентопласти, політетрафторетилени, поліаміди, епоксидні композиції. Добре протидіють абразивному зношуванню поліуретанові труби. Англійською фірмою “Саймон-Уормен” виробляються сталеві труби діаметром 76...400 мм з поліуретановим покриттям. Покриття на основі поліуретану стійкі по відношенню до молока, харчових кислот, роп, мастил і розчинників, які використовуються в молочній, консервній і рибній промисловості.

Одним з раціональних способів підвищення зносостійкості полімерів є фізичне модифікування полімерних композицій неорганічними і мінеральними наповнювачами, наприклад, дисульфідом молібдену, тальком, аморфним бором, оксидом цинку, карбідом кремнію тощо.

Г.Тищенко на Миколаївському пивзаводі “Янтар” заміною чавунних ущільнюючих кілець на золотниках парового розподілу насоса ПДВ-20/25 на кільця з фторопласту-4Д домогся виключення заклинювання кілець і значного збільшення строку служби обладнання.

О.Новицький запропонував виготовляти вихідні решітки подрібнювача сирної маси типу МПТ-120(160, 200) у виробництві плавлених сирів з фторопласту-4Д замість сталі У7, що дало змогу підвищити довговічність подрібнювача в 10 разів.

В останні роки все більше для нанесення пластмас, крім газополуменевого, застосовують вихровий метод, його сутність полягає в тому, що підігріта до визначеної температури деталь розміщується в підвищеному стані у ванні з псевдозрідженим порошком пластмаси. За

деякий час порошок осідає на деталі, розплавляється на його поверхні і щільно її обволокує. До переваг цього методу відносяться: висока продуктивність праці; можливість використовувати у масовому виробництві для деталей складної форми; простота обладнання; рівномірність захисного шару; добра адгезія покриття і деталі; можливість отримання композиційних покриттів за рахунок одночасного нанесення порошків з різними властивостями.

Для вузлів тертя раціонально використовувати політетрафторетиленові (ПТФЕ) полімери, які в багатьох випадках забезпечують низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість. Однак, вони мають низький опір стискуванню, текучість у холодному стані, малу теплопровідність і нетехнологічні при нанесенні захисних плівок. Покращити властивості фторопласту можна введенням до його складу наповнювачів. Наприклад, зносостійкість за рахунок їх введення можна підвищити в 1000, опір повзучості — в 10, а теплопровідність — в 5 разів. Наповнювачами для ПТФЕ є скловолокно, металеві, вугільні і графітові порошки, дисульфід молібдену, оксиди свинцю, кадмію та ін.

Одними з найбільш перспективних матеріалів для пар тертя є композиційні. Більшість з них складається з матриці та різних наповнювачів, які забезпечують матеріалу необхідні властивості. Вибором цих складових забезпечується можливість отримання та регулювання властивостей композиційних матеріалів.

Найбільш поширені, антифрикційні металофторопластові підшипникові матеріали, які за технологією виготовлення можна поділити на два класи: тонколистові матеріали на основі сталевих стрічки з напиленим чи напеченим шаром бронзового порошку, пори якого заповнені чистим фторопластом, або фторопластом з наповнювачем; матеріали на основі заповненої фторопластом пористої бронзи, яка

нанесена на поверхню робочої деталі (підшипника, внутрішньої поверхні гайки тощо).

Пошуки неметалевих антифрикційних матеріалів почались порівняно давно. В техніці досить поширений полімер - політетрафторетилен, який ще називають "фторопласт-4". Цей матеріал хімічно стійкий, витримує температури до 400 °C і добре протистоїть тертю: без усякого мащення його коефіцієнт тертя може бути істотно вище, ніж у звичайних пар тертя зі змащуванням. Однак, фторопластові підшипники ненадійні - вони мають недостатню об'ємну твердість і міцність та швидко зношуються. Цих недоліків позбавлені підшипники з металофторопласта, у якого не лише збережені високі антифрикційні властивості звичайного фторопласта, але і забезпечена достатня міцність і зносостійкість. Металофторопласт можна виготовити зі сталевий стрічки (основи), завтовшки 1...2,5 мм, і дуже тонкого шару пористої бронзи, заповненої фторопластом, змішаним ще з одним антифрикційним матеріалом, наприклад, з дисульфідом молібдену. Ця суміш тонкою плівкою покриває поверхню матеріалу. Комбінація сталі, бронзи і двох антифрикційних матеріалів забезпечує високу працездатність металофторопластових підшипників, які при достатній міцності і зносостійкості працюють без мащення в широких температурних діапазонах, витримують агресивні середовища, дешеві і можуть бути виготовлені простим штампуванням з мінімальними витратами матеріалів. Складна структура металофторопласта надає йому можливість виявляти високі адаптивні властивості до змінних режимів роботи. У процесі припрацювання частина поверхневого антифрикційного шару починає зношуватись і переходить на деталь, що сполучається в парі тертя, внаслідок чого утворюється пара "фторопласт - фторопласт" з мінімальним тертям. При подальшому зношуванні (з підвищенням температури) частина антифрикційного матеріалу виходить

з пор бронзи, надлишкове тепло передається металевими компонентами, і функціонування підшипників може бути продовжене. В процесі роботи підшипника відбувається саморегулювання антифрикційної складової: при зниженні температури її надлишок повертається в пори. Економічний ефект від застосування металофторопласта складається з чотирьох основних компонентів: найкращі антифрикційні властивості (загальне підвищення надійності підшипника), економія високодефіцитних металевих матеріалів, відмова від мащення (економія нафтопродуктів) і економія зовнішньої енергії завдяки зменшенню маси і габаритів конструкції (наприклад, маса металофторопластових підшипників у 8...10 разів менша за масу аналогічних кулькових підшипників кочення).

Композиційні матеріали, отримувані методом порошкової металургії, можуть успішно використовуватись при роботі без мащення, або з мащенням водою та технологічними рідинами харчових виробництв, в широкому інтервалі температур, навантажень та швидкостей. Наприклад, добре зарекомендували себе в підшипниках з водяним мащенням бронзофторопластові композиції.

Вітчизняні наповнені фторопласти такі: ФКН-7 (з графітом і дисульфідом молібдену), ФКН-14 (з графітом, дисульфідом молібдену і скловолокном), АФГМ (з графітом і дисульфідом молібдену), 7В-2А (з графітом), АФГ-80ВС (з графітом) та ін. Із зарубіжних матеріалів найбільш відомі матеріали фірми "Гласир" (на основі фторопласту з графітом, олов'яної бронзи і свинцю).

Для важких умов роботи перспективними є матеріали, в яких робочий шар з композиційного антифрикційного матеріалу нанесений на міцну сталеву основу. Технологія виготовлення такого матеріалу складається з операцій спікання на омідненій сталевій основі тонкого пористого шару з сферичних частинок олов'янистої бронзи з подальшим

насиченням фторопластом з наповнювачами. Причому пористість бронзового каркасу можна регулювати пресуванням. Сталева основа надає матеріалу високої міцності, бронзовий каркас забезпечує відведення тепла при терті і служить для отримання твердого мастила на основі фторопласту. За деякими даними матеріали такого типу, розроблені в ІПМ НАН України, можуть працювати при навантаженнях до 350 МПа, швидкостях ковзання більших 5 м/с і температурах до 280 °С, забезпечуючи при цьому коефіцієнт тертя 0,05-0,25.

Випробування матеріалу типу БФГ-50М (бронза-фторопласт-графіт), розробленого в ІПМ НАН України, при навантаженнях від 2 до 10 МПа і швидкості ковзання 1 м/с на машині тертя СМЦ-2 в умовах тертя без мащення показали, що цей матеріал має коефіцієнт тертя 0,1-0,3, а зношення його не перевищує 300-350 мкм/км. Він був рекомендований для заміни підшипників з бронзи БрОЦС-5-5-5 в дифузійних апаратах цукрового виробництва. Матеріал застосовують також у механізмах крил літаків КБ ім. О. Антонова.

На кондитерських фабриках стрічковий бронзофторопластовий матеріал був використаний в шарнірних вузлах загортувальних автоматів.

5.4.2 Покриття з спеціальними властивостями

Для захисту від корозії і зношування деталей конструкційних матеріалів у харчовій промисловості використовуються різні атмосферо- і хімічностійкі захисні покриття, застосування яких досить детально висвітлено в спеціальній літературі. Особливий інтерес представляють спеціальні покриття, які виконують одночасно із захисними деякі специфічні функції. Спеціальні покриття для харчових виробництв вивчені недостатньо і праць, присвячених їм, небагато. До таких покриттів відносяться: фунгіцидні, для запобігання утворення льоду,

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

термостійкі (вогнестійкі), теплопровідні, електропровідні, гріючі, антистатичні, світловідбиваючі, ерозійно – кавітаційно – стійкі, морозостійкі, зносостійкі, флюоресцентні та ін.

Висока відносна вологість повітря, затемненість приміщень, стабільно низькі температури, наявність живильних середовищ для мікроорганізмів у технологічних цехах харчових виробництв створюють сприятливі умови для розвитку плісняви і грибків. Розповсюджена пліснява виду *Aspergillus niger*, яка розвивається на зерні. Пліснява сприяє відшаруванню захисних покриттів, корозії металу і бетону. Колонії плісняви, відпадаючи від поверхні конструкційних матеріалів, можуть потрапити у продукцію, викликаючи її псування.

Фунгіцидні покриття - надійний спосіб проти плісняви і грибків. Фірмою «Rust-Ollum Corp» (Нідерланди) у захисному покритті використано новий нетоксичний фунгіцид - трихлорметилтіофталімід. Покриття отримало розповсюдження на харчових підприємствах і наноситься на стіни, стелі і обладнання, Покриття стійке при митті до гарячою водою і механічної дії щіток.

Для фарбування приміщень використовують бактерицидні емалі вітчизняного виробництва МЛ-268, НЦ-269. Покриття з латексу АБП-10, лаку ВЕА-40 з присадкою АПБ-10 надійно захищають дерев'яні конструкції від ураження домовими грибами. Деревина з такими покриттями відноситься до першого, найбільш біостійкого класу матеріалів.

Для захисту від сульфат-генеруючих бактерій найбільш придатні епоксидні, епоксиам'яновугільні, вінілові і поліуретанові покриття. Причому, епоксидні системи повинні мати амінний затверджувач, тому що поліамідні затверджувачі поглинаються мікробами. У якості ґрунтовки рекомендується застосовувати неорганічні цинкнаповнені покриття. Поєднання цієї ґрунтовки з епоксидним шаром та двома шарами

епоксікам'яновугільної смоли, яка є затверджувачем аміну, утворює надійну систему для захисту від мікробіологічної корозії.

Найменшу біопошкоджуваність мають полімерні покриття з низьким водопоглинанням: поліолефінові, поліфторетиленові, вінілові, поліакрилатні, кремнійорганічні, феноло- і мочевиноформальдегідні (затверджуються при нагріванні), епоксидні. Стійкі до дії мікроорганізмів покриття на основі природних олігомерів-бітумів, каніфолі, шеллаку, що пояснюється їх кислотними властивостями. Недостатньо стійкі до біопошкоджень вододисперсні, олійні та алкідні покриття.

Для набуття полімерними покриттями фунгіцидних властивостей в них вводять пентахлорфенол, силіциланлід, з'єднання міді, трифеніл олова тощо. Основним токсикантом багатьох фунгіцидних покриттів є геміоксид міді.

У холодильно-компресорних і технологічних цехах харчових і переробних виробництв обладнаних трубчастими ропними батареями, для попередження покриття льодом поверхонь охолодження, доцільно застосовувати спеціальні *антильодові покриття*. До них відносяться покриття на основі органосілоксанів. Наприклад, покриття ОСМ-61 за кріофобністю у 20 разів перевищує очищену від корозії сталеву поверхню (адгезія льоду до чистого металу складає 2МПа, а до покритого ОСМ-61 (0,04-0,07 МПа).

Термостійкі покриття надійно захищають від інтенсивних корозійних руйнувань збірники гарячого водопостачання і трубопроводи. Для таких покриттів використовують алкідні, епоксидні, поліуретанові, кремнійорганічні смоли, наповнені алюмінієм, цинком, слюдою, тальком, графітом, діоксидом кремнію, оксидом алюмінію. Баки гарячої води захищають етиленовими покриттями (лак-етиноль – 85 %, алюмінієва пудра – 15 %, розчинник-ксилол; етиленова фарба ЕКЖС-40; епоксидно-етинолева емаль ЕП-71), покриттями на основі хлорсульфованого

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

поліетилену (хлорсульфований поліетилен 12,7 %, каніфоль - 1,3 %, толуол – 78 %, алюмінієва пудра – 4 %, оксид свинцю – 4 %), цинкосилікатними покриттями (ВЖС-4), залізним суриком на оліфі, склоемалевими покриттями.

Внутрішні поверхні резервуарів для гарячої води покриваються полівініліденфторидом, епоксидними смолами, амінопластом, наповненим діоксидом титану або силікатом цирконію і цинку. Так, для захисту внутрішніх поверхонь баків гарячої води (100-105 °С) варочного цеху Дніпропетровського пивобезалкогольного комбінату „Дніпро” запропоновано чотирьохшарове покриття лаком-етинолом з добавками діоксиду титану.

Теплопровідні покриття дозволяють не тільки захистити машини, агрегати і комунікації від корозійних руйнувань, але й зберегти необхідний теплообмін в системі середовище-метал-середовище. Теплопровідність багатьох покриттів у 100-400 разів менша за теплопровідність сталі. Покриття на основі кристалічних полімерів краще проводять теплоту порівняно із покриттями з аморфних полімерів. Для підвищення теплопровідності покриттів до них додають порошки цинку, алюмінію, бронзи, оксидів металів. Для захисту теплообмінної апаратури покриття з пінопласту наповнюють оксидом хрому, графітом, діоксидом титану.

Якщо треба мати протилежний ефект, то застосовують *теплоізоляційні покриття*. У якості наповнювачів для них застосовують азбест, подрібнену деревину, пластмаси, лігнін.

Електропровідні покриття застосовуються для відведення з поверхонь деталей і вузлів, що труться (стрічкових транспортерів, норій, трансмісій) статичної електроенергії. Електропровідність полімерних покриттів підвищують наповнювачами: сріблом, міддю, нержавіючими сталями, сажею, колоїдним графітом, графітизованим волокном,

технічним вуглецем. Наповнювачі, які найчастіше використовуються, за електропровідністю можна розмістити у ряд: срібло – мідь – ацетиленовий технічний вуглець – графіт. Оптимальна кількість наповнювача коливається від 25 до 50 % об'ємних і від 500 до 600 % масових.

Введення електропровідних наповнювачів (особливо порошок металів) у більшості випадків знижує фізико-механічні властивості полімерів. Тому велике значення має підвищення електропровідності при мінімальній (оптимальній) кількості наповнювачів і фізико-хімічне модифікування покриттів. Досягається це такими способами: введенням саж у латекс каучуку; орієнтацією часток феромагнітного наповнювача магнітним полем, покриттям часток полімеру частками сажі і наступним змішуванням з полімером, який має у складі летке мастило; підбором полімерного зв'язуючого, що запобігає створенню великих асоціатів сажі; застосуванням графіту, попередньо обробленого хлоридом заліза.

Нагрівачі покриття у харчових галузях доцільно використовувати для зняття снігових "шуб" з поверхонь охолодження, обігрівання обмерзлої арматури (ропної, вуглекислотної), сушіння трапів і перехідних драбин в умовах постійної вологості, підігрівання лабораторного посуду і водопровідних труб. Нагрівачами є електропровідні покриття, до яких підводиться струм малої і безпечної напруги, внаслідок чого вкрита поверхня нагрівається.

Застосовують композиції на основі силоксанового каучуку; поліуретану, наповненого 20% графіту; фенолформальдегідної смоли; епоксидної смоли, наповненої технічним вуглецем, графітом чи комбінацією цих наповнювачів з вуглеграфітовим волокном; епоксидної смоли, наповненої мідним порошком.

Світловідбивачі покриття застосовують на харчових підприємствах для захисту від інтенсивного нагрівання сонячними

променями конденсаторів, ресиверів, трубопроводів охолоджуючої води, металоконструкцій градирен, дахів бродильно-табірних та інших охолоджуваних цехів. Покриття білого кольору знижують ступінь нагрівання металевих поверхонь в 1,5 рази (порівняно з непокритим металом) і в 2 рази (порівняно з аналогічними покриттями чорного кольору). Тому їх застосування дозволяє не тільки захищати обладнання від атмосферної корозії, але й суттєво економити енергоресурси холодильно-компресорних цехів. Так, застосування світловідбиваючих покриттів для захисту дахів бродильно-лежерного цеху Дніпропетровського пивобезалкогольного комбінату дозволило, не зважаючи на високі температури весняно-літнього періоду, забезпечити в ньому належну температуру (1-7°C). Високий ступінь відбивання мають покриття, які містять пігменти: діоксид титану, алюмінієвий і бронзовий порошок.

Кавітаційно- і ерозійностійкі покриття підвищують експлуатаційну надійність вентиляторів, димососів, насосів харчових виробництв, які працюють в умовах ерозійних руйнувань і кавітаційної дії середовищ. Стійкість покриттів до дії рідин і газів, які рухаються зі швидкістю понад 30м/с, визначається характером і швидкістю переміщення середовищ, природою підкладки, структурою і фізичним станом захисної плівки, її адгезією до основи. Кавітаційностійкі покриття повинні мати високі значення міцності при розтягуванні і адгезії, а також часу релаксації напружень. До них відносяться сополімервінілхлоридні (ХС-4) і епоксиднокаучукові (ЕП-73, ЕП-917) емалі.

При ударно-абразивній дії середовища захисні покриття повинні характеризуватися не лише високою міцністю але і еластичністю та добрим опором згинанню. Найбільш ерозійностійкими вважаються поліуретанові, епоксидні, тіололові і гумові покриття.

Для нанесення *зносостійких покриттів* у харчовій промисловості переважно використовують поліуретани, пентапласт, політетрафторетилени, поліаміди, епоксидні композиції. Довговічність покриттів залежить від їх густини, адгезії до підкладки, триботехнічних властивостей, рівномірності розташування в них наповнювачів. Полімери також часто використовують для захисту деталей машин і обладнання від дії інтенсивних ударних навантажень, які виникають при вібраціях.

Покриття на основі ненаповнених поліуретанових еластомірів стійкі по відношенню до молока, харчових кислот, солоної води, мастил і розчинників, які використовуються у молочній, консервній і рибній промисловості. За стійкістю до абразивної ерозії ці покриття кращі за нержавіючі сталі, які відносяться до ерозійностійких матеріалів. Добре протистоять абразивному зношуванню труби з поліуретановими покриттями.

Перспективним зносостійким матеріалом є полівініліденфторид. Він застосовується для покриття і футерування елементів насосних агрегатів для перекачування агресивних середовищ. Розроблені склади зносостійких покриттів на основі фторопластів, наповнених графітом і дисульфідом молібдену з добавками інгібіторів корозії.

В УкрНДІпродмаші досліджене зносостійке покриття з самотвердіючої пластмаси акрилової групи. Протакрилові покриття гільз дозуючих пристроїв насосних установок для перекачування рідких опар і заквасок стійкі до кислот і лугів, мають добру адгезію до алюмінію, виключають міграцію продуктів корозії і зношування у харчові середовища.

УкрНДІКП досліджена в умовах дії мінеральної сировини комбікормових заводів зносостійкість труб із поліетилену високого тиску марки Л, полівінілхлориду, металопласту. Випробувані також норійні ковші зі сталі, покриті скломаллю, поліуретановою композицією,

епоксидною смолою. Після 1,5 років експлуатації захищені деталі не мали пошкоджень, а знос контрольних незахищених деталей був суттєвий.

Фізико-хімічне модифікування значно підвищує зносостійкість полімерних покриттів. Модифікаторами полімерних композицій можуть бути неорганічні і мінеральні добавки: дисульфід молібдену, тальк, аморфний бор, карбід кремнію, оксид цинку, бронзова і алюмінієва пудри. Наповнювачами служать карбіди, нітриди, борида важкоплавких металів, а також складні з'єднання (карбонітриди, карбоборида і оксикарбіди). Випробування покриттів на основі епоксидної матриці і важкоплавких наповнювачів показали, що їх зносостійкість у 2,8 рази вища, ніж загартованої сталі 45. Такі покриття використовують для захисту від спрацювання робочих коліс відцентрових насосів.

Спеціальні покриття підвищують експлуатаційну надійність і довговічність машин і агрегатів не лише за умов агресивної дії технологічних середовищ, але й при специфічній дії мікроорганізмів, налипанні харчових продуктів, низьких і підвищених температурах, ультрафіолетовому випромінюванні, ударно-абразивному зношуванні і кавітації. Їх застосування сприяє скороченню невиробничих втрат продуктів харчування, покращенню умов і безпеки праці, економії енергоресурсів, інтенсифікації і підвищенню ефективності харчових виробництв.

Морозостійкі покриття в умовах харчових і переробних виробництв необхідні для захисту обладнання, розміщеного на відкритому повітрі, а також для обладнання і комунікацій холодильників, холодильно-компресорних і деяких охолоджувальних цехів. Ці покриття повинні зберігати фізико-механічні характеристики особливо еластичність, при низьких температурах. Вони повинні витримувати без

розтріскування різке зниження температури до -60°C , а також багатократні цикли охолодження і нагрівання від -60 до $+30^{\circ}\text{C}$.

На морозостійкість покриттів впливає їх товщина, вид підготовки поверхні деталі перед нанесенням покриття, природа основи. Найбільш морозостійкими є фторопластові, поліетеленові, каучукові та поліуретанові покриття.

Флуоресцентні покриття на харчових підприємствах застосовуються у транспортних галереях, місцях, де зберігається зерно, солодовенних цехах, у цехах з високою вологістю. Тому, в умовах недостатньої видимості, для забезпечення безпеки робіт і безаварійної експлуатації машин і обладнання їх фарбування виконують флуоресцируючими складами. Для флуоресцентних покриттів використовуються емалі з флуоресцуючими речовинами, які надають зовнішнім захисним покриттям насиченість: люмінофор жовто-зелений, люмоген жовтий і помаранчевий, родамін, профлавін тощо.

Склоемалеві покриття характеризуються багатофункціональністю. Такі покриття мають високу зносо-, тепло- і хімічну стійкість, забезпечують незначне налипання продуктів, зменшують їх втрати, полегшують мийку апаратів. Застосування труб зі склоемалевими покриттями у мережах гарячого водопостачання показало, що строк їх служби у 5-6 разів вищий порівняно з оцинкованими. Разом з тим, при експлуатації емальованої апаратури не можна перевищувати тиск, або різко підвищувати його навіть у робочих межах, різко нагрівати і заповнювати апарати переохолодженим середовищем, робити місцеві термічні або механічні дії на покриття, мити або дезінфікувати лужними розчинами. Це може зруйнувати покриття. Крім того, коефіцієнт термічного розширення ґрунту склоемалевого покриття повинен бути меншим за коефіцієнт термічного розширення металевої основи, а для покривного шару вони повинні бути приблизно рівними.

Луження деталей (покриття оловом) застосовують для прискорення припрацювання чавунних і алюмінієвих деталей у вузлах технологічного обладнання.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Назвіть методи газотермічного нанесення захисних покриттів на деталі обладнання.
2. У чому різниця між газополуменовою напавкою і «холодним напиленням»?
3. Які сплави варто застосовувати для відновлення і зміцнення колінчастих і ексцентрикових валів холодильних компресорів?
4. Назвіть основні операції технологічного процесу плазмового напилення.
5. Які порошкові матеріали найбільш ефективні для захисту деталей від спрацювання в кислих технологічних середовищах? Наведіть приклади їх застосування.
6. Які порошкові сплави можна застосовувати для підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості деталей?
7. Назвіть типові деталі харчового обладнання, які можна відновлювати і зміцнювати газотермічним напиленням і напавкою.
8. Назвіть основні переваги детонаційного напилення у порівнянні з іншими методами газотермічного зміцнення деталей.
9. Опишіть технологічний процес захисту деталей від зносу і корозії за допомогою електрометалізації.
10. Які властивості полімерних і металополімерних покриттів забезпечують їх широке використання і харчовій промисловості?
11. Які покриття з спеціальними властивостями застосовують на харчових, мікробіологічних і фармацевтичних підприємствах?
12. Охарактеризуйте способи проведення загартування деталей і вплив такого зміцнення на їх зносостійкість.
13. Назвіть методи проведення хіміко-термічної обробки деталей.
14. Чому багатокомпонентні покриття забезпечують більшу довговічність деталей обладнання у порівнянні з однокомпонентними?
15. Які покриття, отримані методами хіміко-термічної обробки, можна рекомендувати для підвищення довговічності деталей обладнання цукрових заводів?

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

16. У чому переваги іонного азотування деталей у порівнянні з пічними? Наведіть приклади його застосування для підвищення довговічності обладнання.

17. Опишіть сутність термодифузійного хромування і наведіть приклади його використання для підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості деталей технологічного обладнання.

18. У чому сутність лазерного зміцнення деталей машин і обладнання?

19. Які переваги лазерної термообробки деталей?

20. Як здійснюється електроіскрове легування деталей?

21. Які переваги має електроіскрове легування у порівнянні з поверхневим загартуванням деталей?

22. Назвіть деталі харчового і переробного обладнання, для яких електроіскрові покриття можуть бути ефективними.

23. Опишіть технологію іонного азотування сталей?

24. Назвіть приклади деталей обладнання, для яких можуть бути ефективними електролітичні покриття.

25. Опишіть технологію електрофорезу і назвіть приклади її застосування для підвищення довговічності харчового обладнання.

26. У чому полягає сутність механічного зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням?

27. Дайте характеристику статичним методам механічного зміцнення деталей.

28. Дайте характеристику динамічним методам механічного зміцнення деталей.

29. Назвіть основні типи обладнання та принцип їх дії для механічного зміцнення поверхонь деталей, що передбачають жорсткий зв'язок між інструментом та об'єктом обробки.

30. Назвіть основні типи обладнання та принцип їх дії для механічного зміцнення поверхонь деталей, що передбачають вільний зв'язок між інструментом та об'єктом обробки.

31. Дайте характеристику основним термомеханічним методам підвищення надійності елементів технічних систем.

32. У чому полягає ефект підвищення надійності деталей машин при використанні низькотемпературних термомеханічних методів обробки?

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

33. Дайте характеристику основним термічним методам підвищення надійності елементів технічних систем.

34. Дайте характеристику основним фізико-хімічним методам підвищення надійності елементів технічних систем.

35. Назвіть особливості термодифузійних методів підвищення надійності деталей машин.

36. Дайте характеристику основним гальванічним методам підвищення надійності елементів технічних систем.

37. Дайте характеристику основним фізичним методам підвищення надійності елементів технічних систем.

38. У чому полягає ефект підвищення надійності деталей машин при використанні високотемпературних термомеханічних методів обробки?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский С.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
2. Берник П.С., Афтаназів І.С., Сивак І.О., Пешко А.В., Голуб Ю.М., Конюхов О.С. Технологічні методи забезпечення надійності машин. – Київ: КИТ, 2004. – 148 с.
3. Берник П.С., Сивак Р.И. Вибрационно-центробежная установка для упрочнения проволоки // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА. - 2005. – С.590-593.
4. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. – М.: Metallurgy, 1972. – 356 с.
5. Бурлаков В.И., Германчук Ф.К., Комарович В.Н. и др. Анализ надежности авиационной техники. Методические указания. – К.: КИИГА, 1982. – 40 с.
6. Вайнберг А.А., Котляр Л.И. Эксплуатационная надежность оборудования зерноперерабатывающих предприятий.–М.: Колос, 1971. - 207 с.
7. Гавриш А.П., Киричок П.О., Підберезний М.П. - Зміцнення металевих поверхонь деталей машин та механізмів. – К.: Наукова думка, 1995. – 211с.
8. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности.- М.: Наука, 1965.- 524 с.
9. Голубец В.М., Пашечко М.И. Износостойкие покрытия из эвтектики на основе системы Fe – Mn – C – В. – К.: Наукова думка, 1989. – 150 с.

10. ГОСТ 13375-75 Надёжность в технике. Расчёт показателей безотказности необновляемых объектов (без резервирования).

11. ГОСТ 13377-75 Надёжность в технике, термины и определения.

12. Гутман З.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. - М.: Металлургия, 1974. – 250 с.

13. Дзюб А.Г., Сухенко Ю.Г., Белый В.И. Статистический анализ точности технологических процессов механической обработки деталей с использованием ЕС ЭВМ.- Киев: Межвуз. полиграф. предприятие, 1989.- 30 с.

14. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 536 с.

15. ДСТУ 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. Введ. 01.-1.95.

16. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення.

17. ДСТУ 2864-94. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. – Введ. 01.01.96.

18. Елизаветин М.А. Повышение надежности машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.

19. Жарский И.М., Баршай И.Л., Свидунович Н.А., Спиридонов Н.В. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин. – Минск: Вышэйшая школа, 2005. – 299с.

20. Иванов Е.С. Ингибиторы коррозии металлов в кислых средах: Справочник. – М.: Металлургия. 1986. – 175 с.

21. Интенсификация процессов и защита оборудования пищевых производств / Г.П. Тищенко, Н.Д. Хоменко, В.Ю. Сухенко и др. // Под ред. Ю.Г. Сухенко. – К.: «ДІА», 2006. – 224 с.

22. Кавітаційна стійкість неметалевих конструкційних матеріалів /Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, О.І. Некоз. В.Ю, Сухенко // Фізика і хімія твердого тіла. – 2003, №3. – С.583-584..

23. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов.- Киев, 1976.- 126 с.

24. Кваско М.З., Аверіна Т.В. Надійність систем автоматики. К.: Політехніка, 2001. – 196 с.

25. Конторович В.И. Надежность малых холодильных машин. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 222 с.

26. Коррозия. Справ./Под ред.П.П. Шрайера; Пер. с англ.- М.: Металлургия, 1981. – 300 с.

27. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

28. Кубарев А.И. Надёжность в машиностроении. – М.: Из-во ГОСТов, 1977 – 311с.

29. Лутковский В.В. Повышение надежности работы холодильных установок.- Л.: Машиностроение, 1978.- 166 с.

30. Методичні вказівки до виконання графічно-розрахункової роботи з дисципліни "Технологічне забезпечення надійності деталей машин"/ Укл.: Афтаназів І.С. – Львів: ДУЛП, 1998 – 31с.

31. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие в 4 т. /Под ред. В.В. Панасюка. – К.: Наукова думка, 1988. – 700 с.

32. Милованов В.И. Повышение долговечности малых холодильных компрессоров. - М.: Пищевая промышленность, 1980.-200 с.

33. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В10 т. – М.: Машиностроение, 1986.

34. Носовский И.Г. Влияние газовой среды на износ металлов. – К.: Техника, 1968. – 181 с.

35. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості: Підручник. / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. – Вінниця: Нова книга, 2001. – 576 с.

36. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. – К.: УМК ВО, 1989. – 152с.

37. Одінцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 327с.

38. Підвищення довговічності різального комплекту м'ясорізальних вовчків /О.і. Некоз. В.І. Білий, М.М. Пушанко та ін. // Придніпровський науковий вісник. – 1998. - №73(140). С. 59-60.

39. Поверхностная пластическая деформация проволоки при вибрационной упрочняющей обработке // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров. – Москва: МГТУ «МАМИ». – 2005. – С.13-15.

40. Половко А.М. Основы теории надежности.- М.: Наука, 1964.- 442 с.

41. Поморский Ю.Л. Методы статистического анализа экспериментальных данных: Методическое руководство для научных работников и аспирантов. – Л.: ГУУЗ Наркомплеса СССР, 1940. – 174 с.

42. Прейс Г.А. О природе коррозионно-механического изнашивания металлов // Трени и износ, 1987. - Т.3. - №5. – С. 792-797.

43. Прейс Г.А., Сологуб Н.А., Некоз А.И. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности.- М.: Машиностроение , 1979.- 208 с.

44. Применение физических методов воздействия в пищевых производствах / Г.П. Тищенко, И.Г. Верясова, С.А. Бойко, А.Ю. Росс, В.Ю. Сухенко, Л.Г. Меньшикова // Вопросы химии и химической технологии. – 1999. - №3. – С. 42-45.

45. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 591 с.
46. Проников А.С. Надёжность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 591 с.
47. Проников А.С. Основы надёжности и долговечности машин. – М.: Изд-во ГОСТов, 1977 – 371 с.
48. Проников А.С. Основы надёжности и долговечности машин. – М.: Машгиз, 1960. – 250 с.
49. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. І.Ф. Малєжика. – К.: НУХТ, 2003. – 400 с.
50. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
51. Романів О.М., Черепанов Г.І. Термомеханічне зміцнення сталі.– К., 1996. – 121 с.
52. Сивак И.О. Пластичность металлов при холодной пластической деформации // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії. – Краматорськ-Слов'янськ: ДДМА. – 2000. – С. 168-171.
53. Сивак Р.И. Схема напряженного состояния в поверхностном пластически деформированном слое // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск: ДГМА. – 2004. - С. 224-227.
54. Сивак Р.И., Карватко О.В. Дослідження процесу прямого видавлювання пористої заготовки // Вісник ВПІ. - №1. – 2005. – С. 82-85.
55. Сивак Р.И., Карватко О.В., Ивацко В.Т. Накопление повреждений при поверхностной пластической деформации // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. - №1(3). – 2006. – С. 18-20.

56. Слынько А.И., Науменко В.Д. Анализ причин вынужденных остановок сахарных заводов // Сахарная промышленность.- 1986.- № 10.- С. 27-28.

57. Сорока С.А., Берник П.С., Сивак Р.И. Влияние акустических колебаний на механические характеристики стали // Вибрации в технике и технологиях. – ВДАУ, 2005. – С. 72-75

58. Стечишин М.С. Повышение долговечности деталей оборудования пищевой промышленности, подверженных кавитационно-эрозионному изнашиванию в солевых растворах: Автореф. дис... канд. техн. наук.- Киев, 1983. - 21 с.

59. Структурутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів /Кіндрачук М.В., Куницький Ю.А., Сухенко Ю.Г. та ін.. – К.: Вища школа, 1997. – 120 с.

60. Сухенко В.Ю., Таран В.М., Сухенко Ю.Г. Прогнозування надійності і довговічності обладнання харчових виробництв за інтенсивністю корозії //Цукор України: Наук.-практ. галузев. журнал. – 2006. - № 1-2 (45) – С. 44-46.

61. Сухенко Ю.Г. Визначення ресурсу та імовірності безвідмовної роботи машин і апаратів харчової промисловості за критеріями корозії та зносу // Проблеми трибології. - 1998. - №4.- С. 44-47.

62. Сухенко Ю.Г. Корозійна стійкість газотермічних покриттів на деталях харчового обладнання //Харчова промисловість. - К.: УДУХТ. - 1988.- Вип.43-44. - С. 197-199.

63. Сухенко Ю.Г. Науково-прикладні основи підвищення довговічності деталей обладнання харчових і переробних галузей АПК: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.05.09/ Націон. ун.-т харч. технологій. – К., 1999. – 35 с.

64. Сухенко Ю.Г., Муштрук М.М., Сухенко В.Ю. Основи механіки і надійності обладнання галузі. Практикум: [Навчальний посібник]. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2015. – 273 с.

65. Сухенко Ю.Г., Некоз О.І., Стечишин М.С. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості. - Київ: Елерон, 1993. - 107 с.

66. Сухенко Ю.Г., Тимохин В.В., Сухенко В.Ю. Повышение долговечности транспортных систем диффузионных аппаратов сахарных заводов // Сборник докладов IV Международной конф. «Сахар-2004. Повышение эффективности работы свеклосахарного комплекса»-М.: Изд.комплекс МГУПП, 2004 .- С. 50-56

67. Тищенко Г.П. , Трофимович А.Н. Повышение долговечности пищевого оборудования: Монография. – М.: Агропромиздат, 1985. - 208 с.

68. Формальчук Є.Ю., Орискевич М.С., Мاستикаш О.Л., Пельо Р.А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів. – Львів: Афіша, 2004. – 492 с.

69. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. – М.: Мир, 1967. – 250 с.

70. Хасуй А. Техника напыления /Пер. С яп. – М.: Машиностроение, 1975. – 250 с.

71. Холодильные компрессоры: Справочник / Под ред. А.В. Быкова.- М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 279 с.

72. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки: Навч. посібник. – К.: Кондор, 2004. – 166 с.

73. Чернец М.В. К вопросу об исследовании кинетики изнашивания материалов при некоторых видах трения скольжения //Трение и износ, 1987. - №4. – С. 662-670.

74. Чернець М., Невчас, Скварок Ю. Дослідження і підвищення зносостійкості матеріалів та оцінка довговічності і надійності триботехнічних систем . – Дрогобич-Люблін, 2000. – 320 с.

75. Чупахин Н.М. Монтаж, эксплуатация и ремонт холодильных установок. М.: Пищевая промышленность, 1988. – 150 с.

76. Шакалов В.М., Сухенко В.Ю., Таран В.М. Протикорозійні інгібітори для котлоагрегатів //Харчова і переробна промисловість. - №8. – 2002. – С. 27-28.

77. Школьник Л.П. Методика усталостных испытаний: Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 302с.

78. Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надёжности. – М.: Сов. Радио, 1968. – 284с.

79. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
Розділ 1. ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	12
1.1 Поняття та структура технічної системи.....	12
1.2 Аналіз параметрів надійності у контексті станів технічної системи.....	13
1.2.1 Основні параметри надійності.....	13
1.2.2 Стани технічної системи.....	21
1.3 Причини втрати системою роботоздатності.....	22
1.3.1 Причини змін початкових параметрів машини.....	22
1.3.2 Процеси, що знижують працездатність виробу.....	23
1.3.3 Класифікація впливів, що діють на машину, за їх швидкодією.....	24
1.3.4 Допустимі та недопустимі види пошкоджень деталей та спряжень.....	25
1.3.5 Залишкові напруги у поверхневому шарі.....	26
1.3.6 Фізико-хімічні властивості поверхонь деталей.....	29
1.3.7 Плівки на металевих поверхнях тертя.....	30
1.3.8 Площа контакту шорстких поверхонь.....	32
1.3.9 Аналіз причин втрати роботоздатності елементами технічної системи.....	34
1.4 Відмови технічних систем.....	35
1.4.1 Характеристика відмов.....	35
1.4.2 Аналіз типових відмов.....	40
1.4.2.1 Поступові (зношувальні) та несподівані відмови.....	40
1.4.2.2 Відмови функціонування та параметричні відмови, фактичні та потенційні відмови.....	42
1.4.2.3 Допустимі та недопустимі відмови.....	43
1.4.2.4 Допустима імовірність безвідмовної роботи як міра для оцінки наслідків відмови.....	44
1.4.3. Фізика відмов.....	45
1.4.3.1 Аналіз закономірностей, що описують зміни в матеріалах.....	45
1.4.3.2 Закони стану і старіння.....	45
1.4.3.3 Явища, які виникають в поверхневих шарах під час руйнування і старіння матеріалів.....	48

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

1.4.3.4 Класифікація процесів накопичення пошкоджень	52
Розділ 2 ОСНОВНІ ФАКТОРИ ЗНИЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	57
2.1 Процеси зношування та руйнування	57
2.1.1 Зношування як наслідок взаємодії твердих тіл під час тертя	57
2.1.2 Природа і класифікація процесів зношування	58
2.1.3 Фрикційні зв'язки та їх руйнування.....	61
2.1.4 Сучасні уявлення про природу зношування твердих тіл.....	63
2.1.5 Зміни у поверхневому шарі	64
2.1.6 Вибірковий перенос при терті	66
2.1.7 Водневе зношування	70
2.1.8 Класифікація видів зношування.....	71
2.2 Тертя у рухомих з'єднаннях	78
2.2.1 Розвиток науки про тертя	78
2.2.3 Граничне тертя.....	86
2.2.4 Рідинне тертя	87
2.2.5 Якість поверхонь деталей вузлів тертя	88
2.3 Корозія обладнання переробних і харчових виробництв.....	89
2.3.1 Основні види корозії	89
2.3.2 Вплив середовищ – електролітів на корозійні процеси.....	93
2.3.3 Вплив деяких чинників на корозійне руйнування металів.....	98
2.3.3.1 Пасивування металів	98
2.3.3.2 Мікроструктура сплаву.....	99
2.3.3.3 Напруження	100
2.3.4 Види корозійних руйнувань	102
2.3.5 Корозія в умовах основних харчових виробництв	103
2.3.5.1 Корозія хлібопекарського устаткування.....	103
2.3.5.2 Корозія металів у спиртовій промисловості	105
2.3.5.3 Корозія обладнання лікєро-горілчаних заводів.....	106
2.3.5.4 Корозія в пивоварному виробництві	106
2.4 Зношування в елементах технічних систем.....	108
2.4.1 Природа і класифікація процесів зношування	108
2.4.2 Вплив на зношування змащування.....	111
2.4.2.1 Вплив змащування.....	111
2.4.2.2 Підбір мастила	112

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

2.4.2.3 Тверді мастила	113
2.4.3 Зношування спряжень.....	113
2.4.3.1 Класифікація спряжень за умовами зношування	113
2.4.3.2 Основні етапи розрахунку спряжень на зношування	118
2.4.3.3 Розрахунок на зношування конічних поверхонь.....	121
2.4.4 Зношування механізмів.....	125
2.4.4.1 Зношування жорстко з'єднаних кільцевих напрямних	125
2.4.4.2 Спільне зношування плоских напрямних.....	127
2.4.4.3 Спільне зношування похилих напрямних	129
2.4.4.4 Блок - схема програми розрахунку на ЕОМ параметрів вузла тертя	131
2.4.5 Зношування машин	134
2.4.5.1 Зношування технологічного обладнання.....	134
2.4.5.2 Вибір раціональної конструкції механізму	136
2.4.5.3 Зменшення навантажень на поверхні тертя.....	139
2.4.5.4 Принцип рівномірного зношування	139
2.4.5.5 Автоматична компенсація зношування.....	141
2.4.5.6 Регламентування показників зношування машини із умови її надійності.....	144
2.5 Спрацювання обладнання в агресивних середовищах	146
2.5.1 Ерозійне і гідроабразивне зношування в середовищах галузі.....	146
2.5.2 Кавітаційно-ерозійне зношування технологічного обладнання.....	149
Розділ 3 ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМ ТА ВИПРОБУВАННЯ ЇХ НА НАДІЙНІСТЬ	163
3.1 Оцінка ступеня пошкодження матеріалу деталей машин	163
3.2 Математичні методи оцінки параметрів надійності систем	169
3.2.1 Основні положення статистичної математики у теорії надійності.....	169
3.2.2 Показники безвідмовності невідновлювальних виробів.....	173
3.2.3 Показники ремонтпридатності.....	185
3.2.4 Показники збережуваності.....	187
3.2.5 Показники довговічності.....	189
3.2.6 Комплексні показники надійності.....	194
3.2.7 Розрахунок показників надійності за результатами	198
спостережень.....	198
3.3 Моделювання відмов	199
3.3.1 Геометричні характеристики випадкових величин.....	199

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

3.3.2 Ймовірнісні моделі відмов	202
3.3.2.1 Нормальний розподіл.....	202
3.3.2.2 Логарифмічно нормальний розподіл.....	211
3.3.2.3 Розподіл Пуассона.....	215
3.3.2.4 Гамма-розподіл	216
3.3.2.5 Розподіл Вейбулла	218
3.3.2.6 Експоненційний розподіл	221
3.3.2.7 Об'єднані розподіли.....	225
3.3.3 Ймовірнісно-фізичні моделі відмов.....	228
3.3.3.1 α -розподіл.....	229
3.3.3.2 DM -розподіл	230
3.3.3.3 DN -розподіл.....	232
3.3.4 Моделі формування відмови елементів системи	234
3.3.4.1 Зв'язок між ступенем пошкодження і вихідними параметрами виробу	234
3.3.4.2 Модель формування відмов харчового обладнання.....	236
3.4 Методики оцінки параметрів надійності	244
3.4.1 Вимірювання параметрів зношування.....	244
3.4.1.1 Класифікація методів вимірювання зношування	244
3.4.1.2 Принципи вибору зносостійких матеріалів	247
3.4.2 Оцінка корозійності стійкості матеріалу.....	250
3.4.3 Випробування стійкості матеріалу	251
3.5 Випробування на надійність елементів технічних систем.....	257
3.5.1 Мета та види випробувань	257
3.5.2 Технологічні аспекти реалізації випробувань	259
3.5.3 Класифікація випробувань	261
3.5.4 Оцінка параметрів процесів деградації	264
3.5.4.1 Випробування невідновлюваних виробів	264
3.5.4.2 Випробування відновлюваних виробів	266
3.5.5 Форсування випробувань	268
3.5.6 Періодичні контрольні випробування	272
Розділ 4 ТЕХНОЛОГІЧНО-ОРГАНІЗАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	282
4.1 Резервування технічних систем.....	282
4.1.1 Сутність та класифікація	282

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

4.1.2 Структурне резервування	283
4.1.3 Кратність резервування	286
4.1.4 Оцінка надійності резервованих систем	287
4.1.4.1 Надійність послідовних систем.....	287
4.1.4.2 Надійність паралельних систем	288
4.1.4.3 Надійність паралельних систем при «теплому» резервуванні.....	291
4.1.4.4 Надійність комбінованих систем	292
4.2 Технологічні аспекти надійності систем.....	294
4.2.1 Технологічні відмови	294
4.2.2 Вплив експлуатаційних факторів на надійність.....	296
4.2.2.1 Вплив параметрів технологічного процесу виготовлення на зносостійкість поверхонь.....	296
4.2.2.2 Вплив параметрів технологічного процесу оброблювання на втомну міцність та корозійну стійкість деталей	297
4.3 Формування властивостей матеріалу виробів при їх виготовленні	298
4.3.1 Фізико-механічні фактори впливу.....	299
4.3.1.1 Обробка металевим інструментом.....	299
4.3.1.2 Обробка абразивним інструментом	301
4.3.1.3 Зміцнення (наклеп) у поверхневому шарі.....	303
4.3.2 Зміна залишкових напружень при реалізації технологій обробки.....	310
4.3.2.1 Лиття	313
4.3.2.2 Обробка тиском	316
4.3.2.3 Зварювання.....	317
4.3.2.4 Загартування	318
4.3.2.5 Хіміко-термічна обробка.....	320
4.3.2.6 Механічна обробка	325
4.3.2.7 Газотермічні методи нанесення захисних покриттів	327
4.3.3 Зміна мікрогеометрії поверхні	328
4.3.3.1 Властивості оброблюваного матеріалу	329
4.3.3.2 Параметри режиму різання.....	329
4.3.3.3 Геометрія інструмента	331
4.3.3.4 Мікрогеометрія і зношування різальних інструментів	332
4.3.3.5 Мастильно-охолоджувальна рідина.....	332
4.3.4 Технологічна спадковість елементів системи	333

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

4.4 Технологічно-організаційні аспекти надійності систем.....	336
4.4.1 Підвищення надійності складних систем.....	336
4.4.2 Оцінка технологічно-організаційних заходів	338
4.4.2.1 Скорочення часу безперервної роботи об'єктів для підвищення надійності ..	338
4.4.2.2 Вплив резервування на надійність	340
4.4.2.3 Зменшення часу відновлення дієздатного стану систем	342
Розділ 5 ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	347
5.1 Механічне зміцнення поверхневим пластичним деформуванням	347
5.2 Термомеханічні методи зміцнення	349
5.2.1 Технологічні аспекти термічної обробки.....	349
5.2.2 Сутність та способи поліморфних перетворень	350
5.2.3 Технологічні аспекти термомеханічної обробки.....	354
5.2.3.1 Класифікація методів термомеханічної обробки	355
5.2.3.2 Низькотемпературне термомеханічне оброблення.....	362
5.2.3.3 Високотемпературне термомеханічне оброблення (ВТМО)	364
5.3 Фізичні способи зміцнення	366
5.3.1 Використання фізичних ефектів та процесів.....	366
5.3.1.1 Зміцнення лазерним променем та електронно-променеве оброблювання...	366
5.3.1.2 Зміцнення способами іонно-плазмового оброблювання.....	371
5.3.1.3 Зміцнення наплавлюванням	373
5.3.1.4 Зміцнення способами електроіскрового оброблення.....	375
5.3.1.5 Ультразвукове зміцнення	376
5.3.1.6 Детонаційні покриття	378
5.3.1.7 Електродугові покриття	385
5.3.2 Фізико-технологічні методи напилення та наплавлення	388
5.3.2.1 Газополуменеві покриття	388
5.3.2.2 Плазмові покриття	398
5.3.3 Хіміко-термічна обробка елементів системи.....	418
5.3.3.1 Методи нанесення термо-дифузійних покриттів.....	418
5.3.3.2 Хіміко-термічні методи зміцнення деталей	421
5.3.3.2.1 Цементация	421
5.3.3.2.2 Азотування	426
5.3.3.2.3 Нітроцементация.....	427

Надійність обладнання галузі: переробні та харчові підприємства

5.3.3.2.4 Борування	428
5.3.3.2.5 Насичення складними сполуками кремнію, алюмінію, сірки, цинку	430
5.3.3.3 Застосування хіміко-термічної обробки у переробних і харчових виробництвах	433
5.3.3.4 Кавітаційно-ерозійна стійкість деталей.....	435
після хіміко-термічної обробки.....	435
5.3.4 Використання електромагнітного поля при обробці	437
5.3.4.1 Електрохімічне зміцнення.....	437
5.3.4.2 Електроіскрове та іонно-плазмове оброблення.....	439
5.3.4.3 Гальванічні методи оброблення.....	443
5.3.4.3.1 Зміцнення способами електролітичного осадження і розчинення.....	443
5.3.4.3.2 Гальванічні та комбіновані електрохімічні покриття.....	445
5.4 Експлуатаційні властивості захисних покриттів обладнання переробних і харчових виробництв	452
5.4.1 Полімерні і металополімерні покриття.....	452
5.4.2 Покриття з спеціальними властивостями	458
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	470

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Сухенко Юрій Григорович

доктор технічних наук, професор

Паламарчук Ігор Павлович

доктор технічних наук, професор

Сивак Роман Іванович

кандидат технічних наук, доцент

Жеплінська Марія Михайлівна

кандидат технічних наук, доцент

**Надійність обладнання галузі: переробні та харчові
виробництва**

Навчальний підручник