

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Ю.Г. СУХЕНКО, О.А. ЛИТВИНЕНКО, В.Ю. СУХЕНКО

**НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ
УСТАТКУВАННЯ
ХАРЧОВИХ І ПЕРЕРОБНИХ
ВИРОБНИЦТВ**

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

*Затверджено Міністерством
освіти і науки України
як підручник для студентів вищих
навчальних закладів, які навчаються за
напрямом підготовки «Інженерна механіка»*

Київ НУХТ 2010

УДК 664:62-192

Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Інженерна механіка» (Лист МОН України № 1.4/18-г-1937 від «21» липня 2008 р.
ISBN 978-966-612-094-9

Рецензенти: кафедра машинознавства Національного авіаційного університету (зав. кафедри д-р техн. наук, проф. М.В. Кіндрачук); д-р техн. наук, проф. Є.М. Панов (декан інженерно-хімічного факультету, зав. кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «КПІ»); д-р техн. наук, проф. В.М. Таран (заслужений діяч науки і техніки України, зав. кафедри машин і апаратів харчових виробництв).

Сухенко Ю.Г., Литвиненко О.А., Сухенко В.Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: Підручник. – К.: НУХТ, 2010. – 547 с.

Підручник складається з двох частин. У першій частині книги «Надійність технічних об'єктів і систем» розглянуті основні поняття, властивості і показники надійності технічних об'єктів; наведені способи їх математичного визначення; подані методики вибору і розрахунку показників надійності машин і апаратів; запропоновані моделі відмов; описані види випробувань на надійність; показана можливість прогнозування надійності виробів; відмічено, що показники довговічності і безвідмовності устаткування підприємств галузі треба визначати з урахуванням дії технологічних середовищ, корозії та зношування, а якість обладнання оцінювати у взаємозв'язку з його надійністю.

У другій частині книги «Забезпечення довговічності машин і апаратів» поданий аналіз виробничих умов експлуатації обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв, особливостей його зношування і корозії; узагальнені відомі і запропоновані нові технологічні та експлуатаційні способи підвищення надійності і довговічності та прогнозування цих властивостей в умовах дії агресивних середовищ галузі.

Особливий наголос зроблений на ефективності застосування інгібіторів корозії, у тому числі нетоксичних біологічних, спеціальних методів поверхневого зміцнення деталей, використання захисних покриттів для підвищення довговічності обладнання в умовах корозійно-механічного зношування. Описані прогресивні способи оцінки надійності обладнання за критеріями корозії та зносу.

Посібник призначений для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів харчового і хімічного профілю. Він буде корисний студентам матеріалознавчих, металургійних, машинобудівних і споріднених спеціальностей, а також науковим співробітникам, аспірантам, викладачам та фахівцям вищевказаних спеціальностей.

Ю.Г. СУХЕНКО, д-р техн. наук
О.А. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук
В.Ю. СУХЕНКО, канд. техн. наук

© Ю.Г. СУХЕНКО
О.А. ЛИТВИНЕНКО
В.Ю. СУХЕНКО, 2010
© НУБІП УКРАЇНИ, 2010

ЗМІСТ

ВСТУП	7
ЧАСТИНА ПЕРША	13
1. Основні поняття, властивості і показники надійності	13
1.1. Фізична сутність надійності	14
1.2. Одиничні і комплексні властивості та показники надійності	16
1.3. Основні поняття математичної статистики, застосовані в теорії надійності	21
1.4. Оцінка найімовірніших причин втрати	24
Запитання і завдання для самоперевірки	25
2. Математичне визначення показників надійності	26
2.1. Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів	27
2.2. Показники безвідмовності відновлюваних об'єктів	36
2.3. Показники ремонтпридатності	40
2.4. Показники збережуваності	42
2.5. Показники довговічності	43
2.6. Комплексні показники надійності	45
2.7. Розрахунок показників надійності за результатами спостережень	48
Запитання і завдання для самоперевірки	49
3. Методика вибору нормованих показників надійності	50
Запитання і завдання для самоперевірки	54
4. Відмови технічних об'єктів	55
4.1. Характеристика відмов	55
4.2. Моделі відмов	58
4.2.1. Суто імовірнісні моделі відмов	59
4.2.1.1. Нормальний розподіл	59
4.2.1.2. Логарифмічно нормальний розподіл	66
4.2.1.3. Розподіл Пуассона	68
4.2.1.4. Гамма-розподіл	68
4.2.1.5. Розподіл Вейбулла	70
4.2.1.6. Експоненційний розподіл	72
4.2.1.7. Об'єднані розподіли	76
4.2.2. Імовірнісно-фізичні моделі відмов	78
4.2.2.1. α -розподіл	78
4.2.2.2. DM -розподіл	79
4.2.2.3. DN -розподіл	81
4.2.3. Оцінка фізичності моделей відмов	82
4.2.4. Оцінка адекватності моделей відмов	82
4.2.5. Аналіз можливостей розрахунку надійності за моделями відмов	84
4.2.6. Оцінка універсальності моделей відмов	84
4.2.7. Оцінка практичної придатності моделей відмов	86
4.2.8. Вибір функцій розподілу для визначення показників надійності	86
Запитання і завдання для самоперевірки	87
5. Надійність технічних систем	88
5.1. Поняття технічної системи	88
5.2. Резервування систем	88
5.3. Структурне резервування	90
5.4. Кратність резервування	91
5.5. Математична оцінка надійності систем	92
5.5.1. Надійність послідовних систем	93
5.5.2. Надійність паралельних систем	93
5.5.3. Надійність паралельних систем при «теплому» резервуванні	95
5.5.4. Надійність комбінованих систем	96
5.6. Підвищення надійності складних систем	97
5.6.1. Способи зменшення інтенсивності відмов	98
5.6.2. Скорочення часу безперервної роботи об'єктів для підвищення надійності	99
5.6.3. Вплив резервування на надійність	100

Запитання і завдання для самоперевірки	104
6. Випробування на надійність	105
6.1. Види випробувань	105
6.2. Випробування невідновлюваних виробів	106
6.3. Випробування відновлюваних виробів	108
6.4. Форсування випробувань	109
6.5. Періодичні контрольні випробування	112
Запитання і завдання для самоперевірки	117
7. Прогнозування і забезпечення надійності виробів в різні періоди існування ...	118
7.1. Період проектування	118
7.2. Період виробництва	123
7.3. Період експлуатації	124
Запитання і завдання для самоперевірки	125
8. Особливості прогнозування і оцінки надійності обладнання харчових виробництв	127
8.1. Структурно-імовірнісний підхід в дослідженні показників надійності	127
8.2. Модель формування відмов харчового обладнання	129
Запитання і завдання для самоперевірки	135
9. Якість, ефективність і економічність технічних об'єктів і систем	136
9.1. Якість і надійність виробів	136
9.2. Надійність об'єктів і систем та їх ефективність	137
9.3. Економічні показники надійності	140
Запитання і завдання для самоперевірки	141
ЧАСТИНА ДРУГА.....	143
10. Корозія обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв	143
10.1. Основні види корозії	143
10.2. Вплив середовищ – електролітів на корозійні процеси	145
10.3. Вплив деяких чинників на корозійне руйнування металів	149
10.4. Види корозійних руйнувань	151
10.5. Методи корозійних випробувань металів	152
10.6. Корозія хлібопекарського устаткування	153
10.7. Корозія металів у спиртовій промисловості	154
10.8. Корозія обладнання лікєро-горілчанних заводів	155
10.9. Корозія в пивоварному виробництві	155
10.10. Корозія сталей в середовищах фармацевтичних виробництв	157
10.10.1. Об'єкти і методи досліджень	157
10.10.2. Корозійна стійкість безнікелевої сталі	160
10.10.3. Корозійна поведінка економнолегованих сталей у розчині хлориду натрію	164
10.10.4. Стійкість нержавіючих сталей у таблеткових масах лікарських препаратів	165
10.11. Протикорозійні властивості титану	167
Запитання і завдання для самоперевірки	171
11. Захист обладнання від корозії	173
11.1. Гальванічний і хімічний захист	173
11.2. Протикорозійні лакофарбові, пластмасові та емалеві покриття	175
11.2.1. Лакофарбові покриття	175
11.2.2. Пластмасові покриття	176
11.2.3. Емалеві покриття	178
11.3. Інгібіторний захист обладнання	178
11.3.1. Области застосування інгібіторів корозії	178
11.3.2. Механізм захисної дії інгібіторів корозії	179
11.3.3. Захист устаткування від атмосферної корозії	181
11.3.4. Запобігання руйнуванню металів у нейтральних і кислих середовищах	181
11.3.5. Захист від корозії теплоенергетичного устаткування	185
11.3.6. Протикорозійний захист холодильного обладнання і комунікацій	187
11.3.7. Інгибування технологічних середовищ харчових виробництв	193
11.3.8. Інгибування модифікаторів іржі і полімерних покриттів	196
11.3.9. Застосування біологічного інгібітора корозії	199

11.3.10. Покращення захисних функцій інгібіторів	201
11.4. Комплексний інгібіторний захист устаткування променерговузлів харчових підприємств	202
11.5. Забезпечення ефективної роботи теплообмінних апаратів цукрової промисловості	204
11.6. Термін служби обладнання при інгібіторному захисті	208
Запитання і завдання для самоперевірки	209
12. Тертя в рухомих з'єднаннях машин і апаратів	211
12.1. Розвиток науки про тертя	211
12.2. Види тертя	213
12.3. Граничне тертя	216
12.4. Рідинне тертя	217
12.5. Якість поверхонь деталей вузлів тертя	217
12.6. Формування шорсткості поверхонь	218
12.7. Структура поверхневого шару	219
12.8. Залишкові напруги у поверхневому шарі	220
12.9. Фізико-хімічні властивості поверхонь деталей	222
12.10. Плівки на металевих поверхнях тертя	223
12.11. Площа контакту шорстких поверхонь	224
12.12. Вихідний і експлуатаційний стан поверхні	226
Запитання і завдання для самоперевірки	227
13. Механізм і класифікація видів зношування деталей робочих вузлів машин і обладнання	228
13.1. Фрикційні зв'язки та їх руйнування	228
13.2. Сучасні уявлення про природу зношування твердих тіл	229
13.3. Зміни в поверхневому шарі	229
13.4. Вторинні структури на поверхні тертя	231
13.5. Втомлювальна теорія зношування	232
13.6. Класифікація видів зношування	232
13.7. Вибірковий перенос при терті	237
13.8. Застосування вибіркового переносу у вузлах тертя	239
13.9. Водневий знос	240
Запитання і завдання для самоперевірки	241
14. Вплив зовнішніх середовищ на процеси тертя та зношування	243
14.1. Вплив газового середовища на процеси тертя і зношування	243
14.2. Вплив рідких середовищ на процеси тертя і зношування	245
14.3. Ефект адсорбційного зниження міцності поверхонь тертя	247
14.4. Характеристика деяких середовищ харчової і переробної промисловості	250
14.4.1. Середовища бурякоцукрових виробництв	250
14.4.2. Середовища олієжирових підприємств	251
14.4.3. Середовища м'ясопереробних підприємств	252
14.4.4. Середовища молокопереробних виробництв	253
14.4.5. Середовища хлібопекарських заводів	254
14.4.6. Середовища крохмально-патокових виробництв	254
14.5. Вплив технологічних середовищ харчової промисловості на зносостійкість деталей обладнання галузі	254
14.5.1. Спрацювання обладнання цукробурякових заводів	255
14.5.2. Зношування устаткування олійних виробництв	258
14.5.3. Спрацювання обладнання м'ясопереробних підприємств	259
14.5.4. Зношування обладнання молокопереробних заводів	259
14.5.5. Ерозійне і гідроабразивне зношування в середовищах галузі	261
14.5.6. Кавітаційно-ерозійне зношування технологічного обладнання	264
14.5.7. Прискорена оцінка зносостійкості матеріалів	268
Запитання і завдання для самоперевірки	271
15. Методи забезпечення довговічності і підвищення зносостійкості деталей машин і обладнання	273
15.1. Способи керування зносостійкістю деталей	273
15.2. Конструктивне забезпечення довговічності вузлів обладнання	273
15.2.1. Модернізація вузлів пакувальних автоматів кондитерського виробництва	274
15.2.2. Збільшення довговічності ножів м'ясорізальних вовчків	279

15.2.3. Підвищення довговічності і надійності відцентрових електронасосів	282
15.2.4. Обґрунтоване конструювання – запорука підвищення працездатності обладнання галузі	284
15.3. Зміна умов експлуатації для захисту обладнання від спрацювання	293
15.4. Раціональний вибір матеріалів – універсальний спосіб забезпечення довговічності обладнання	294
15.5. Застосування поверхневого захисту деталей	306
Запитання і завдання для самоперевірки	307
16. Підвищення довговічності деталей обладнання термічною і хіміко-термічною обробкою	309
16.1. Термічна обробка деталей і їх зносостійкість	309
16.2. Методи нанесення термо-дифузійних покриттів	309
16.3. Застосування хіміко-термічної обробки	311
16.4. Кавітаційно-ерозійна стійкість деталей після хіміко-термічної обробки	312
Запитання і завдання для самоперевірки	314
17. Підвищення довговічності деталей напиленням і наплавленням захисних покриттів	316
17.1. Газополуменеві покриття	317
17.2. Плазмові покриття	325
17.3. Детонаційні покриття	339
17.4. Електродугові покриття	344
17.5. Корозійна стійкість газотермічних покриттів на деталях харчового обладнання ..	345
17.6. Полімерні і металополімерні покриття	348
17.7. Покриття з спеціальними властивостями	352
Запитання і завдання для самоперевірки	358
18. Електрофізичні та електрохімічні методи підвищення ресурсу обладнання...360	360
18.1. Лазерні технології поверхневого зміцнення деталей	360
18.2. Електроіскрова та іонно-плазмова обробка деталей	360
18.3. Гальванічні та комбіновані електрохімічні покриття	363
18.4. Організація дільниць зміцнювальної технології	368
Запитання і завдання для самоперевірки	371
19. Мащення машин і механізмів	372
19.1. Вимоги до мастильних матеріалів	372
19.2. Класифікація, властивості і маркування оливо	373
19.3. Пластичні мастильні матеріали	379
19.4. Тверді мастильні і самозмащувальні матеріали	383
Запитання і завдання для самоперевірки	392
20. Прогнозування довговічності обладнання.....394	394
20.1. Моделювання корозійно-механічного зношування матеріалів в технологічних середовищах.....	394
20.2. Розрахунок ресурсу трибосистем харчового бладнання.....	397
20.3. Оцінка показників довговічності та безвідмовності обладнання за критеріями корозії та зносу.....	405
Запитання і завдання для самоперевірки	409
Додатки	412
Список літературних джерел.....	424

**Присвячується
світлій пам'яті
професора Г.О. Прейса**

ВСТУП

В сучасних виробництвах проблеми підвищення надійності і довговічності машин і обладнання є особливо актуальними. Витрати на 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 по 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, надійність - поняття системне, що включає в себе дуже представницький набір важливих для техніки якостей.

Ступінь надійності кожної машини чи одиниці технологічного обладнання визначається імовірністю появи в ній несправностей, 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 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 і надійність технічного пристрою - це ліквідація надлишкових ланок і підсистем (надійність яких впливає на загальну надійність конструкції), раціональні схеми керування, звільнення технічних об'єктів від надмірних навантажень і динамічних процесів (вібраційних, коливальних тощо), можливість з найбільшою вірогідністю проводити технічну діагностику, полегшити обслуговування і ремонтно-профілактичні роботи.

Динамічна оптимальність конструктивних схем - важливий фактор підвищення надійності машин, але, звичайно, не єдиний. Надзвичайно важлива, якщо не головна, задача - боротьба з будь-якими видами зносу деталей і підсистем практично всіх технічних засобів. Зношування - це процес поступової зміни розмірів і фізичних властивостей елементів і деталей під дією тертя, зовнішніх умов, вібраційних полів і багатьох інших факторів, що існують в кожній

реальній машині. Для боротьби з різновидами зношування застосовують різні засоби, причому, визначальну роль тут грають досягнення сучасного матеріалознавства.

Зношування в умовах харчових і переробних виробництв є маловивченою специфічною проблемою триботехніки. Робочі вузли машин і апаратів, перероблювані 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 поверхневоактивними, 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 створеної 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, призначених 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 аналізу інформації про "самопочуття" машини. Відповідні методики, що використовують сучасні контрольні-вимірювальні прилади й обчислювальну техніку для технічної діагностики, активно розробляються і впроваджуються.

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, економляться матеріальні ресурси, підвищується продуктивність праці. Варто пам'ятати, що в Україні кожний п'ятий робітник - це ремонтник.

Згідно з аналізом, опублікованим Британським комітетом трибоники, в цій країні на заміну спрацьованих деталей витрачається щорічно близько 500 мільйонів фунтів стерлінгів. Як не парадоксально, але трудомісткість ремонтних робіт значно перевищує 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. В результаті це лихорадить виробництво, особливо якщо воно працює за безперервним циклом, що характерно для багатьох харчових виробництв. Безперебійність роботи важлива для кожного харчового підприємства, тому що це приводить не тільки до збитків від простою, але і до псування 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.

А.Я. Соколов відмітив, що робочі органи технологічного обладнання харчової промисловості повинні мати особливо високу зносостійкість, тому що продукти зносу можуть потрапити у харчові продукти і зробити їх непридатними для харчових та кормових цілей.

Технологічне обладнання харчової промисловості найчастіше знаходиться в безпосередньому контакті з основними і допоміжними технологічними середовищами. Особливо це відноситься до різного роду технологічних апаратів, місткостей. Склад середовищ, які використовуються в харчових виробництвах, досить різноманітний. Умовно їх можна поділити на дві групи: мінеральні та органічні речовини. До першої групи відносяться водяні розчини кислот, іони металів, а до другої - досить чисельні і різноманітні вуглеводомісткі з'єднання рослинного і тваринного походження (білки, жири, альдегіди тощо). Крім того, виробництво харчових продуктів зв'язане з процесами гідролізу, екстрагування, фільтрації. Для їх здійснення використовується значна кількість допоміжних речовин: мінеральних

кислот (HCl , H_2SO_4 , H_2SO_3), лугів, хлоридів, водяних розчинів аміаку, спирту.

Все це приводить до інтенсивної корозії обладнання, знижує його надійність і довговічність. Корозійна стійкість матеріалів, які використовуються в 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 контакт з агресивними технологічними середовищами.

Одними з перших дослідженнями зношування деталей машин і обладнання харчової і переробної промисловості зайнялися вчені НУХТ, де на кафедрі матеріалознавства і технології машинобудування були отримані важливі наукові результати і розроблені обґрунтовані рекомендації щодо підвищення надійності і довговічності цих об'єктів. Біля витоків напрямку досліджень стояли професори Прейс Г.О., Сологуб М.А. Їх роботу продовжили учні – професори Некоз О.І. і Сухенко Ю.Г., доценти Зімко Б.М., Іпатов К.О., Слинько О.І., Іпатов І.К., Безикорнов О.І., Білий В.І., Новицький О.Є., Литвиненко О.А. та інші. Тому питання зношування і підвищення стійкості деталей машин і обладнання харчових виробництв викладені в цьому навчальному посібнику, в основному, на базі цих досліджень.

Питаннями захисту від корозії у НУХТ займалися значно менше. Але і тут треба відзначити роботи Крючек В.Г., виконані разом з

Інститутом Титану, направлені на використання цього корозієстійкого металу в харчовій і переробній промисловості, а також праці Краснопольського М.І., які присвячені підвищенню корозійної стійкості устаткування спиртових заводів, Сухенка В.Ю., направлені на дослідження протикорозійного інгібіторного захисту обладнання галузі.

Навчальний посібник, 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 навчального посібника розглянуті технологічні методи забезпечення їх довговічності, а також способи прогнозування ресурсу і безвідмовності використання на підґрунті математичного моделювання процесів спрацювання обладнання.

Надійність і довговічність обладнання (машин)» є дисципліною навчальних планів підготовки фахівців у Національному університеті харчових технологій за спеціальностями: «Обладнання переробних і харчових виробництв», «Обладнання фармацевтичної та мікробіологічної промисловості», «Машини і технологія пакування», «Машини і технологія використаної упаковки», «Холодильні машини і установки».

Вступ, розділи 1 і 9, підрозділи 4.2.2-4.2.8, розділи 13 і 16 написав канд. техн. наук, доц. Литвиненко О.А.; підрозділи 4.1, 4.2, 4.2.1, розділи 3, 5, 6, 12, 14, 15, 17-20, післямову і загальне редагування навчального посібника виконав докт. техн. наук, проф. Сухенко Ю.Г.; розділи 7,8 і 10,11 комп'ютерну верстку і макет навчального посібника розробив канд. техн. наук, доц. Сухенко В.Ю.

Автори вдячні студентам механічного факультету НУХТ, які виконали технічну роботу і комп'ютерну верстку при підготовці рукопису до видання.

[Начало документа](#)

ЧАСТИНА ПЕРША

1. Основні поняття, властивості і показники надійності

Практика експлуатації машин і обладнання в харчовій і переробній галузях агропромислового комплексу (АПК) створила передумови для формування і розвитку такої наукової дисципліни „Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв”. Це наука про методи забезпечення надійності і довговічності технічних об’єктів (машин і апаратів) і технологічних ліній (систем) при проектуванні і виготовленні та збереження їх у період експлуатації.

Головні завдання цієї науки такі:

- встановлення видів кількісних показників надійності;
- розробка методів аналітичної оцінки надійності;
- розробка методів оцінки надійності за результатами випробувань;
- забезпечення і оптимізація показників надійності і довговічності на стадіях розробки, виготовлення і експлуатації технічних об’єктів.

Надійність і довговічність — це ті властивості технічних об’єктів, які характеризують їх роботу в часі, тобто визначають ступінь і характер змін, які проходять в них при експлуатації. Визначення надійності і довговічності будь-якого виробу машинобудування базується на понятті його працездатності.

Працездатність — стан об’єкта, який характеризується його здатністю виконувати усі потрібні функції, обумовлені технічною документацією, до настання відмови.

Технічна документація передбачає рівень зовнішніх дій, методи технічного обслуговування і ремонту об’єктів, норми і допустимі відхилення від встановлених параметрів. Наприклад, для дифузійного апарата цукрового заводу це буде встановлений рівень висолоджування бурякової стружки. Для металорізального верстата - це точність обробки і якість обробленої поверхні, продуктивність, затрати часу на його налагодження і ремонт, ККД (коефіцієнт корисної дії) та інші показники працездатності.

Відмова — це така подія, яка заключається в порушенні працездатності машини (апарата), або її елемента. Признаки (критерії) відмов рекомендується обумовлювати в технічній документації на виробу заданого типу.

Час виникнення відмови та час роботи об'єкта між відмовами є випадковими величинами. Це пояснюється випадковими змінами умов експлуатації об'єкта, відмінністю в кваліфікації обслуговуючого персоналу особливостями, технологічного процесу (різними показниками якості матеріалів, налагодженням апаратури і систем, стомленістю обслуговуючого персоналу), умовами транспортування сировини і готової продукції тощо.

Необхідність підналагоджування машини, яка регламентована умовами експлуатації і обслуговування і зв'язана з недостатньою ступенем якості самої машини, не треба включати до поняття "відмова". Наприклад, підналагодження і зміна інструменту на металорізальних верстатах, регулювання окремих механізмів та інші профілактичні роботи включені в нормативи технологічного і міжремонтного обслуговування. Чим вища ступінь досконалості машини, тим менше таких "узаконених" відмов, тим більше пристосована машина до безперервної безвідмовної роботи.

1.1. Фізична сутність надійності

Об'єкти, що відмовили, зазвичай відновлюються. Оскільки відмови можуть виникати внаслідок втрати працездатності елементами різного типу, розташованих у різних місцях складної технічної системи, то час їх відновлення теж є випадковою величиною.

При вивченні закономірностей відмов найцікавішим є визначення місця виникнення відмови і проміжків часу відновлення та роботи об'єкта між відмовами. Випадковий характер процесів дозволяє стверджувати, що математичним апаратом теорії надійності є теорія імовірностей та математична статистика. Однак, треба мати на увазі, що теорія надійності є самостійною наукою, а не окремим розділом теорії імовірностей. Вона є технічною, а не математичною дисципліною, а коло задач, що вона розв'язує, не обмежується задачами теорії ймовірностей.

Методи теорії імовірностей дозволяють досліджувати закономірності відмов, як масових випадкових явищ. Вони не дозволяють передбачити час і місце виникнення даної відмови (наприклад, першої). Тому зазвичай кажуть про надійність цілого класу однотипних об'єктів, а не одного конкретного зразка. Але це не означає, що імовірнісні методи не дають змогу робити висновки про надійність конкретного зразка. Спостерігаючи за потоком відмов під час тривалої експлуатації даного зразка, можна робити висновки про його надійність, а також про надійність цілого класу однотипних об'єктів

Відмові завжди передують складні внутрішні зміни в системі. Вони можуть проявлятися по-різному, залежно від типу об'єкта, місця та характеру відмови. В одній технічній системі зростає спожита потужність, збільшуються внутрішні витрати, зменшується коефіцієнт корисної дії (ККД) тощо. В іншій - спостерігається дестабілізація характеристик, з'являються непередбачені зміни вихідних параметрів.

Спостерігаючи за цими змінами можна в кожний момент часу визначити запас надійності системи, передбачити появу відмови, своєчасно її ліквідувати або не допустити. Ці проблеми розв'язує теорія діагностування - наука, що досліджує технічні стани та форми їх виявлення в об'єктах, розробляє методи оцінювання технічних станів, принципи побудови і застосування систем діагностування. Кінцевою метою діагностування є зниження витрат на технічне обслуговування і ремонт, забезпечення встановленого рівня безвідмовності і максимальної продуктивності об'єктів в процесі експлуатації. Отже, технічне діагностування є засобом підвищення надійності технічних об'єктів.

Сукупність різних сполучень відмов елементів, що спричиняють функціональну відмову об'єкта, визначають з аналізу їх цільового призначення (порушення пофарбування зовнішньої поверхні трубопроводу не є його відмовою, як пристрою для транспортування, а знищення написів на рекламному щиті є його відмовою), конструктивних особливостей, а також статистичних даних про результати експлуатації.

Тісний зв'язок показників надійності з безпекою технологічного процесу і ефективністю використання машин, обладнання та інших технічних засобів свідчить про важливість нормування вимог до надійності та її забезпечення в процесі експлуатації.

Практика і досвід свідчать про те, що не тільки серйозні відмови функціональних систем, але й незначні збої в роботі технічних об'єктів можуть призвести до тяжких наслідків. Іноді аварійні ситуації виникають внаслідок помилок оператора. У зв'язку з цим особливу увагу треба приділяти розробці логічних схем для оцінки можливих в даному технологічному процесі аварійних ситуацій і відповідних дій оператора.

Серед основних чинників, які впливають на надійність і довговічність технічних об'єктів чільне місце займають конструктивні, виробничо-технологічні і експлуатаційно-технічні:

1. Конструктивні: структурна побудова системи; конструктивне виконання окремих елементів і системи в цілому; ступінь відповідності конструктивних і схемних рішень реальним умовам функціонування; ступінь пристосованості складових об'єкта до відновлення працездатності після відмови.

2. Виробничо-технологічні: реалізація прогресивних технологічних процесів; використання сучасного обладнання; виконання вимог технічної документації; забезпечення стабільності якості виробів.

3. Експлуатаційно-технічні чинники, що впливають на надійність, залежать від умов роботи та зовнішніх навантажень на систему, сукупності ремонтно-профілактичних заходів, оскільки стан системи залежить від стану комплектуючих її елементів.

4. Хоча відмова елемента - явище випадкове, причина появи будь-якої відмови пов'язана з певними фізико-хімічними,

інформаційними процесами, на які впливають такі взаємопов'язані чинники: дефекти вихідних матеріалів; фізико-хімічні процеси старіння; зовнішні навантаження; конструктивно-технологічні дефекти; експлуатаційний режим.

1.2. Одиничні і комплексні властивості та показники 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	$\omega(t)$

Продовження таблиці 1.1.

1	2	3	4	5
2.	Довговічність	Одиничні	Середній ресурс	T_p або T
			Середній термін служби	T_{cl}
			Гамма - відсотковий ресурс	T_{py}
			Гамма - відсотковий термін служби	T_{cly}
			Призначений ресурс	T_{prp} або T_{prn}
			Призначений термін служби	T_{clpr}
3.	Ремонтопридатність	Одиничні	Імовірність відновлення	$P_e(t)$
			Середня тривалість відновлення	T_B
			Гамма - відсоткова тривалість відновлення	T_{By}
			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_{z6} або T_c
			Гамма - відсотковий термін збережуваності	T_{z6y} або T_{cy}
5.	Готовність	Комплексні	Коефіцієнт готовності	K_G
			Коефіцієнт неготовності	K_{HG}
			Середній коефіцієнт	K_G
			Стационарний коефіцієнт готовності	K_{GCT}
			Коефіцієнт оперативної готовності	K_{OG}
			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.

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 потрібні функції.

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

Критичний стан - це стан об'єкта, що може призвести до травмування людей, значних матеріальних збитків чи інших небажаних наслідків. Критичний стан об'єкта може характеризуватися 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).

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

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 $\gamma\%$.

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 2-ма 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 $\gamma\%$.

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.

1.3. Основні поняття математичної статистики, застосовані в 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 дослідів 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 дослідів. 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 дослідів завжди виникають (наприклад, зміна розмірів деталей внаслідок їх зношування).

Неможливі події – які в усіх дослідів 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 провиди, 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 конторолю 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

$$P(A) = m/n, \quad (1.1)$$

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) частістю** або відносною частотою (позначається через W_i) і визначається так:

$$W_i = m_i/n_i, \quad (1.2)$$

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 :

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (1.3)$$

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:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1 \quad (1.4)$$

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:

$$P + Q = 1, \text{ а } Q = 1 - P \quad (1.5)$$

Формула множення імовірностей:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B) \quad (1.6)$$

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

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \dots P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (1.7)$$

При цьому, якщо $P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_n)$, то

$$\prod_{i=1}^n P(A_i) = P(A_i)^n \quad (1.8)$$

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:

$$P(AB) = P_B(A) \cdot P_A(B) \quad (1.9)$$

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).

1.4. Оцінка найімовірніших причин втрати працездатності технічними об'єктами

З використанням формул множення і додавання імовірностей та з урахуванням залежності та незалежності настання подій розроблений математичний апарат (у кінцевому вигляді - це формула Байєса), який застосовують для визначення найбільш імовірних подій у повній їх групі.

Формула Байєса виведена для таких умов. Нехай подія A_j з ознаками j може наступити лише за умови появи однієї з декількох подій (гіпотез) B_1, B_2, \dots, B_n (H_1, H_2, \dots, H_n), які утворюють повну групу подій. Події A_j та H_i є такими, що $P(A_j) > 0$ та $P(H_i) > 0$.

$$P(A_j H_i) = P_{H_i}(A_j) \cdot P(H_i) \quad (1.10)$$

Якщо подія A вже відбулася, то імовірності подій $B(H_i)$ можуть бути оцінені за **формулою Байєса**:

$$P_{AJ}(H_i) = \frac{p(H_i) \prod_{j=1}^m p_{H_i}(A_j)}{\sum_{i=1}^n p(H_i) \prod_{j=1}^m p_{H_i}(A_j)} \quad (1.11)$$

де $P_{AJ}(H_i)$ - імовірність стану H_i , який визначається комплексом ознак A_j , $p(H_i)$ - імовірність стану H_i ; $p_{H_i}(A_j)$ - імовірність існування ознаки A_j у стані H_i .

У статистичних дослідженнях події, називають гіпотезами H_i , а $p(H_i)$ апіорною (*apriori* - до дослідю) імовірністю гіпотези H_i . Умовна імовірність $p_{H_i}(A_j)$ трактується як апостеріорна (*aposteriori* - після дослідю) імовірність гіпотези H_i після того, як наступить подія A_j .

Приклад. Перевіряли технічний стан підвіски фільтрувальної центрифуги. Встановлено такі несправності (події): A_1 - підвищена вібрація вала; A_2 - прискорене зношування опорних підшипників. Висуваються гіпотези H_1, H_2, H_3 , що причинами цього можуть бути: H_1 - неправильно вибрана посадка підшипника на вал; H_2 - неправильно виконане центрування вала в корпусі; H_3 - не виконане балансування ротора центрифуги й існує інша причина.

Експертним опитуванням фахівців визначено такі імовірності станів:

H_i	$p_{H_i}(A_1)$	$p_{H_i}(A_2)$	$p(H_i)$
H_1	0,20	0,30	0,05
H_2	0,40	0,50	0,15
H_3	0	0,05	0,80

Необхідно визначити найбільш імовірну причину несправності підвіски центрифуги.

Використовуючи формулу Байєса, визначимо імовірності кожної з гіпотез:

$$P_{A_j}(H_1) = 0,05 \cdot 0,200,30 / (0,050,200,30 + 0,15 \cdot 0,40 \cdot 0,50 + 0,80 \cdot 0 \cdot 0,05) = 0,09;$$

$$P_{A_j}(H_2) = 0,15 \cdot 0,400,50 / (0,05 \cdot 0,200,30 + 0,15 \cdot 0,40 \cdot 0,50 + 0,80 \cdot 0 \cdot 0,05) = 0,91;$$

$$P_{A_j}(H_3) = 0,80 \cdot 0 \cdot 0,05 / (0,05 \cdot 0,20 \cdot 0,30 + 0,150,400,50 + 0,8000,05) = 0.$$

Отже, найбільш імовірною причиною несправності і підвіски фільтрувальної центрифуги, яка виражена її підвищеною вібрацією та інтенсивним зношуванням опорних підшипників, є неправильне центрування вала в корпусі.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Назвіть головні завдання, які вирішує наука про надійність і довговічність технічних об'єктів.
2. Охарактеризуйте зв'язок надійності і довговічності з працездатністю виробів.
3. Назвіть основні чинники, що впливають на надійність і довговічність технічних об'єктів.
4. Які властивості і показники надійності стандартизовані?
5. Чим відрізняються одиничні і комплексні показники надійності?
6. Дайте визначення основним властивостям надійності.
7. Охарактеризуйте різновиди технічних станів виробів машинобудування.
8. Якими показниками характеризується кожна з 5-ти властивостей надійності?
9. Види і характеристика подій при випробуваннях технічних об'єктів.
10. Дискретні і безперервні випадкові величини та їх характеристика.
11. Частість настання події і застосування цього поняття при визначенні показників надійності об'єктів.
12. Порядок застосування додавання та множення імовірностей подій для розв'язання задач надійності.

[перейти до змісту](#)

2. Математичне визначення показників надійності

Показниками надійності називають кількісні характеристики однієї чи декількох властивостей, що характеризують надійність технічних об'єктів.

Для виробів різного призначення та конструкцій застосовуються різні показники надійності. Усі об'єкти при розрахунках надійності можна розподілити на групи, що відрізняються за показниками надійності та методами її оцінювання (рис. 2.1):

- 1) об'єкти, що не ремонтуються використовуються до першої відмови;
- 2) відновлювані (ремонтоспроможні) об'єкти, поновлення працездатності яких у процесі використання неможливе;
- 3) відновлювані у процесі використання об'єкти, для яких неможливі перерви в роботі (елементи резервного ланцюга);
- 4) відновлювані в процесі використання об'єкти, для яких дозволені короткочасні перерви у роботі (технологічний апарат у складі періодичного технологічного процесу).

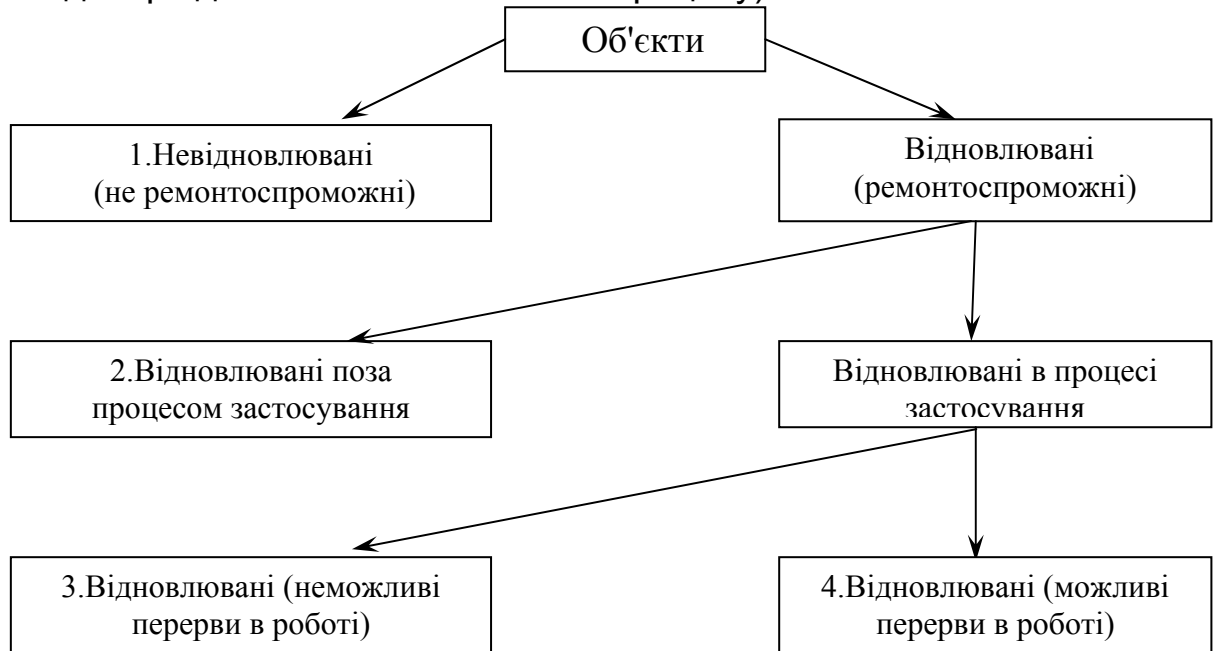


Рис. 2.1 Класифікація об'єктів при розрахунках надійності.

Для не відновлюваних систем обмежимося показниками безвідмовності. Ці ж показники описують і ті системи, що підлягають відновленню після відмов, але їх поведінку доцільно розглядати до моменту першої відмови. До них можна віднести системи, відмови яких надзвичайно рідкі та призводять до важких наслідків.

Повною характеристикою будь – якої випадкової величини є її закон розподілу, тобто співвідношення між можливими її значеннями і відповідними значеннями імовірності.

Наробіток до відмови (або час безвідмовної роботи) T є саме випадковою величиною. Його розподіл може бути описаний за допомогою таких показників надійності, як функція надійності $P(t)$;

густина розподілу наробітку до відмови $f(t)$; інтенсивність відмов $\lambda(t)$.

2.1. Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів

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:

$$F^*(t) = \frac{n_B}{N} \approx Q^*(t) \quad (2.1)$$

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:

$$P^*(t) = \frac{n_D}{N} = 1 - \frac{n_B}{N} = 1 - F^*(t) \quad (2.2)$$

Враховуючи, що імовірність відмови тв імовірність безвідмовної роботи взаємовиключаючі поняття, то

$$P^*(t) + F^*(t) = 1 \quad (2.3)$$

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. 2.2) і в загальному вигляді позначається $F(x)$.

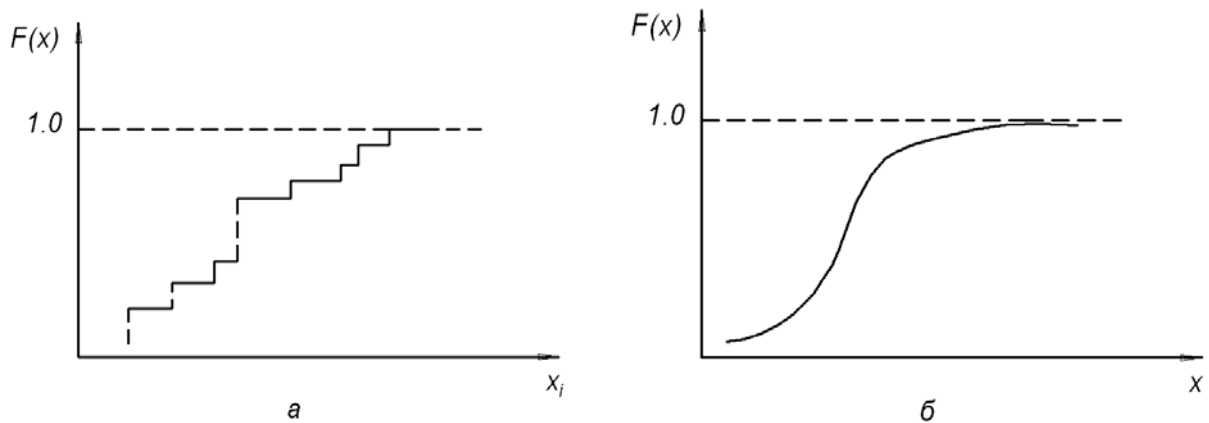


Рис 2.2. Інтегральні емпіричні функції розподілу дискретної (а) і безперервної (б) випадкових величин.

Похідна від функції розподілу по поточній перемінній називається густиною розподілу випадкової величини:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{d(x)} \quad (2.4)$$

Це є диференціальна функція. В статистичній трактовці вона запишеться так:

$$f(t) = \frac{\Delta n_B}{N \cdot \Delta t} = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} \quad (2.5)$$

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:

$$W = n_{Bi} / N \Delta t \quad (2.7)$$

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.2.3). 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:

$$\bar{W} = \sum_{i=1}^n n_{Bi} / \Delta t \cdot N \quad (2.8)$$

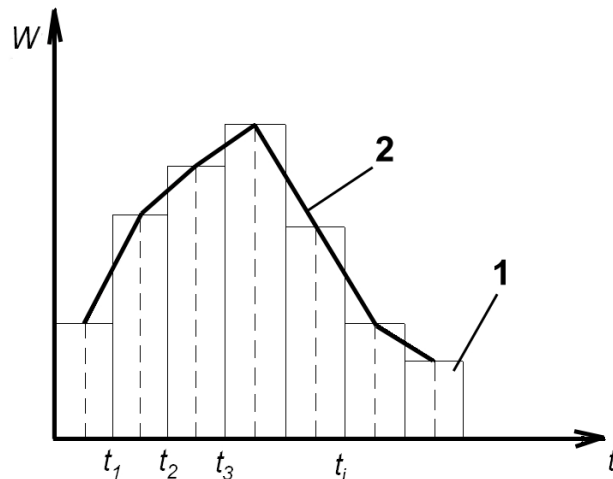


Рис. 2.3 Гістограма (1) і полігон (2) розподілу відмов у часі.

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 2.4)

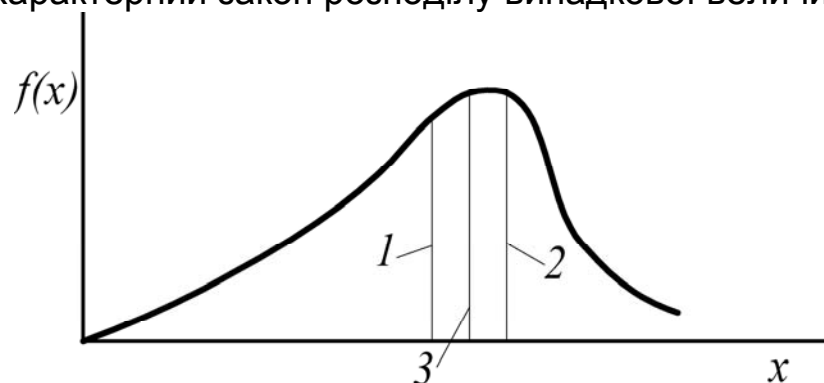


Рис. 2.4. Густина імовірності та характеристики групування випадкової величини: 1-медіана; 2-мода; 3-математичне сподівання.

Диференціальна функція $f(x)$ характеризується: математичним сподіванням, модою, квантиллю, дисперсією (середнім квадратичним відхиленням), коефіцієнтом варіації. (рис. 2.4)

• **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} :

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}, \text{ або } \bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{g_i x_i}{N}, \quad (2.9)$$

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):

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx, \quad m_x = \sum_{i=1}^N \rho_i x_i \quad (2.10)$$

- **Мода** – значення випадкової величини, що зустрічається найчастіше, або найбільш імовірно 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:

$$D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \text{ або } D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N g_i (x_i - \bar{X})^2, \quad (2.11)$$

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 розбіг випадкової величини.

Для безперервних випадкових величин:

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx \quad (2.12)$$

Для дискретних випадкових величин:

$$D_x = \sum (x_i - m_x)^2 \rho_i, \quad (2.13)$$

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:

$$S_x = \sqrt{D_x} \quad (2.14)$$

Для оцінки розсіювання випадкових величин за допомогою безрозмірної (відносної) характеристики використовують **коефіцієнт варіації**, що дорівнює відношенню середнього квадратичного відхилення до математичного сподівання:

$$V_x = S_x / m_x \quad (2.15)$$

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.2.1).

Таблиця 2.1

Варіаційний ряд наробітків колінчастих валів холодильних компресорів до відмови *

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 колінчастого вала;

$P(t) = 1 - Q(t)$ – імовірність безвідмовної роботи вала.

Таблиця 2.2

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.2.5.

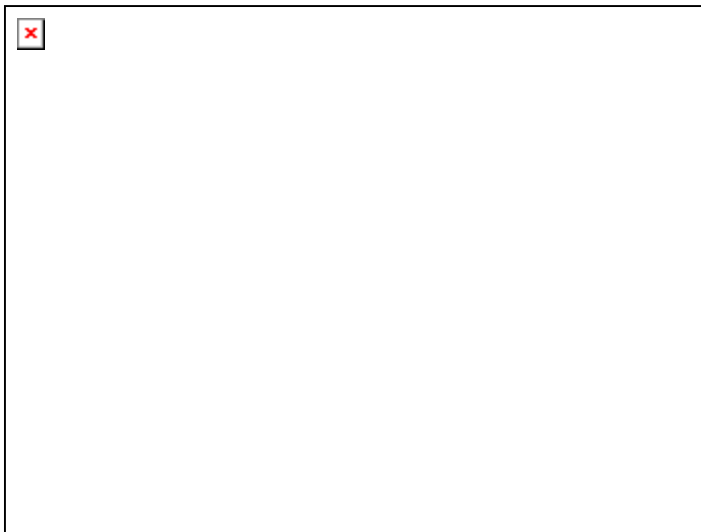


Рис. 2.5 Показники надійності колінчастого вала холодильного компресора: $P(t)$ - імовірність безвідмовної роботи; $F(t) = Q(t)$ - імовірність відмови; $f(t)$ - функція густини розподілу випадкової величини.

Імовірність відмов, і безвідмовної роботи (в часі t) через функцію густини розподілу $f(t)$ пов'язані

залежностями:

$$F(t) = Q(t) = \int_0^t f(t) dt; \text{ при } t = \infty \quad F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 \quad (2.16)$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.17)$$

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.

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}, \quad (2.18)$$

Властивістю $f(t)$ є те, що

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (2.19)$$

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

$$f^* \cdot (t) = \frac{n(t + \Delta t/2) - n(t - \Delta t/2)}{N\Delta t} = \frac{n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{N\Delta t}, \quad (2.20)$$

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 справедливність 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

$$n \cdot (t - \Delta t/2, t + \Delta t/2) = N_0(t + \Delta t/2) - N_0(t - \Delta t/2) \quad (2.21)$$

Отже, при достатньо великій кількості систем N , поставлених на випробування, можна записати:

$$N_0(t - \Delta t/2) = NP(t - \Delta t/2) \quad (2.22)$$

$$N_0(t + \Delta t/2) = NP(t + \Delta t/2) \quad (2.23)$$

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:

$$f^* (t) = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{NP(t + \Delta t/2) - NP(t - \Delta t/2)}{N\Delta t} = -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt}, \quad (2.24)$$

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:

$$\lambda(t) = n_B / n_D \Delta t \quad (2.25)$$

В імовірнісній трактовці, враховуючи, що $n_D / N \cong P(t)$, матимемо:

$$\lambda(t) = f(t) / P(t).$$

В статистичній трактовці можна подати так:

$$\begin{aligned} \lambda^*(t) = f^*(t) / P^*(t) &= \frac{n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{N \Delta t} \frac{N}{N - n(t)} = \\ &= \frac{n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{\Delta t (N - n(t))} = \frac{n(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{\Delta t N_C}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

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 :

$$dP(t)/dt = -\lambda(t)dt \quad (2.27)$$

Інтегруючи даний вираз, отримаємо: $\ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t)dt$. Звідси:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (2.28)$$

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):

$$P(T + t) = P(T) \cdot P(t) \text{ або } P(t) = \frac{P(T + t)}{P(T)}, \quad (2.29)$$

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. 2.3).

Таблиця 2.3

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 відмов $f(t)$	$dQ(t)/dt$	$-dP(t)/dt$	-	$\lambda(t) \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)$
Інтенсивність відмов $\lambda(t)$	$(dQ(t)/dt)/1 - Q$	$\left(\frac{-dP(t)}{dt}\right) / P(t)$	$\frac{f(t)}{\int_0^t f(t) dt} = \frac{f(t)}{P(t)}$	-
Математичне сподівання наробітку до відмови m_t	$\int_0^\infty (1 - Q(t)) dt$	$\int_0^\infty P(t) dt$	$\int_0^\infty t f(t) dt$	$\int_0^\infty \exp\left(-\int_0^x \lambda(t) dt dx\right)$

2.2. Показники безвідмовності відновлюваних об'єктів.

Параметр потоку відмов

Як і наробіток до першої відмови невідновлюваних об'єктів, події відмов відновлюваних є випадковими. Для таких технічних об'єктів характерний **потік відмов**, що виникають одна за одною у випадковій відрізку часу.

Потік відмов можна характеризувати **головною функцією потоку** $W(t)$, що є математичним сподіванням кількості відмов за час $(0, t)$:

$$W(t) = M(n(t)) \quad (2.30)$$

Очевидно, що $W(t)$ є невід'ємною неспадною функцією. Вона майже завжди диференційована. Існує величина

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W(t, t + \Delta t) - W(t)}{\Delta t} = dW(t)/dt, \quad (2.31)$$

яку називають **параметром потоку відмов** (частотою відмов). Вона є межею відношення імовірності появи хоча б однієї відмови на інтервалі часу Δt до величини цього інтервалу за умови, що $\Delta t \rightarrow 0$.

Очевидно, що для стаціонарного потоку $\omega(t) = \omega$, тобто є сталою величиною і не залежить від часу. Головна функція потоку в цьому випадку є лінійною функцією:

$$W(t) = \omega t \quad (2.32)$$

Для статистичної оцінки параметра потоку відмов поставимо на випробування N однакових відновлюваних об'єктів чи систем в однакових умовах експлуатації і при однаковому технічному обслуговуванні. У момент $t=0$ усі системи працездатні і починають працювати. Тривалістю відновлення нехтуватимемо. Позначимо $n_i(t)$ кількість відмов i -ї системи ($i = 1 \div N$) на інтервалі $(0, t)$. Тоді

$$\omega^*(t) = \sum_{i=1}^N (n_i(t + \Delta t) - n_i(t)) / (N \cdot \Delta t) \quad (2.33)$$

Отже, параметр потоку відмов - це відношення кількості відмов системи на деякому малому відрізку часу до довжини цього відрізка.

Використаємо тепер другий спосіб завдання потоку відмов, розглядаючи випадкові величини - наробітки між відмовами $T_1, T_2, T_3, \dots, T_i$. Вважатимемо, що всі ці величини, включаючи наробіток до першої відмови T_1 , взаємонезалежні і розподілені з однією і тією ж густиною розподілу $f(t)$. Тоді параметр потоку відмов пов'язаний з густиною розподілу наробітку між відмовами $f(t)$ рівнянням

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t f(t - \tau) \cdot \omega(\tau) d\tau \quad (2.34)$$

Виведемо це рівняння. Нехай при відмові об'єкта він миттєво відновлюється, набуваючи властивостей нового об'єкта (або замінюється новим). Середня кількість відмов (змін) n на інтервалі $(t, t+dt)$ згідно з (2.31) дорівнює:

$$n = N\omega(t)dt = n_1 + n_2 \quad (2.35)$$

де n_1 - кількість відмов об'єктів з тих, що безвідмовно працювали протягом інтервалу $(0, t)$; n_2 - кількість відмов об'єктів з тих, що раніше відмовляли; N - загальна кількість об'єктів.

Очевидно, що

$$n_1 = Nf(t)dt. \quad (2.36)$$

Для визначення n_2 розглянемо малий інтервал наробітку $(\tau, \tau + d\tau)$, що передував t . Протягом цього інтервалу відновлено і замінено на нові $N\omega(\tau)d\tau$ об'єктів. З них на інтервалі $(t, t+dt)$ будуть знову замінені $(N\omega(\tau)d\tau)f(t-\tau)$. Складаючи ці кількості по усіх τ від 0 до t , дістанемо, що разом з тих, що вже відмовили (були замінені) до

моменту t об'єктами, знову відмовлять на інтервалі $(t, t + dt)$

$$n_2 = Ndt \int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) d\tau. \quad (2.37)$$

Загальна кількість відмов на інтервалі наробітку $(t, t + dt)$:

$$Ndt\omega(t) = \left(f(t) + \int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) dt \right). \quad (2.38)$$

Скоротивши ліву та праву частини останнього рівняння на Ndt , отримаємо рівняння (2.34).

Визначимо зв'язок параметра потоку відмов з рештою показників безвідмовності, скориставшись такими співвідношеннями:

$$f(t) = -P'(t); \quad f(t - \tau) = -P'(t - \tau). \quad (2.39)$$

Підставимо $f(t)$ і $f(t - \tau)$ у (2.34). Отримаємо:

$$\omega(t) = -P'(t) - \int_0^t P'(t - \tau) \omega(\tau) d\tau. \quad (2.40)$$

Оскільки у багатьох випадках густина розподілу наробітку до відмови має складний вигляд, розв'язати аналітично інтегральні рівняння (2.34) і (2.40) не вдається. У таких випадках можна застосовувати чисельні методи розв'язання цих рівнянь або перетворення Лапласа.

Застосуємо перетворення Лапласа для розв'язання (2.34). Воно є рівнянням Вольтерра другого роду з різницеvim ядром. Ураховуючи,

що $\int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) d\tau$ є згорткою функцій $\omega(t)$ і $f(t)$, маємо:

$$L \left(\int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) dt \right) = \omega(p) f(p), \quad (2.41)$$

де p – оператор Лапласа.

Тоді рівняння (2.34) в операторній формі матиме вигляд:

$$\omega(p) = f(p) + \omega(p) f(p) \quad \text{або} \quad \omega(p) = \frac{f(p)}{1 - f(p)}. \quad (2.42)$$

Запишемо співвідношення $P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt$ в операторній формі:

$$P(p) = \frac{1}{p} - f(p)/p \quad \text{або} \quad P(p) = (1 - f(p))/p,$$

звідки $f(p) = 1 - pP(p)$. (2.43)

Підставимо (2.43) у (2.42). Отримаємо:

$$\omega(p) = (1 - pP(p))/pP(p) \quad (2.44)$$

Операторне подання (2.42) і (2.44) інтегральних рівнянь (2.34) і (2.40) дозволяє їх розв'язати.

Приклад. До складу технічної системи входить кульковий підшипник, який виготовляють два заводи. Підшипник першого заводу має інтенсивність відмов $\lambda_1 = 10^{-6}$ 1/год., а другого $\lambda_2 = 10^{-7}$ 1/год. В експлуатацію надходять 60% підшипників першого заводу і 40% другого. Підшипники на заводах не маркуються, а тому визначити, який завод його виготовив, немає можливості. Після відмови підшипник замінюється і система продовжує експлуатуватися. Відмови незалежні. Треба отримати вираз для визначення параметра потоку відмов підшипників у цій системі.

Розв'язок. Для визначення параметра потоку відмов застосуємо рівняння (2.34). Оскільки $\lambda_1 = const$ і $\lambda_2 = const$, густина розподілу наробітку до відмови підшипника може бути подана у вигляді:

$$f(t) = c_1 \lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) + c_2 \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t),$$

де $c_1 = 0,6$; $c_2 = 0,4$ – коефіцієнти ваги, що враховують вплив додатків, з яких складається $f(t)$, або частка підшипників, виготовлених на кожному із заводів, відповідно, 0,6 і 0,4.

Для визначення $\omega(t)$ спочатку застосуємо перетворення Лапласа:

$$f(p) = (c_1 \lambda_1 / (p + \lambda_1)) + (c_2 \lambda_2 / (p + \lambda_2))$$

Після підстановки (2.42) отримаємо:

$$f(p) = \frac{\frac{c_1 \lambda_1}{p + \lambda_1} + \frac{c_2 \lambda_2}{p + \lambda_2}}{1 - \frac{c_1 \lambda_1}{p + \lambda_1} - \frac{c_2 \lambda_2}{p + \lambda_2}} = \frac{c_1 \lambda_1 (p + \lambda_2) + c_2 \lambda_2 (p + \lambda_1)}{(p + \lambda_1) \cdot (p + \lambda_2) - c_1 \lambda_1 (p + \lambda_2) - c_2 \lambda_2 (p + \lambda_1)} =$$

$$= \frac{\lambda_1 \lambda_2 (c_1 + c_2) + p(c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2)}{p^2 + p(\lambda_1 + \lambda_2) - p(c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2)} = \frac{p \lambda_0 + \lambda_1 \lambda_2}{p(p + \lambda_3)},$$

де $\lambda_0 = c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2$; $\lambda_3 = c_2 \lambda_1 + c_1 \lambda_2$.

Розкладемо отриманий дріб на елементарні дроби:

$$\frac{p \lambda_0 + \lambda_1 \lambda_2}{p(p + \lambda_3)} = \frac{A_1}{p} + \frac{A_2}{(p + \lambda_3)},$$

звідки

$$A_1 = c_1 \lambda_1 / \lambda_3; \quad A_2 = \frac{-\lambda_3 \lambda_0 + \lambda_1 \lambda_2}{-\lambda_3} = \lambda_0 - \lambda_1 \lambda_2 / \lambda_3.$$

Отже,

$$\omega(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} + \left(\lambda_0 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} \right) \exp(-\lambda_3 t) = 1,67 \cdot 10^{-6} + 0,48 \cdot 10^{-6} \exp(-0,36 \cdot 10^{-6} t)$$

При розв'язанні інтегрального рівняння (2.34) чисельними методами можна використати метод послідовних наближень. Згідно з ним виконуються послідовні обчислення за формулою:

$$\omega_{i+1}(t) = f(t) + \int_0^t f(t-\tau) \omega_i(\tau) d\tau$$

доти, поки значення $\omega_i(t)$ і $\omega_{i+1}(t)$ будуть збігатися. За нульове

наближення $\omega_0(t)$ зручно взяти інтенсивність відмов $\lambda(t)$.

У технічних завданнях на об'єкти, що проектуватимуться, використовують середній показник

$$\bar{\omega} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \omega(t) dt, \quad (2.45)$$

де t_p – технічний ресурс об'єкта.

Якщо при $t \rightarrow \infty$ щільність розподілу наробітку до відмови $f(t) \rightarrow 0$, то існує усталене значення параметра потоку відмов

$$\omega_{ycm} = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \frac{1}{m_{tp}}, \quad (2.46)$$

де m_{tp} – середній наробіток до відмови відновлюваного об'єкта (у випадку, що розглядається, збігається із середнім наробітком до відмови $m_t = m_t$).

У загальному випадку $m_{tp} = M(T_i) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (i=1, 2, \dots)$.

Отже, середній наробіток до відмови m_{tp} – відношення наробітку відновлюваного об'єкта до математичного сподівання кількості його відмов протягом цього наробітку. Часто m_{tp} застосовуються як самостійний показник надійності. Його статична оцінка

$$m_{tp}^* = Nt / \sum_{i=1}^N n_i(t), \quad (2.47)$$

де $n_i(t)$ – кількість відмов i – го об'єкта протягом наробітку t .

Головною перевагою $\omega(t)$ як кількісної характеристики надійності є те, що вона дозволяє повністю оцінити властивості технічних об'єктів які працюють у режимі заміни елементів. Після виникнення відмов такі технічні системи ремонтують, а потім експлуатують знову. Параметр потоку відмов $\omega(t)$ може також застосовуватися для оцінювання надійності складних систем разового використання у процесі їх зберігання. Відомості про значення $\omega(t)$ дозволяють правильно спланувати частоту профілактичних заходів, структуру ремонтних підрозділів, потрібну кількість і номенклатуру запасних елементів. Значення параметру потоку відмов основних елементів обладнання харчових і переробних підприємств наведені в додатку 1.

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:

$$S(t) = P\{T_B < t\}. \quad (2.48)$$

Очевидно, $0 \leq S(t) \leq 1$, $S(0) = 0$, $S(\infty) = 1$. Статистична оцінка для визначення імовірності відновлення має вигляд:

$$S^*(t) = N_B / N_{3B}, \quad (2.49)$$

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

$$f_B(t) = S'(t) \quad (2.50)$$

Статистична оцінка $f_B(t)$ має вигляд:

$$f^*_B(t) = \frac{n_B(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{N_{3B} \cdot \Delta t}, \quad (2.51)$$

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

$$\mu(t) = \frac{f_B(t)}{1 - S(t)} \quad (2.52)$$

Враховуючи, що $S(0) = 0$ і залежить (2.50), з виразу (2.52) отримаємо:

$$S(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \mu(x) dx\right] \quad (2.53)$$

При $\mu = const$ матимемо експоненційний розподіл для часу відновлення:

$$S(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (2.54)$$

Аналогічно $\lambda^*(t)$ статистична оцінка величини $\mu(t)$ матиме вигляд:

$$\mu^*(t) = \frac{n_B(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)}{N_{CB} \Delta t}, \quad (2.55)$$

де N_{CB} - середня кількість об'єктів, що не відновлювалися на інтервалі часу $(0, t)$.

Середнім часом відновлення є математичне сподівання часу відновлення.

$$m_{tB} = M[T_B] = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt \quad (2.56)$$

Аналогічно (3.24) для статистичної оцінки середнього часу відновлення матимемо:

$$m_{tB}^* = \sum_{i=1}^{N_{3B}} t_{Bi} / N_{3B} \quad (2.57)$$

де t_{Bi} - тривалість відновлення i -го об'єкта.

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 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:

$$\bar{T}_{зб} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{збi}, \text{ років} \quad (2.58)$$

де $t_{збi}$ – термін збережуваності i -х об'єктів.

Гамма – відсотковий термін збережуваності за умов, що його поточні значення підпорядковані нормальному закономірному розподілу випадкових величин, можна розрахувати так:

$$T_{збу} = T_{зб} - U(t_{зб})S, \text{ років} \quad (2.59)$$

де $U(t_{зб})$ – квантиль нормального закону розподілу терміну збережуваності; S – середнє квадратичне відхилення цього показника.

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:

$$P_D = T_p / \left(T_p + \sum_{i=1}^n \tau_{ni} \right) \quad (2.60)$$

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:

$$Z = \frac{\tau_1}{T_1} + \frac{\tau_2}{T_2} + \dots + \frac{\tau_n}{T_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_i}, \quad (2.61)$$

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 додатків 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:

$$\tau_{ni} = \frac{T_p}{T_i} \tau_i, \quad (2.62)$$

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:

$$P_D = 1 / \left(1 + \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{T_i} \right), \quad (2.63)$$

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% простоює 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:

$$\bar{T}_{cl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}, \text{ ГОД} \quad (2.64)$$

$$\bar{T}_{cl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{cni}, \text{ РОКІВ} \quad (2.65)$$

де t_{pi} , t_{cni} – 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:

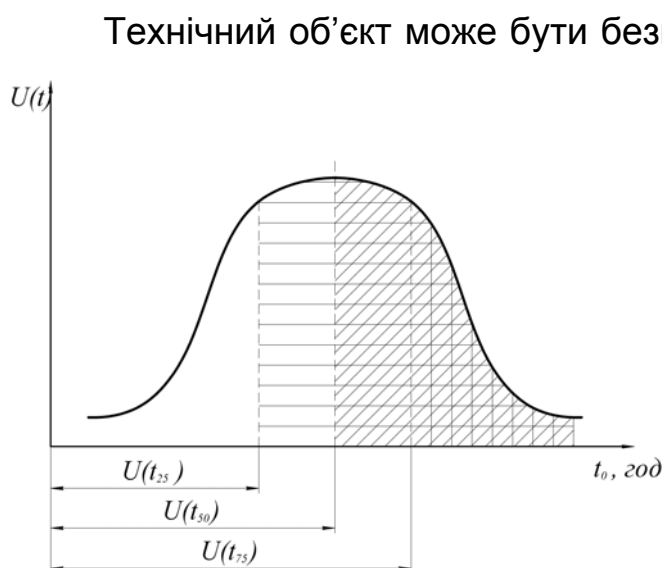
$$T_{py} = T_p - U(t'_y) \cdot S'_1, \text{ год} \quad (2.65)$$

$$T_{cly} = T_{cl} - U(t_y) \cdot S'_2, \text{ років}, \quad (2.65)$$

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 2.6). 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. 2.6. 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.

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_T , коефіцієнт технічного використання k_{mv} та інші.

Ці показники доцільно застосовувати для відновлюваних об'єктів, для яких дозволені відмови і короточасні 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. 2.7). Хрестиками на рисунку позначені моменти відмов, кружками – моменти закінчення відновлення і продовження експлуатації. На рисунку видалені проміжки часу, коли об'єкт не працював з інших причин, окрім відмови.

Коефіцієнтом готовності k_T називають імовірність того, що система виявиться працездатною у довільно вибраний момент часу в усталеному процесі експлуатації:

$$k_T = \frac{m_{TP}}{m_{TP} + m_{TB}} \quad (2.68)$$

де m_{TP} – середній наробіток до відмови відновлюваного об'єкта;
 m_{TB} – середній час відновлення.

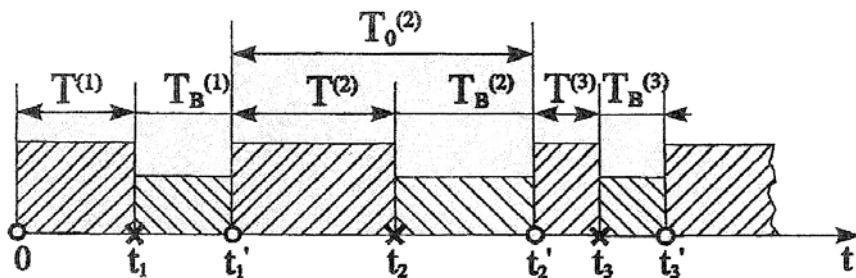


Рис. 2.7. Схема випадкового часового режиму експлуатації об'єкта:

$T^{(1)}, \dots, T^{(n)}$ – 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_T 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:

$$k_T^* = N_{II}(t_x) / N \quad (2.69)$$

або один об'єкт (рис.2.7):

$$k_T^* = \frac{\sum_{i=1}^n T^{(i)}}{\left(\sum_{i=1}^n T^{(i)} + \sum_{i=1}^n T_B^{(i)} \right)}, \quad (2.69)$$

де $N_{II}(t_x)$ – 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**:

$$k_{TB} = m_{TP\Sigma} / (m_{TP\Sigma} + \tau_{TO\Sigma} + m_{TB\Sigma}), \quad (2.71)$$

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:

$$k_{TB} = \gamma \frac{k_{\Gamma}}{1 - k_{\Gamma}}, \quad (2.72)$$

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_{Γ} 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 простоїв з організаційних причин. Їх враховує **коефіцієнт оперативної готовності**:

$$k_{OG} = \frac{T_{ПЦ}}{T_{ПЦ} + T_B + T_{ОРГ}}, \quad (2.73)$$

де $T_{\text{шц}}$ – сумарна тривалість працездатного стану об'єкта; T_B – сумарна тривалість усунення його відмов; $T_{\text{ОРГ}}$ – 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 $V_{\text{р.ф.}}$) до номінального значення цього показника $V_{\text{р.н.}}$, розрахованого за умови, що відмови об'єкта впродовж того ж періоду не виникають ($k_r=1$):

$$k_{\text{е.в.}} = V_{\text{р.ф.}} / V_{\text{р.н.}} \quad (2.74)$$

У випадку різкого зниження $k_{\text{е.в.}}$ експлуатаційникам потрібно передати об'єкт на капітальний ремонт, або замінити його у технічній системі чи технологічній лінії.

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.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. На які групи поділяють всі об'єкти при розрахунках надійності?
2. Опишіть порядок визначення показників безвідмовності не відновлювальних виробів за результатами випробувань.
3. Густина розподілу випадкової величини і її застосування при визначенні показників безвідмовності виробів.
4. Як побудувати варіаційний ряд наробітків на відмову технічних об'єктів?
5. Якими параметрами характеризується густина розподілу випадкової величини?
6. Як визначаються основні параметри диференціальної функції (густини розподілу випадкової величини – математичне сподівання, мода, квантиль, дисперсія і коефіцієнт варіації)?
7. Як визначити інтенсивність відмов об'єктів за результатами спостережень?
8. Як визначити імовірність безвідмовної роботи не відновлюваних виробів, коли відома їх λ - характеристика?
9. Особливості визначення показників безвідмовності відновлювальних виробів з застосуванням параметру потоку відмов.
10. Опишіть основні показники ремонтпридатності об'єктів і способи їх визначення.
11. Якими показниками можна охарактеризувати збережуваність технічного об'єкта?
12. Назвіть основні показники довговічності.
13. Охарактеризуйте комплексні показники надійності.
14. Чим відрізняються між собою коефіцієнти готовності та оперативної готовності?
15. Охарактеризуйте зв'язок надійності і довговічності з працездатністю виробів.

[перейти до змісту](#)

3. Методика вибору нормованих показників надійності

Ця методика призначена для вибору показників надійності технічних об'єктів, які в процесі експлуатації можуть знаходитись тільки в працездатному і непрацездатному стані. Вона базується на рекомендаціях Комітету стандартів, мір та вимірювальних приладів. Методика дозволяє вибрати ті показники надійності, які кількісно оцінюють окремі властивості надійності (безвідмовність, ремонтпридатність, довговічність, збережливість, готовність), а також визначити ступінь і характер їх впливу на виконання технічним об'єктом його функцій.

На вибір показників надійності конкретних технічних об'єктів впливає ряд чинників.

До конструктивних чинників відноситься ремонтпридатність виробів, тому що експлуатація невідновлюваних виробів припиняється у момент відмови, а відновлювальні вироби знову поступають в експлуатацію.

Серед чинників, які впливають на характер і режим використання виробів за призначенням важливе місце має часовий режим експлуатації і кратність включення їх у роботу.

Чинники, що характеризують організацію експлуатації, в значній мірі визначають надійність виробів, на яку впливає не лише кваліфікація обслуговуючого персоналу, але і порядок проведення обслуговування. Але принципового впливу на вид функції стану ці чинники не мають. Від них залежать лише кількісна величина показників надійності.

Чинники збереження і транспортування виробу також впливають на вид функцій його станів, якщо вони не є режимами активної експлуатації. Ці чинники можуть бути враховані як чинники характеру і режиму використання.

Чинники області застосування можуть вплинути на вид функції стану. Але цей вплив враховується за допомогою вже названих чинників характеру і режиму використання.

Для визначення показників надійності за табл. 3.1 визначається шифр технічного об'єкта (виробу) з урахуванням тих чинників, які впливають на їх вибір.

Таблиця 3.1.

Визначення шифру виробів за сукупністю чинників,
які впливають на вибір показників надійності

Номер і визначення класу, ознака поділу на підкласи	Номер і визначення підкласу виробів	
	Невідновлювальні	Відновлювальні
1	2	3

I. Чинники конструктивного рішення: ремонтпридатність	1-невідновлювальні	2-відновлювальні
II. Чинники характеру і режиму використання за призначенням*: обмеження терміну експлуатації**	1-до відмови; 2-до відмови або до досягнення граничного стану; 3-до відмови або до закінчення необхідних функцій	1-до першої відмови; 2-до першої відмови або до досягнення граничного стану; 3-до першої відмови або до закінчення виконання необхідних функцій; 4-до досягнення граничного стану; 5-до граничного стану в «режимі очікування», або до відмови чи до закінчення виконання потрібних функцій в «режимі роботи».
III. Чинники наслідків відмови: домінуючий чинників при оцінюванні наслідків відмови	1-факт відмови; 2-факт виконання або невиконання виробом заданих йому функцій у заданому об'ємі	1-наявність відмови незалежно від терміну простою; 2-факт виконання чи невиконання виробом заданих йому функцій у заданому об'ємі; 3-факт вимушеного простою; 4-наявність відмови та вимушений простій; 5-факт виконання або невиконання виробом заданих йому функцій у заданому об'ємі при довільному моменті початку «режиму роботи».
<p>* Невідновлювальні вироби за режимом роботи поділяють на групи: 1-безперервний; 2-циклічно-регулярний; 3-циклічно-нерегулярний.</p> <p>** Тимчасовий режим використання за призначенням.</p>		

Цифри шифру позначають: перша – номер підкласу з I класу, друга – номер підкласу з II класу, третя – номер групи з II класу, четверта – номер підкласу з III класу.

Приклад. Шифр виробу 1312 означає, що за чинниками конструктивного рішення (клас I) цей вибір відноситься до невідновлювальних (підклас 1); за чинниками характеру і режиму використання за призначенням (клас II) він відноситься до виробів, що експлуатуються до відмови або до закінчення виконання необхідних функцій (підклас 3) і використовується у безперервному режимі (група 1); за чинниками наслідків відмови (клас III) він відноситься до виробів, у яких домінуючим фактором при оцінюванні функціональних наслідків

відмови є виконання чи невиконання заданих йому функцій у заданому об'ємі у заданий час.

Вибору показників надійності має передувати встановлення ознак відмови і граничного стану. Вибір критерію відмови здійснюється у такому порядку: установлюють перелік параметрів і допустимі межі їх зміни, виходячи з вимог замовника та умов експлуатації, з урахуванням вимог замовника і можливості технічного виконання установлюють перелік технічних параметрів, які визначають працездатність виробу; для цих параметрів установлюють величину допусків, вихід за межі яких приводить до відмови; ці допуски записують у нормативно-технічну документацію на вироби як критерії відмов.

Граничний стан виробу визначається неможливістю його подальшої експлуатації або недопустимим зниженням ефективності.

Для невідновлюваних виробів ознаки граничного стану такі: відмова; досягнення періоду експлуатації з надто високою інтенсивністю відмов; порушення вимог безпеки; настання періоду морального зносу.

Для відновлюваних виробів критерії граничного стану такі: досягнення періоду експлуатації виробу з пониженою ефективністю або з порушенням вимог безпеки; досягнення періоду експлуатації із стрімким збільшенням параметру потоку відмов, наслідком чого є економічна недоцільність збільшення кількості ремонтів; настання періоду морального старіння виробу.

З урахуванням аналізу чинників, які впливають на вибір показників надійності виробу, установлюється його шифр за табл. 3.1. При цьому визначається: перша цифра шифру (підклас виробу) – відновлювальний виріб чи невідновлювальний; друга – критерій обмеження терміну експлуатації; третя – часовий режим використання; четверта – домінуючий чинник при оцінюванні наслідків відмови.

Факт виконання чи невиконання виробом заданих йому функцій у визначеному об'ємі розглядається як домінуючий, коли виріб призначений для виконання конкретного завдання. Факт вимушеного простою може переважати у тих випадках, коли при оцінюванні наслідків відмови визначальну роль відіграє вимушене простоювання виробу, а величина збитків пропорційна часу простою. Факт відмови може бути визначальним, коли наявність відмови не приводить до невиконання деякої конкретної задачі, а простоювання, викликане відмовою, визначальної ролі в оцінюванні наслідків відмови не відіграє.

За визначенням із табл. 3.1. шифром задається номенклатура нормованих показників надійності (табл. 3.2).

У тих випадках, коли нормованими показниками надійності є K_G , $K_{T.B.}$, K_{OF} в нормативно-технічній документації повинні указуватись показники окремих властивостей надійності: безвідмовність, і за

необхідності, збережуваність, наробіток на відмову і безвідмовність - $\bar{T}, P(t_p)$; середній час профілактики - $T_{II}; \bar{T}_B, T_{cp}$, які визначають величину відповідних коефіцієнтів K_{Γ} (готовності) і $K_{T.B.}$ - (технічного використання), або $K_{ог.}$ - коефіцієнта оперативної готовності. Однак, критерієм для порівняння технічних об'єктів за надійністю у цьому випадку має бути показник, вибраний за табл. 3.2. За показники ремонтпридатності, поряд з часовим показником, можна брати показники трудомісткості і матеріалоємності.

Таблиця 3.2.

Вибір нормованих показників надійності

Шифр виробу		Показники надійності
1	2	3
1111	2111	$\bar{T}_0(T_{cp})$
1121	2121	
1131	2131	
1211	2211	$\bar{T}_0(T_{cp})$ \bar{T}_γ (або T_γ і \bar{T}_{cl})
1221	2221	
1231	2231	
1222	2232	$P(t_p)$, \bar{T}_γ (або T_γ і \bar{T}_{cl})
1232	2422	
2222	2432	
1312	-	$P(t_p)$
2312	-	
2411	-	$\omega(t)$ (або \bar{T}_p), \bar{T}_γ (або T_γ і \bar{T}_{cl})
2421	-	
2431	-	
2413	-	$\bar{K}_{T.B.}, T_\gamma$ (або T_γ і \bar{T}_{cl})
2423	-	\bar{K}_Γ, T_γ (або T_γ і \bar{T}_{cl})
2433	-	
2414	-	$\bar{K}_{T.B.}, \omega(t)$ (або \bar{T}_p), T_γ (або T_γ і \bar{T}_{cl})
2424	-	$\bar{K}_{T.B.}, \omega(t)$ (або \bar{T}_p), T_γ (або T_γ і \bar{T}_{cl})
2434	-	
2415	2515	$\bar{K}_{ог.}, T_\gamma$ (або T_γ і \bar{T}_{cl})
2425	2525	
2435	2525	

Для виробів із постійною інтенсивністю відмов треба також вказувати λ - характеристику (інтенсивність відмов) в період нормальної експлуатації і ресурс (строк служби). Якщо інтенсивність відмов виробу змінна, то треба вказувати або імовірність безвідмовної

роботи для встановленого ряду виробів, або імовірності безвідмовної роботи для встановленого ряду наробітків і ресурс. Для характеристики надійності об'єкта зі змінною інтенсивністю відмов у часі можуть застосовуватись λ - характеристики для окремих періодів експлуатації.

Приведемо приклади вибору показників надійності технічних об'єктів різного призначення з використанням табл. 3.1 і 3.2.

Приклад 1. Визначити показник надійності зубчастого колеса, що є компонентом такого виробу, який призначений для виконання функцій у заданому об'ємі і у заданий час.

Виріб, згідно з табл. 3.1 – невідновлюваний (1), експлуатується до відмови або до закінчення виконання заданих функцій (3) у безперервному часовому режимі (1). Переважаючим фактором при оцінюванні наслідків відмови є виконання чи невиконання заданих функцій (2) – шифр 1312. З табл. 3.2 видно, що показником надійності повинен бути $P(t_p)$.

Приклад 2. Визначити показники надійності побутового холодильника.

Холодильник – виріб відновлюваний (2), експлуатується до граничного стану (4). В залежності від конкретних умов може експлуатуватися у будь-якому часовому режимі (1, 2, 3). Домінуючим фактором при оцінюванні наслідків відмови є її наявність (1) – шифри 2411, 2421, 2431. З табл. 3.2 виходить, що показниками надійності мають бути $\omega(t)$ (або \bar{T}_p) і T_γ (або T_γ і \bar{T}).

Приклад 3. Визначити показники надійності для троса, призначеного для піднімання і опускання ліфта з людьми у соляну шахту.

У зв'язку з тим що відмови троса приводять до аварії, термін його експлуатації необхідно обмежити досягненням граничного стану (якщо до досягнення цього стану він не відмовить).

Таким чином, виріб буде мати шифр 1222 – невідновлюваний (1), експлуатується до відмови або до граничного стану (2) в циклічно-регулярному часовому режимі (2). Домінуючим фактором в оцінюванні наслідків відмови є факт виконання або невиконання заданих функцій (2). З табл. 3.2 очевидно, що показниками надійності повинні бути $P(t_p)$ і T_γ або T_γ і \bar{T}_{cl} , де t_p – час піднімання і опускання ліфта.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Які показники надійності відносяться до нормованих?
2. Які чинники впливають на вибір нормованих показників надійності технічних об'єктів?
3. Опишіть порядок поділу виробів на класи і підкласи для визначення показників надійності.
4. Як впливають наслідки відмов на вибір нормованих показників надійності?
5. Назвіть критерії граничного стану для не відновлюваних і відновлюваних виробів при виборі нормованих показників надійності.
6. Опишіть порядок шифрування виробів при визначенні нормованих показників надійності.

[перейти до змісту](#)

4. Відмови технічних об'єктів

4.1. Характеристика відмов

Відмова – це подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати необхідні функції, 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.

По швидкості 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 вовчків 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.

По впливу 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.

За можливістю подальшого використання виробів, відмови ділять на *повні*, що виключають можливість застосування виробу за призначенням до їх усунення, і *часткові*, за яких виріб може використовуватись частково, наприклад з певною потужністю чи

продуктивністю, або з недостатньою точністю (для вимірювальних приладів).

За причинами виникнення (за походженням) відмови відносять до *конструктивних*, що виникли внаслідок конструктивних недоліків об'єкта, *технологічних*, виникнення яких пов'язане з порушенням або недосконалістю технології виготовлення виробів, *експлуатаційних*, причини виникнення яких пов'язані з умовами експлуатації чи використання виробів.

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 накипання 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, накипання, 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.4.1): 1 – період припрацювання елементів виробу; 2 – період нормальної експлуатації; 3 – період інтенсивного зношування.

У кожному з цих періодів переважаючі відмови мають свої особливості. В першому періоді експлуатації виникають відмови

припрацювання, зв'язані з тим, що не всі елементи виробу припрацювалися, або з проявленням дефектів, що не були виявлені при його виготовленні. В третьому періоді відбуваються зносові 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.

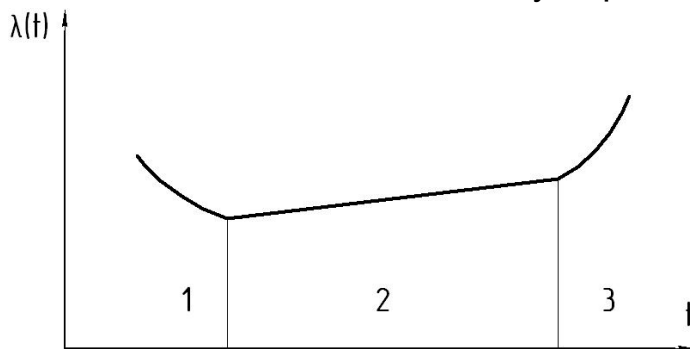


Рис. 4.1. Характерні періоди експлуатації технічного об'єкта.

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

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

3-тя 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.

4.2. Моделі відмов

У процесі експлуатації чи випробувань об'єкта події відбуваються випадковим чином, а інтервали часу до настання події (між подіями) є випадковими тривалостями перебування об'єкта у певних станах, статистичне розсіювання яких обумовлене неоднорідністю структури матеріалів об'єкта, випадковою різницею структури, хімічного складу та інших властивостей об'єктів, випадковим навантаженням їх під час експлуатації чи випробувань.

Розглядаються наступні випадкові тривалості: наробіток до відмови, наробіток між відмовами, наробіток до критичної відмови, ресурс, термін служби, термін збереженості, час відновлення дієздатного стану. Усі випадкові тривалості є неперервними і вимірюються в одиницях часу чи в одиницях, пропорційних часу (кількість робочих циклів, запусків, обертів тощо).

Вичерпною характеристикою будь-якої випадкової величини, у тому числі згаданих випадкових тривалостей, є імовірнісний розподіл

цієї величини чи функція розподілу. Незалежно від складності об'єкт (елемент, система, складна система з резервуванням) має певну функцію розподілу наробітку (модель відмов), і вся проблема оцінки показників надійності об'єкта зводиться до оцінки параметрів цього розподілу.

Встановлення аналітичного виразу функції розподілу випадкових величин (наробітку, ресурсу тощо) дозволяє визначити необхідні властивості і показники надійності (середні та гамма-відсоткові показники, імовірність безвідмовної роботи та ін.). У цьому випадку вибір тієї чи іншої теоретичної моделі відмов забезпечує певну точність кількісних показників надійності. Методичні похибки оцінок показників надійності, притаманні певним моделям, можуть мати вельми суттєве значення.

У відповідності з ДСТУ 3433-96 вибір моделі відмов технічного об'єкта, тобто визначення аналітичного виразу функції розподілу, проводять на підставі аналізу:

1. Статистичних даних наробітків до відмови (на відмову), ресурсу чи збережаності.
2. Фізичних процесів деградації, які спричиняють відмову (граничний стан).

Перший підхід передбачає розгляд відмов, як випадкових абстрактних подій, а моделі відмов у цьому випадку називають імовірнісними (статистичними).

Другий підхід ґрунтується на аналізі статистичних закономірностей протікання фізичних процесів, які спричиняють відмови. У цьому випадку параметри розподілу мають конкретну фізичну інтерпретацію, а моделі відмов називають імовірнісно-фізичними.

Виходячи з кінцевої мети та вирішуваних завдань, основними вимогами до функцій розподілів, використовуваних як моделі відмов, мають бути такі: фізичність, адекватність, можливість забезпечити розрахунок надійності об'єкта, універсальність і практична придатність.

4.2.1. Суто імовірнісні моделі відмов

Історично склалося, що імовірнісні методи дослідження розвиваються шляхом використання теоретичних розподілів випадкових величин, які часто називають законами теорії надійності. Розглянемо найбільш вживані теоретичні розподіли.

4.2.1.1. Нормальний розподіл

Один з найбільш універсальних, зручних і широко застосовуваних для практичних розрахунків законів розподілу випадкових величин – це закон розподілу Гаусса (рис.4.2.) універсальність його полягає в тому, що він є граничним законом, з якого витікають інші (показниковий, Релея, Вейбулла, Пуассона, біноміальний тощо).

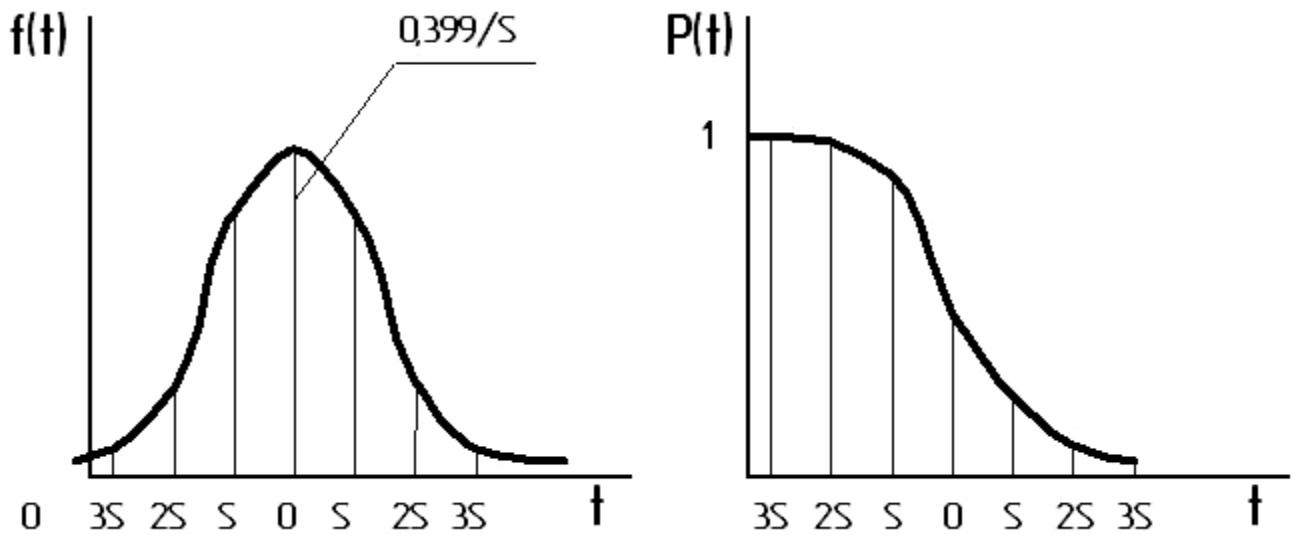


Рис.4.2 Густина імовірності (а) та інтегральна функція імовірності (б) нормального розподілу

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:

$$f(t) = \frac{1}{S_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S_t^2}} \quad (4.1)$$

Цей розподіл має 2 незалежних параметри: математичне сподівання m_t і середнє квадратичне відхилення S . Значення названих параметрів оцінюють згідно формул:

$$m_t \approx \bar{t} = \sum t_i / N \quad (4.2)$$

$$S \cong s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (4.3)$$

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. 4.2, 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 4.2, б).

Крива густини розподілу випадкової величини тим гостріша і вища, чим менше значення S (рис. 4.3). 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. 4.4.). Величина x являється центрованою, тому що $m_x=0$, і нормованою, тому що $S_x=1$.

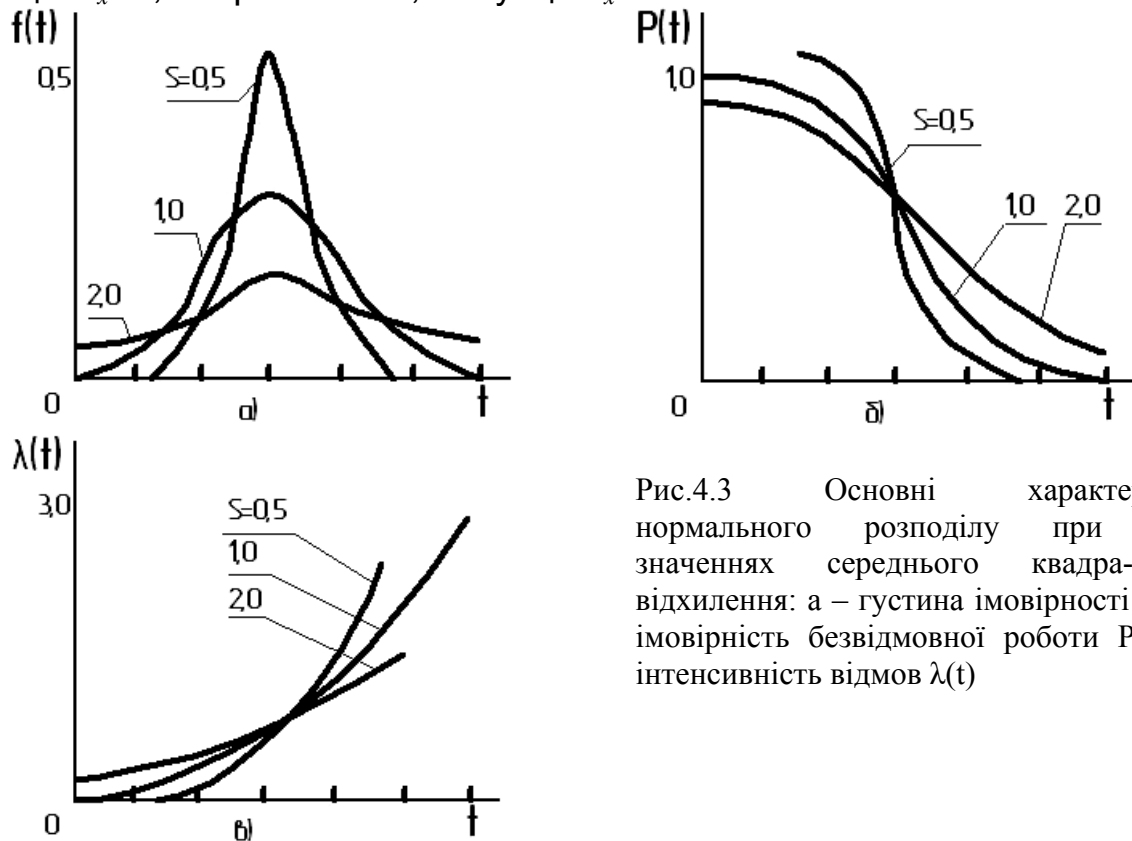


Рис.4.3 Основні характеристики нормального розподілу при різних значеннях середнього квадрата-тичного відхилення: а – густина імовірності $f(t)$; б – імовірність безвідмовної роботи $P(t)$; в – інтенсивність відмов $\lambda(t)$

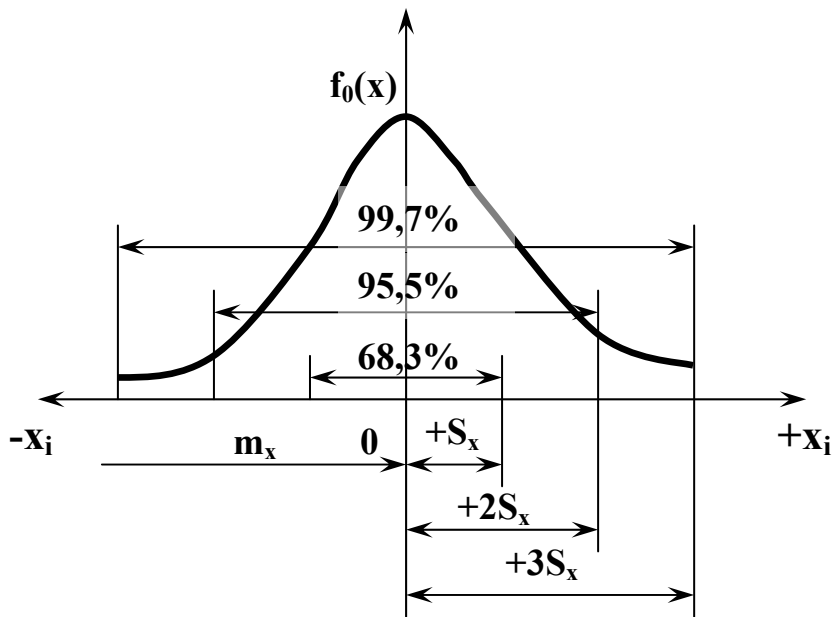


Рис. 4.4.
Диференціальна функція нормованого нормального розподілу випадкової величини

Інтегральна функція у цьому випадку описується формулою:

$$F_0(t) = \int_{-\infty}^x f_0(x) dx \quad (4.4)$$

Очевидно, що

$$F_0(x) + F_0(-x) = 1 \quad (4.5)$$

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x) \quad (4.6)$$

Для використання таблиць треба робити підстановку $x = (t - m_t) / S$. При цьому x називається квантилю нормованого нормального розподілу і позначається U_p .

Густина розподілу, імовірність відмови та імовірність безвідмовної роботи відповідно визначаються так:

$$f(t) = \frac{f_0(x)}{S}; \quad Q(t) = F_0(x); \quad P(t) = 1 - F_0(x) \quad (4.7)$$

значення $f_0(x)$ і $F_0(x)$ беруть з таблиць (наприклад, табл. 4.1).

Таблиця 4.1

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. 4.2. приведені безпосередньо значення $P(t)$ в залежності від квантилі:

$$x = U_p = (t - m_t) / S \quad (4.8)$$

Часто замість інтегральної функції використовують функцію Лапласа:

$$\Phi(x) = \int_0^x f_0(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (4.9)$$

Очевидно, що

$$F_0(t) = \int_{-\infty}^0 f_0(x) dx + \int_0^x f_0(x) dx = 0,5 + \Phi(x) \quad (4.10)$$

Таблиця 4.2.

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
-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 (табл. Д2.1, додаток 2), відрізняються межами інтегрування і мають вигляд:

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t-m_t}{S}\right); \quad P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t-m_t}{S}\right) \quad (4.11)$$

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:

$$t = m_t + U_p \cdot S_t \quad (4.12)$$

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:

$$m_u = m_x + m_y + m_z; \quad S_u^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2, \quad (4.13)$$

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:

$$\bar{f}(t) = \frac{C}{S_t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - m_t)^2}{2S_t^2} \right], \quad (4.14)$$

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:

$$C = C_0 = \frac{1}{\int_0^{\infty} f(t) dt} = \frac{1}{1/2 + \Phi\left(\frac{m_t}{S_t}\right)}, \quad (4.15)$$

де $\Phi(x)$ – нормована функція Лапласа.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx \quad (4.16)$$

значення якої наведені в табл. Д2.1 (див. додаток 2). Нормуючий множник $C=1$, якщо $m_t / S_t > 2,5$.

Криві зміни показників надійності при зрізаному нормальному розподілі наведені на рис. 4.5.

Імовірність безвідмовної роботи об'єкта визначається за формулою:

$$\bar{P}(t) = C \left[\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{t - m_t}{S_t}\right) \right] \quad (4.17)$$

Очевидно (рис. 4.5), що інтенсивність відмов круто зростає від нуля до нескінченності. В області малих значень t деградація і старіння

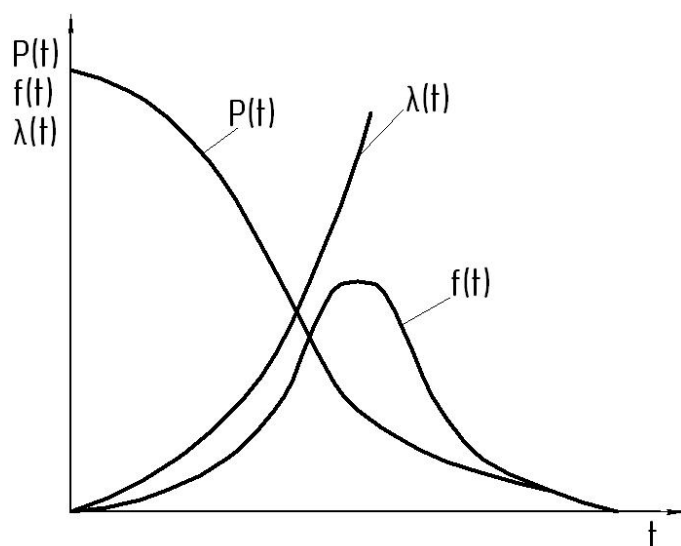


Рис. 4.5. Зміна показників надійності з часом для зрізаного нормального розподілу

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 таблицю 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 $P(t) = 0,842$

$$t_{0,8} = m_t + u_p S = 0,3 \times 10^4 - 0,842 \times 2 \times 10^3 = 1,316 \times 10^3 = 1,316 \times 10^3 \text{ год}$$

4.2.1.2. Логарифмічно нормальний розподіл

Розподіл випадкової величини набуває характеру логарифмічно нормального, коли за нормальним законом змінюється логарифм цієї величини. Цим законом описується наробинок до відмови більшості деталей, особливо якщо відмови наступають із-за втомлюваності і старіння(наприклад, підшипників кочення).

Густина розподілу (рис. 4.6) описується залежністю:

$$f(t) = \frac{1}{S(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2S^2}} \quad (4.18)$$

де μ і S - параметри, які оцінюють за результатами спостережень чи випробувань. Так, якщо ми випробуємо N виробів до відмови, то

$$\mu \approx \mu^* = \frac{\sum \ln t_i}{N}; S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\ln t_i - \mu^*)^2} \quad (4.19)$$

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:

$$U_p = (\ln t - \mu) / S \quad (4.20)$$

Математичне сподівання напрацювання до відмови:

$$m_t = e^{u+s^2/2} \quad (4.21)$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$S_t = \sqrt{e^{2\mu+S^2(e^{S^2}-1)}} \quad (4.22)$$

Коефіцієнт варіації:

$$V_t = S_t / m_t = \sqrt{e^{S^2} - 1} \quad (4.23)$$

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:

$$f(t) = \frac{0,4343}{S_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg t - \lg t_0)^2}{2S^2}} \quad (4.24)$$

Причому, для визначення густини розподілу $f(t)$ $\lg t_0$ і S визначають за результатами спостережень чи випробувань:

$$\lg t_0 \approx \lg t_0^* = \frac{\sum \lg t_i}{N}; S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\lg t_i - \lg t_0^*)^2} \quad (4.25)$$

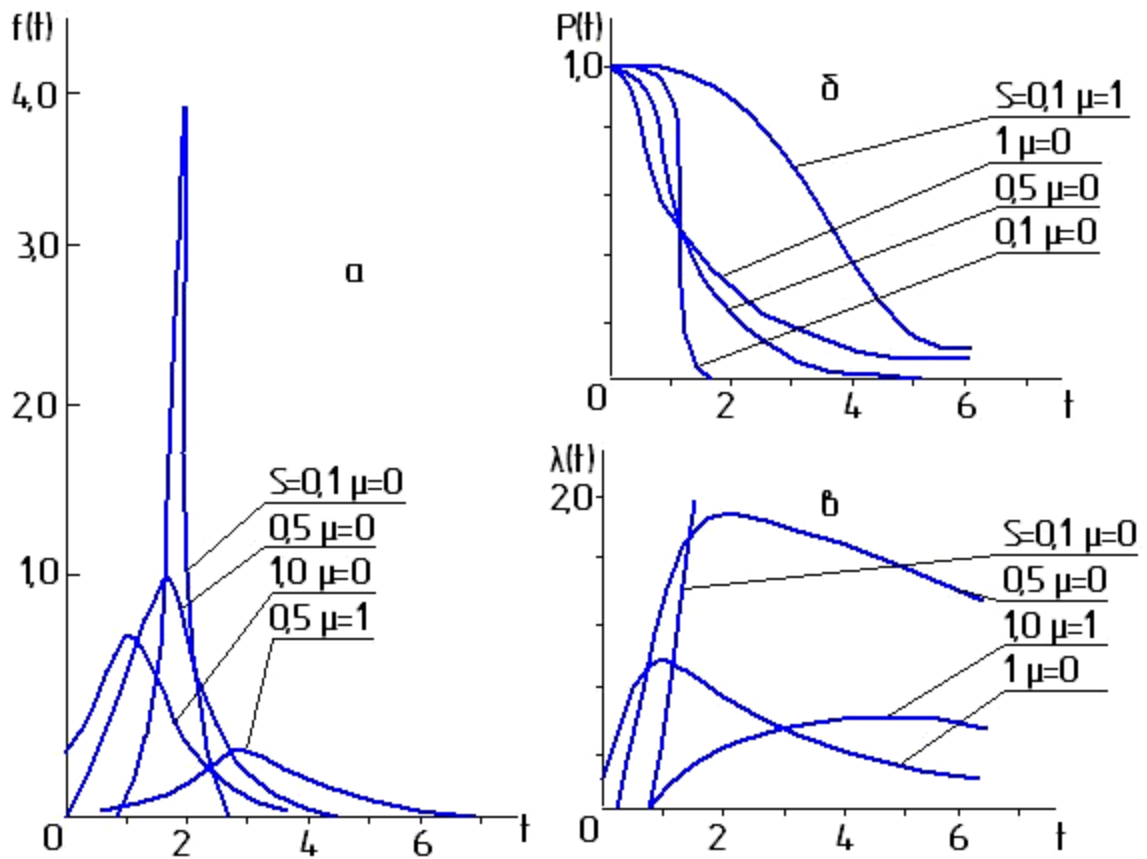


Рис.4.6 Основні характеристики логарифмічно нормального розподілу: а – густина імовірності $f(t)$; б – імовірність безвідмовної роботи $P(t)$; в – інтенсивність відмов $\lambda(t)$

Математичне сподівання:

$$m_t = t_0 \cdot e^{2,651S^2} \quad (4.26)$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$S_t = m_t \sqrt{\left(\frac{m_t}{t_0}\right)^2 - 1} \quad (4.27)$$

коефіцієнт варіації:

$$V_t = \sqrt{\left(\frac{m_t}{t_0}\right)^2 - 1} \quad (4.28)$$

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

$$f(t) = \frac{1}{S(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S_t^2}} \quad (4.29)$$

Імовірність безвідмовної роботи знаходять за допомогою спеціальних таблиць для цього розподілу або таблиць для нормального розподілу(див. табл.4.2) з урахуванням того, що квантиль розраховують за формулою:

$$U_p = (\ln t - \mu) / S \quad (4.30)$$

4.2.1.3. Розподіл Пуассона

У дослідженнях потоків відмов технічних об'єктів деяких харчових і переробних підприємств за, наприклад, тижневі чи ододенні інтервали часу для опису їх закономірностей застосовують закон Пуассона, функція якого визначає імовірність виникнення n -ї кількості відмов($n=0, 1, 2, \dots$):

$$P_n(t) = [(\omega t)^n / n!] \cdot e^{-\omega t} \quad (4.31)$$

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

$$P_n = (a^n / n!) e^{-a} \quad (4.32)$$

Графічно закон Пуассона зображується ламаними кривими, оскільки випадкові величини(у даному разі це відмови об'єктів) є дискретними (рис.4.7).

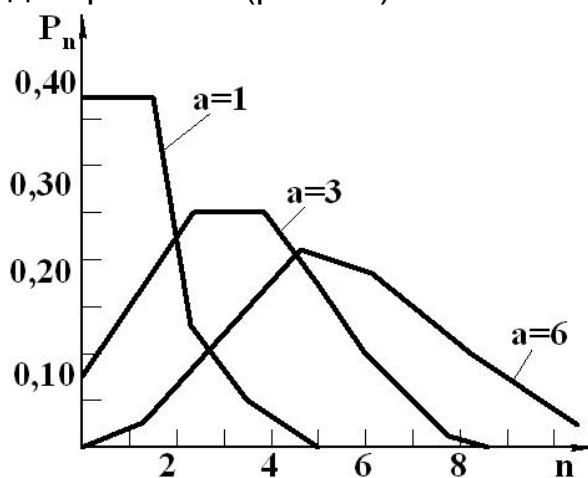


Рис.4.7. Розподіли імовірностей виникнення відмов об'єктів з різними середніми інтенсивностями згідно із законом Пуассона

4.2.1.4. Гамма-розподіл

Густина гамма-розподілу

$$f(t) = \frac{\lambda_0^r}{\Gamma(r)} t^{r-1} \exp(-\lambda_0 t) \quad (4.33)$$

де $\Gamma(r) = \int_0^{\infty} t^{r-1} e^{-t} dt$ - гамма-функція (табл. Д2.2, додаток 2); 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:

$$\Gamma(r) = (r-1)!; f(t) = \lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{r-1}}{(r-1)!} \exp(-\lambda_0 t); \quad (4.34)$$

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t) \sum_{i=1}^{r-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}; \quad (4.35)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{r-1}}{(r-1)! \sum_{i=0}^{r-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}} \quad (4.36)$$

Математичне сподівання наробітку до відмови:

$$m_t = r/\lambda_0, \quad (4.37)$$

Дисперсія:

$$D_t = S_t^2 = r/\lambda_0^2. \quad (4.38)$$

Графіки гамма-розподілу наведені на рис. 4.8. При великих r гамма-розподіл наближається до нормального розподілу з параметрами: $m_{t_0} = r m_t$; $S_{t_0}^2 = r S_t^2$.

Параметром розподілу є λ_0 , отже гамма-розподіл є однопараметричним. Параметр r характеризує асиметрію та ексцес гамма-розподілу. Його значення суттєво впливає (рис. 4.8) 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).

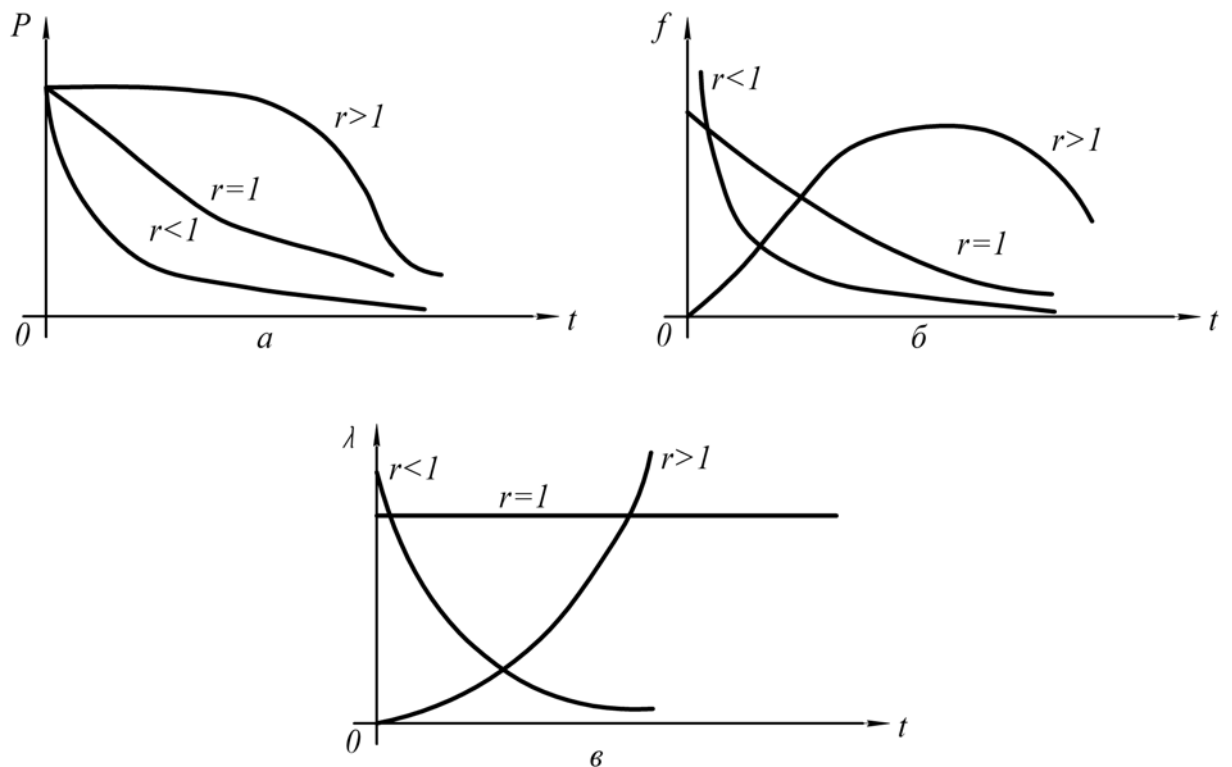


Рис. 4.8. Графіки гамма-розподілу: а - функції надійності; б - криві розподілу наробітку до появи відмов; в - інтенсивності відмов

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.

4.2.1.5. Розподіл Вейбулла

Цей розподіл характеризується такими функціями (рис. 4.9):

- імовірністю безвідмовної роботи $P(t) = e^{-t^m/t_0}$; (4.39)

- інтенсивністю відмов $\lambda(t) = (m/t_0) \cdot t^{m-1}$ (4.40)

- густиною розподілу $f(t) = \frac{m}{t_0} \cdot t^{m-1} \cdot e^{-t^m/t_0}$; (4.41)

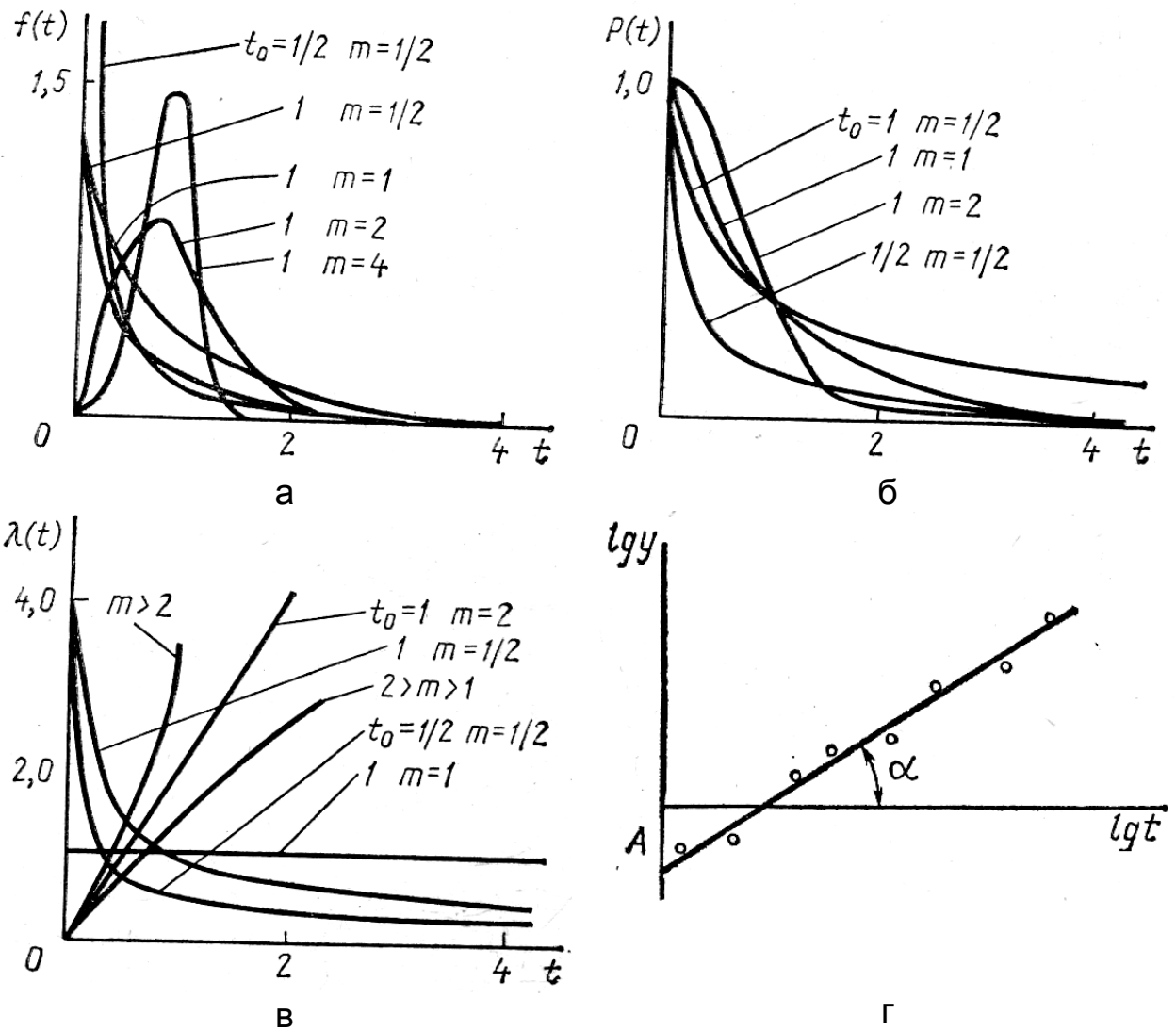


Рис. 4.9. Характеристики розподілу Вейбулла: а – густина розподілу; б – функція надійності; в – інтенсивність відмов; г – графічне визначення параметрів розподілу

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:

$$m_t = b_m \cdot t_0^{1/m}; \quad S_t = c_m \cdot t_0^{1/m} \quad (4.42)$$

де b_m і c_m - коефіцієнти (див. табл. 4.2).

Якщо на протязі певного часу t' відмови не відбуваються, то формула для визначення імовірності безвідмовної роботи визначається за формулою:

$$P(t) = e^{-(t-t')^m/t_0}$$

Іноді характеристики розподілу Вейбулла записуються з використанням інших позначень. Наприклад, імовірність безвідмовної роботи може бути подана так:

$$P(t) = e^{-(t/a)^b}$$

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 $\lambda(t) = \text{const}$ 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 $\lg P(t) = -t^m/t_0$ 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 $m = \text{tg} \alpha$; $\lg t_0 = A - 0,362$, 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 підйимально-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. $P(t) = e^{-t^m/t_0} = e^{-10^{4 \cdot 1,5}/10^7} = 0,905$.

4.2.1.6. Експоненційний розподіл

Для експоненційного закону (рис. 4.10) постійною величиною є інтенсивність відмов, тобто:

$$\lambda(t) = \lambda = const \quad (4.43)$$

$$\lambda = 1/m_t, \quad (4.44)$$

де - m_t - математичне сподівання наробітку до відмови, що визначається на підставі обробки результатів спостережень чи випробувань:

$$m_t \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i, \quad (4.45)$$

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:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t} \quad (4.46)$$

Для $\lambda t \leq 0,1$ формула імовірності безвідмовної роботи спрощується за рахунок розкладення в ряд та врахування тільки значимих його членів:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t \quad (4.47)$$

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, одержимо:

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} \quad (4.48)$$

Густина розподілу випадкових наробітків визначається так:

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4.49)$$

Залежність імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ від $\lambda(t)t \approx t/m_t$ подано у табл.

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).

Наніши експериментальні дані в координатах t та $-\lg P(t) < 1$, можна розв'язувати задачі графічно (рис.4.11). 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 зносів чи за рахунок старіння.

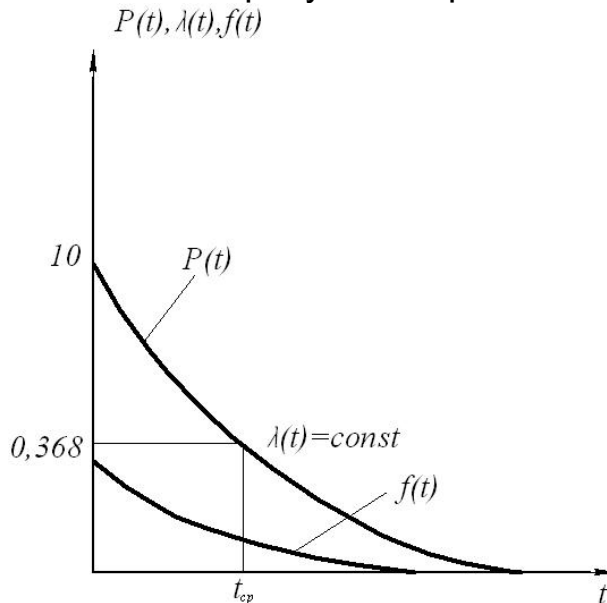


Рис. 4.10 Характеристики експоненційного розподілу

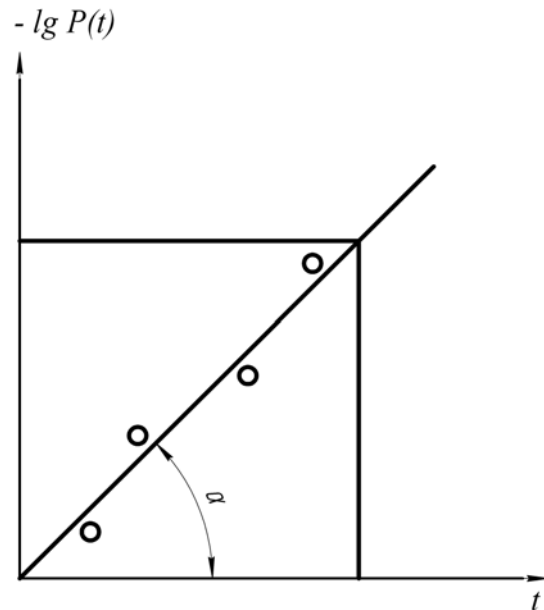


Рис. 4.11 Схема графічного розв'язування задач

Приклад. Визначити імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ механізму на протязі $t=10^4$ 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. 4.3. Треба визначити статистичний закон надійності: $\lambda^*(t)$, $P^*(t)$ та m_t^* .

Таблиця 4.4

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:

$$\lambda^*(t) = \frac{f^*(t)}{p^*(t)} = \frac{n(t - \Delta t / 2, t + \Delta t / 2)}{N \cdot \Delta t} \frac{N}{N - n(t)} = \frac{n(t - \Delta t / 2, t + \Delta t / 2)}{\Delta t(N - n(t))} = \frac{n(t - \Delta t / 2, t + \Delta t / 2)}{\Delta t N_c},$$

де n -кількість відмов в заданому інтервалі часу; N_c -середня кількість працездатних об'єктів в інтервалі часу Δt .

Тоді отримаємо:

$$\lambda^*(5) = \frac{10}{\frac{(100+90)}{2} \cdot 10} = 1,05 \cdot 10^{-2} \quad 1/\text{год};$$

$$\lambda^*(15) = \frac{9}{\frac{(100+81)}{2} \cdot 10} = 1,05 \cdot 10^{-2} \quad 1/\text{год}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\lambda^*(5) = \frac{3}{\frac{(31+28)}{2} \cdot 10} = 1,02 \cdot 10^{-2} \quad 1/\text{год}$$

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 $\lambda = const$, що відповідає експоненційному закону розподілу. Тоді згідно з (4.43; 4.46; 4.49) матимемо такі показники надійності:

$$P(t) = e^{-1.09 \cdot 10^{-2} t}; \quad f(t) = 1.09 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1.09 \cdot 10^{-2} t}; \quad m_t = \frac{1}{1.09 \cdot 10^{-2}} \approx 92.$$

4.2.1.7. 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

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i f_i(t) \quad (4.51)$$

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:

$$f(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (4.52)$$

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:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}; \quad (4.53)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}}. \quad (4.54)$$

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:

$$\lambda(t) \cong \frac{c_1 \lambda_1 \cdot 1 + c_2 \lambda_2 \cdot 1}{c_1 \cdot 1 + c_2 \cdot 1} \cong c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2, \quad c_1 + c_2 = 1. \quad (4.55)$$

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. 4.12. 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 $\nu < 1$.

У загальному випадку для суперпозиції розподілів математичне сподівання наробітку до відмови визначиться так:

$$m_t = \sum_{i=1}^n c_i m_{ti} \quad (4.56)$$

Вплив поступових відмов, наприклад, міг би бути врахований суперпозицією експоненційного та зрізаного нормального законів розподілу. Тоді частота відмов мала б вигляд:

$$f(t) = c_1 \lambda e^{-\lambda t} + c_2 \left[\frac{-(t - m_t)^2}{2S_t^2} \right]_{S_t \sqrt{2\pi}}, \quad (4.57)$$

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. 4.13.

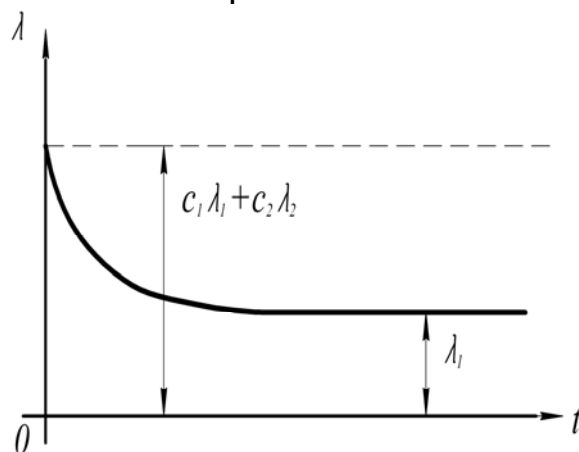


Рис. 4.12. Залежність $\lambda(t)$ для двох об'єднаних експоненційних законів

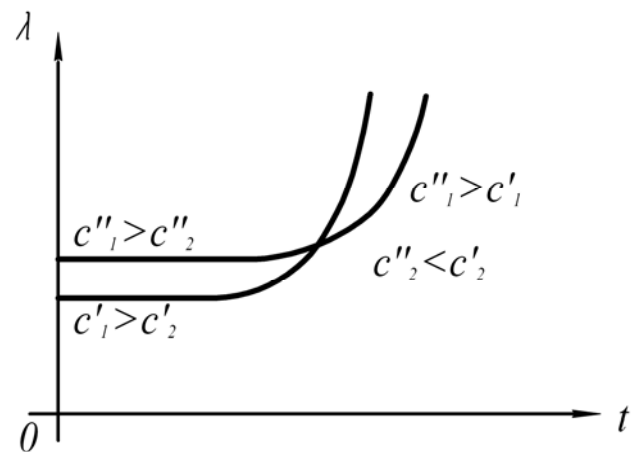


Рис. 4.13. Залежність $\lambda(t)$ для об'єднаних експоненційного та зрізаного нормального законів

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.

4.2.2. Імовірісно-фізичні моделі відмов

Крім описаних вище суто імовірнісних моделей відмов, ДСТУ 3433-96(ГОСТ 27.05-7) передбачає застосування імовірісно-фізичних моделей надійності, в яких фізичні процеси деградації об'єктів апроксимуються α , DM і DN розподілами.

Імовірісно-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.

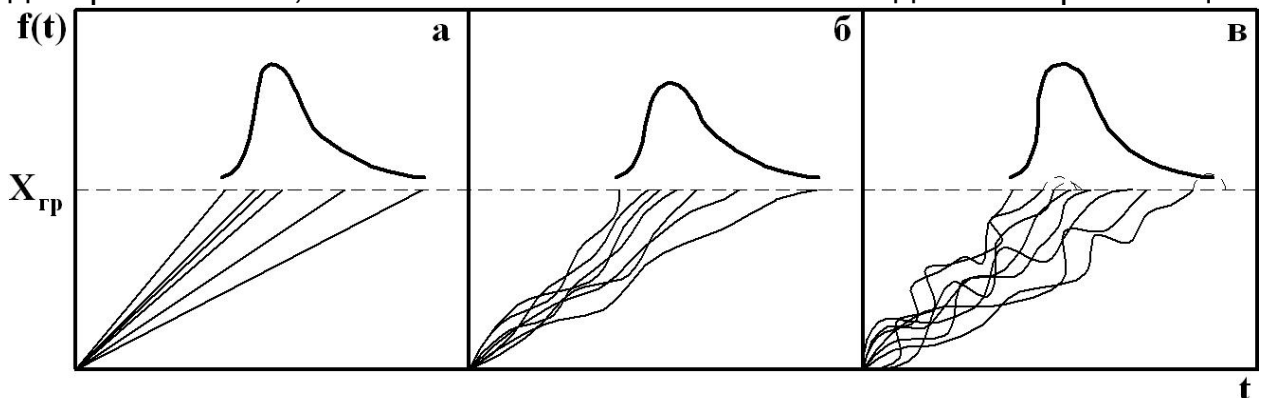


Рис. 4.14 – моделі випадкових процесів деградації і схеми формування розподілу наробітку до відмови: а - віяловий процес (α -розподіл); б - марковський монотонний процес (DM-розподіл); в - марковський немонотонний процес (DN-розподіл)

4.2.2.1 α -розподіл

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим віяловим процесом типу моделі а (рис. 4.14), то у такому випадку розподіл відмов буде апроксимуватися α -розподілом. Віяловий процес, який розглядається, являє собою ідеалізацію процесів б і в (рис. 4.14) 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 імовірно-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 4.5.

Таблиця 4.5

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

4.2.2.2. 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. 4.6.

Таблиця 4.6

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 $DM(x; \frac{1}{\mu}; v)$;

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

4.2.2.3 DN -розподіл

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим процесом з немонотонними реалізаціями (див. модель ν , 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 $\nu^2 \rightarrow 0$) 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 $(2\nu^2 \mu)^{-1}$;

Основні характеристики DN -розподілу наведено у таблиці 4.7

Таблиця 4.7

Характеристики DN -розподілу*

Характеристика DM -розподілу	Розрахункова формула
Густина імовірності	$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{\nu t \sqrt{2\pi t}} \exp \left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\nu^2 \mu t} \right]$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = DM(t; \mu; \nu) = \Phi \left(\frac{t - \mu}{\nu \sqrt{\mu t}} \right) + e^{2\nu^{-2}} \cdot \Phi \left(-\frac{t + \mu}{\nu \sqrt{\mu t}} \right)$
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi \left(\frac{\mu - t}{\nu \sqrt{\mu t}} \right) - e^{2\nu^{-2}} \cdot \Phi \left(-\frac{\mu + t}{\nu \sqrt{\mu t}} \right)$
Математичне сподівання	$M(t) = \mu$
Дисперсія	$D(t) = \mu^2 \nu^2$

Коефіцієнт варіації	$V(t) = \nu$
Коефіцієнт асиметрії	$A_s = 3\nu$
Коефіцієнт ексцесу	$E_k = 15\nu^2$

* У таблиці прийняті такі позначення: μ -параметр масштабу; ν -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.

4.2.3 Оцінка фізичності моделей відмов

Суто імовірнісні моделі (розподіли: експоненційний, логарифмічно нормальний, нормальний, Вейбулла) не пов'язані з фізичними явищами, які спричиняють формування розподілу відмов, тобто ці моделі не мають фізичного обґрунтування. Це витікає навіть із самої їхньої назви.

Імовірнісно-фізичні моделі (DM -, DN -, α -розподіли) спеціально побудовані для описування відмов об'єктів на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які спричиняють відмови і, на відміну від імовірнісних моделей, є фізично обґрунтованими моделями, які ураховують фізичну природу відмов та дозволяють використовувати характеристики фізичних явищ, які проявляються в об'єкті, для оцінки його надійності.

Моделі фізичних процесів деградації у вигляді марковських процесів, що будуються на підґрунті дифузійних розподілів, адекватніші порівняно з ідеалізованим віяловим процесом, який ґрунтується на α -розподілі. Вони відображають не тільки початковий стан (якість вироблення об'єктів), але й залежать від зовнішніх дій та умов навантаження, а також від механо-фізико-хімічних процесів, що відбуваються в об'єктах з перебігом часу (під час наробітку).

4.2.4. Оцінка адекватності моделей відмов

Оцінку відповідності теоретичного дослідного розподілу проводять з використанням статистичних критеріїв згідності за правилами ДСТУ

3433-96. Відомо, що згідно з статистичними критеріями експериментальні розподіли відмов часто вдається досить добре апроксимувати багатьма двохпараметричними функціями розподілу. Але, якщо далі необхідно оцінити, наприклад, гамма-відсотковий ресурс, то розбіжність за різних законів розподілу може складати декілька порядків. У зв'язку з цим функція розподілу, яка задовольняє критеріям згідності і точніше апроксимує хвости розподілів, є адекватнішою моделлю відмов.

Із конкуруючих моделей дифузійні розподіли володіють найкращою гнучкістю та здатністю описувати дослідні розподіли відмов і, отже, є адекватнішими моделями відмов.

З метою визначення кількісних характеристик розподілу випадкових величин (наробітків технічних об'єктів на відмови, ресурсів чи термінів служби, тривалостей інтервалів між відмовами, тривалостей обслуговування чи ремонту тощо) застосовують відповідну методику опрацювання зібраних масивів експериментальних даних чи даних спостережень. Ця методика передбачає в цілому (разом із узгодженням експериментальних розподілів з теоретичним імовірнісним законом) виконання наступних математико-статистичних процедур:

- За масивами дослідних даних складаються (будуються) варіаційні та статистичні ряди;
- За результатами розрахунків частот (частот) у статистичних рядах будуються полігони чи гістограми розподілів досліджуваних випадкових величин;
- За допомогою статистичних рядів розраховуються кількісні характеристики розподілів експериментальних даних;
- За отриманими графіками і даними розрахунків висувається гіпотеза про підпорядкування емпіричного розподілу якомусь теоретичному імовірнісному закону;
- Використовуючи відповідний критерій згоди (розрахунковий чи графічний), оцінюють ступінь розходження між емпіричним та теоретичним законами розподілу випадкових величин.

Перевірка узгодженості запропонованого теоретичного розподілу випадкових величин проводиться при апроксимації статистичних даних про наробіток до відмови прийнятим законом розподілу і при статистичних контрольних випробуваннях. Для цього висуваються дві альтернативні гіпотези відносно виду розподілу або невідомих значень параметрів розподілу при контрольних випробуваннях. Перевірка гіпотези полягає в тому, що за результатами випробувань вибірки об'єктів гіпотеза вважається правдоподібною або відхиляється. Найпоширенішим у практиці узгодження статистичних (емпіричних) розподілів з теоретичними законами вважається критерій згоди χ^2 – квадрат Пірсона (див. додатки 3,4).

При застосуванні критерію згоди **Пірсона** (критерію χ^2 – квадрат) визначають міру розходження:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^s \frac{(n_i - N_B P_i)^2}{N_B P_i}; \quad (4.58)$$

де S – кількість інтервалів статистичного ряду; n_i – кількість відмов на i -му інтервалі; P_i – імовірність попадання випадкової величини (наробітку до відмови) в i -й інтервал, визначена для теоретичного розподілу; N_B – кількість випробуваних об'єктів (випробувань).

Для застосування критерію Пірсона необхідно виконати наступні умови:

$$N_B \geq 50 \div 60; n \geq 6 \div 8.$$

Розподіл χ^2 залежить від кількості ступенів вільності:

$$K = s - l - 1 \quad (4.59)$$

де s – кількість інтервалів статичного ряду; l – кількість параметрів теоретичного розподілу.

З таблиць (додаток 3,4) для кожного значення χ^2 і K можна знайти імовірність P того, що внаслідок випадкових причин міра розходження теоретичного і експериментального розподілів буде меншою, ніж фактичне значення χ^2 .

Якщо $P > 0$, вважають, що теоретичний розподіл не суперечить експериментальним даним. Якщо ж $P < 0$, то для інженерних потреб висунута гіпотеза є неспроможною.

Процедури узгодження експериментальних розподілів випадкових величин з теоретичними законами можна виконувати й за іншими критеріями.

4.2.5. Аналіз можливостей розрахунку надійності за моделями відмов

Найпоширенішою моделлю відмов, використовуваною під час розрахунку надійності систем, є однопараметричний експоненційний розподіл. На підставі експоненційного розподілу проводять розрахунки надійності тільки ненадлишкових (нерезервованих і резервованих) об'єктів. Методів розрахунку надійності на підставі логарифмічно нормального та α -розподілів майже немає.

Найбільшими можливостями для розрахунку надійності систем володіють дифузійні розподіли. На підставі дифузійних розподілів розроблені методи, які дозволяють розраховувати показники надійності як невідновлюваних (нерезервованих і резервованих) об'єктів і систем, так і відновлюваних.

4.2.6. Оцінка універсальності моделей відмов

У таблиці 4.8 наведені типові завдання надійності, вирішувані з використанням моделей відмов. Серед розглянутих розподілів DN -

розподіл є єдиною моделлю, яка дозволяє вирішувати всі перелічені завдання надійності. Трохи вужчим є спектр завдань на підставі *DM*- та експоненційного розподілів. Найменше число завдань може бути виконане на підставі логарифмічно нормального та α -розподілів.

Таблиця 4.8

Завдання надійності, вирішувальні за моделями відмов*

Завдання надійності	Моделі відмов					
	DN	DM	E	W	LN	A
1. Розрахунок коефіцієнта готовності	+	+	+	-	-	-
2. Розрахунок коефіцієнта оперативної готовності	+	+	+	-	-	-
3. Розрахунок показників надійності (середнього і гамма-відсоткового ресурсу, імовірності безвідмовної роботи) механічних елементів на підставі характеристик міцності і навантаження	+	+	-	-	+	-
4. Розрахунок безвідмовності невідновлюваних і нерезервованих механічних систем	+	+	-	+	-	-
5. Розрахунок безвідмовності невідновлюваних і резервованих механічних систем	+	+	-	+	-	-
6. Розрахунок безвідмовності відновлюваних і нерезервованих механічних систем	+	-	-	-	-	-
7. Розрахунок безвідмовності відновлюваних і резервованих механічних систем	+	-	-	-	-	-
8. Розрахунок довговічності механічних систем	+	+	-	-	-	-
9. Розрахунок норми запасних частин механічних систем	+	+	+	+	+	+
10. Планування визначальних випробувань						
11. Планування контролю середніх показників надійності	+	+	+	+	+	+
12. Планування контролю гамма-відсоткових показників надійності	+	+	+	+	+	-
13. Планування контролю імовірності безвідмовної роботи	+	+	+	+	+	-
14. Планування контролю коефіцієнта готовності	+	+	+	-	-	-
15. Планування прискорених (форсованих) випробувань на надійність	+	+	-	-	-	+
16. Оцінка показників надійності з урахуванням апіорної інформації за результатами випробувань одиничних зразків	+	+	-	-	-	+
17. Оцінка показників надійності (параметричної надійності) об'єктів в умовах відсутності відмов	+	+	-	-	-	+

* У таблиці прийняті такі позначення: DN-дифузійний немонотонний розподіл; DM-дифузійний розподіл; E-експоненційний розподіл; W-розподіл Вейбулла; LN-логарифмічно-нормальний розподіл; A- α -розподіл;

„+” - рішення завдання можливе на підставі зазначеної моделі відмов;

„-” - рішення цього завдання на підставі зазначеної моделі неможливе.

4.2.7 Оцінка практичної придатності моделей відмов

Найпростішими є експоненційний та нормальний розподіли, а найскладнішими із рекомендованих моделей є α -розподіл та розподіл Вейбулла. Функції логарифмічно нормального і дифузійних розподілів достатньо прості, цілком відповідають вимогам інженерної практики і описуються, як і нормальний розподіл, через табульовану функцію Лапласа.

Порівняльний аналіз моделей відмов показує, що за всіма вимогами (фізичністю, адекватністю, можливістю розрахунку надійності, універсальністю та практичністю), які висуваються до моделей відмов, дифузійні розподіли мають перевагу перед рештою розподілів (Вейбулла, логарифмічно нормальним, експоненційним, α -розподілом). Разом з тим, у кожному конкретному випадку потрібно приймати рішення про застосування того чи іншого розподілу випадкових величин або їх суперпозиції, якщо процес втрати працездатності на різних часових відрізках роботи об'єкта описується різними законами надійності.

4.2.8. Вибір функцій розподілу для визначення показників надійності

ДСТУ 2862-94 „Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності” установлює загальні вимоги і положення щодо розрахунку одиничних показників безвідмовності (середнього наробітку до відмови, гамма-відсоткового наробітку до відмови, імовірності безвідмовної роботи, інтенсивності відмов, середнього наробітку на відмову, параметра потоку відмов), довговічності (середнього ресурсу, гамма-відсоткового ресурсу, середнього терміну служби, гамма-відсоткового терміну служби), ремонтпридатності (середньої тривалості відновлення), збережуваності (середнього терміну збережуваності) та комплексних показників (коефіцієнта готовності, коефіцієнта оперативної готовності та коефіцієнта технічного використання).

Для тих чи інших об'єктів і умов їх деградації і старіння у ДСТУ 2862-94 рекомендуються різні функції розподілу наробітку (ресурсу). Все залежить від того, наскільки адекватно функція описує фізичний процес зношування, втоми, корозії, старіння в різних умовах експлуатації (табл.4.9)

Таблиця 4.9.

Вибір функції розподілу наробітку (ресурсу)

Вид функції	Рекомендоване застосування
1. Експоненційний розподіл	Для складних технічних систем і електрорадіовиробів, що не піддаються старінню та зношуванню
2. ДМ-розподіл (дифузійний монотонний)	Для механічних систем, деталей машин і приладів, переважаючим механізмом відмов яких є необоротні процеси зношування, втоми і корозії
3. ДН - розподіл (дифузійний)	Для електрорадіовиробів, електронних систем, а також технічних систем, що містять електрорадіовироби та

немонотонний)	механічні елементи, переважаючим механізмом відмов яких є процеси старіння, різноманітні електропроцеси, а також процеси втоми
4. Логарифмічно нормальний розподіл	У випадку, коли основним видом руйнування є втома, зумовлена процесами періодичних навантажень
5. Розподіл Вейбулла	Для апроксимації розподілів наробітку об'єктів, які не відповідають п.п.1- 4
Примітка. Експоненційний розподіл, як однопараметрична функція, є грубою моделлю для опису розподілу наробітків, а тому його рекомендується використовувати для порівняльних оцінок показників надійності	

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Дайте визначення поняття «відмова».
2. Як характеризуються за швидкістю проходження процеси, які призводять до відмов виробів?
3. Як класифікуються відмови по впливу та стану технічного об'єкта?
4. У чому різниця між відмовами систематичними і випадковими?
5. Які визначальні періоди в експлуатації виробів за характером розвитку процесів їх проявлення та складністю наслідків?
6. Які визначальні періоди в експлуатації виробів розрізняють за інтенсивністю відмов?
7. Які прямі і побічні втрати від наслідків відмов, характерні для харчових і переробних підприємств?
8. Чим відрізняються статистичні та імовірно-фізичні моделі відмов?
9. Які моделі відмов відносяться до імовірнісних?
10. Які моделі відмов відносяться до імовірно-фізичних?
11. Як пов'язана між собою густина розподілу відмов та безвідмовність виробів?
12. Які області застосування функцій частоти відмов $F(t)$, інтенсивність відмов $\lambda(t)$ і параметру потоку відмов $\omega(t)$ в теорії надійності?
13. Який фізичний смисл квантилей розподілу випадкових величин?
14. У яких випадках моделі відмов описуються імовірнісними законами надійності нормальним, логарифмічно нормальним, гамма, Пуассона, Вейбула, експоненційним)?
15. Які переваги у застосуванні об'єднаних розподілів при оцінці надійності?
16. Які переваги при застосуванні імовірно-фізичних розподілів відмов (λ, DM, DN) у відповідності з ГОСТ 3433-96?
17. Які основні вимоги до функцій розподілу випадкових величин, що використовуються як моделі відмов?
18. Які завдання надійності вирішуються з використанням DM і DN -розподілів відмов?
19. Які завдання надійності вирішуються з застосуванням експоненційного розподілу відмов?

[перейти до змісту](#)

5. Надійність технічних систем

5.1. Поняття 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 **технологічна система**. Це 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 якій вихід з ладу хоча б однієї підсистеми 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, використовувану 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 – 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 крім 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.

5.2. Резервування систем

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 високнадійних 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.

Почасове 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 почасове резервування, яке забезпечує безперервність технологічного процесу, здійснюється завдяки введенню резервних технологічних ліній, акумуляторних ємностей, складів сировини та напівфабрикатів. Почасове 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.

5.3. 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).

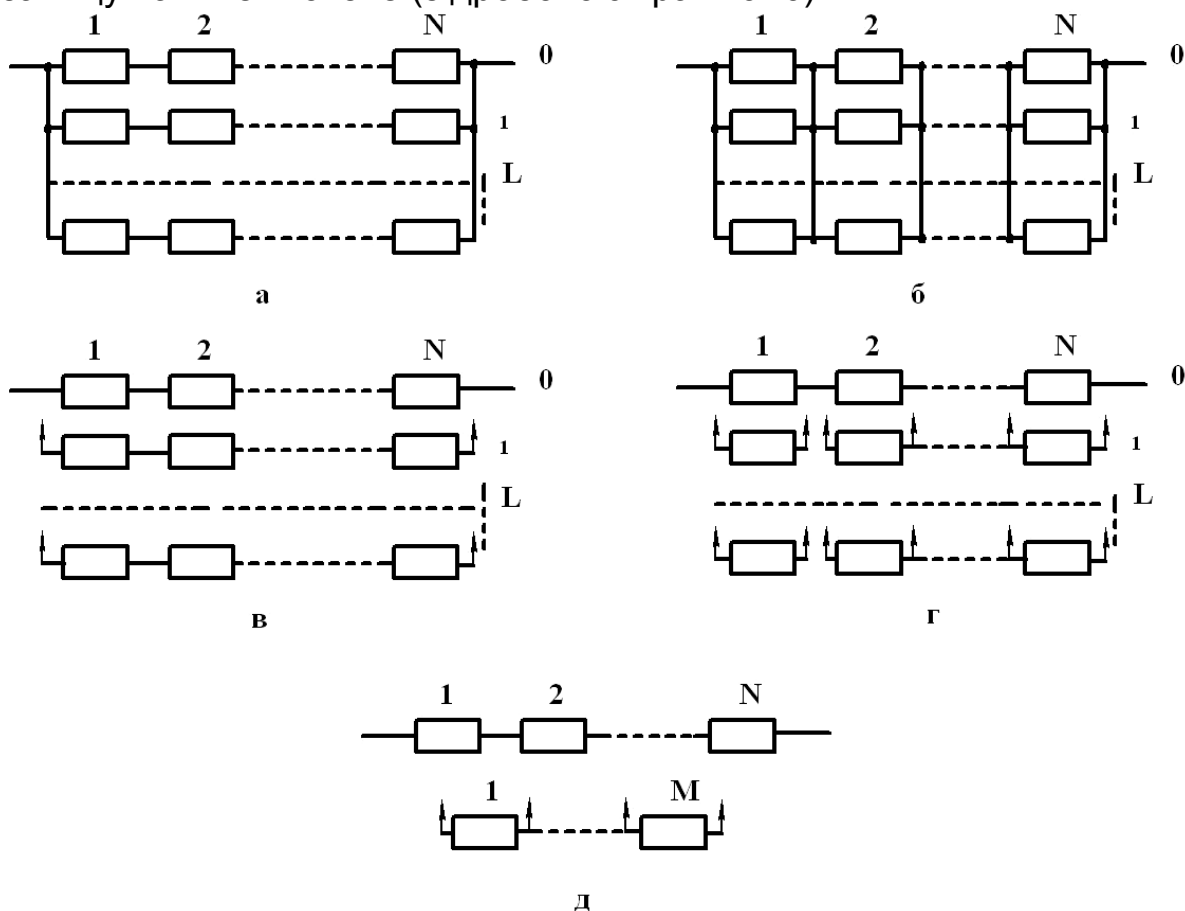


Рис. 5.1. Схема резервування: а - загального постійного; б - поелементного постійного; в – загального заміщувального; г – поелементного заміщувального; д – ковзного.

При постійному резервуванні (рис. 5.1, 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. 5.1, в, г) у випадку відмови основного елемента вмикається резервний, а тому такий вид резервування називають **активним**.

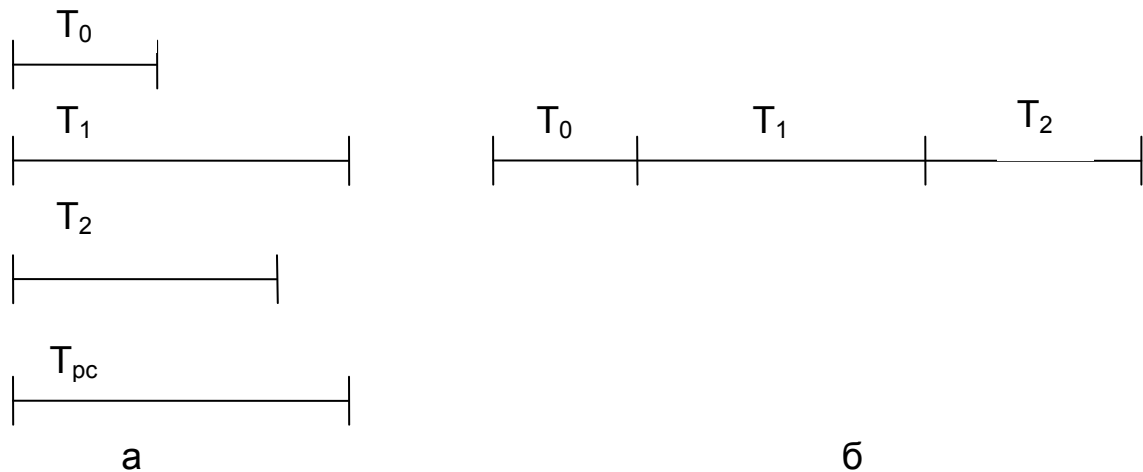
Ковзне резервування (рис. 5.1, д) - окремий вид заміщувального застосовується, коли до складу системи входять однотипні елементи. Тоді група основних елементів може мати один або декілька резервних.

В залежності від режиму роботи резервних елементів розрізняють такі їх види:

- **навантажений (теплій)**, 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. 5.2 відрізки прямих зображують можливі наробітки основного T_0 і двох резервних T_1 і T_2 пристроїв. Очевидно, що при ненавантаженому резервуванні (рис. 5.2, б) наробіток завжди більший, ніж при навантаженому резерві, а тому, за інших рівних умов ненавантажений резерв дає більший вигаш в надійності, ніж навантажених.

Рис. 5.2 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. 5.1, а, б настає лише тоді, коли відмовляють усі $L+1$ систем. Відмова резервованих систем, поданих на рис. 5.1, б, г, настає після відмови $L+1$ елементів, що належать до однієї з N резервних груп. Відмова системи при ковзаному резервуванні (рис. 5.1, 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. 5.1 г).

5.4. Кратність резервування

Співвідношення між кількістю резервних і основних елементів називається **кратністю резервування**:

$$k = (n - r) / r, \quad (5.1)$$

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 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:

$$B_m = T_p/T; B_p = P_p/P; B_Q = Q/Q_p, \quad (5.2)$$

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.

5.5. Математична оцінка надійності систем

Технічні і технологічні системи з огляду на їх надійність є складними комплексами, скомпонованими в найрізноманітніших комбінаціях з окремих підсистем та елементів, що відрізняються між собою важливістю показників надійності і їх рівнем, Тому задачі визначення показників надійності таких систем багатоваріантні, але в їх розв'язанні можна виділити 2 основних принципи:

1. Будується структурна схема надійності системи і визначаються показники її надійності з врахуванням впливу на ці показники всіх, без винятку, елементів системи, тобто здійснюється повне визначення надійності;

2. Будується структурна схема надійності системи і, по завчасно заданому критичному рівню показників надійності елементів, виділяються ті з них, що мають низьку надійність, яка є визначальною для системи в цілому. Надійність системи обчислюється по надійності цих елементів, тобто розраховується надійність системи за визначальними елементами.

Системи можуть складатися з елементів, які діють послідовно (послідовна система) і з елементів, що діють паралельно (паралельна система, або система з резервуванням). Комбіновані системи можуть мати ділянки з послідовною та паралельною дією елементів.

5.5.1. Надійність послідовних систем

Послідовні системи у техніці складають більшість. Прикладом такої системи може бути привід будь-якого засобу механізації: (рис. 5.3.)



Рис. 5.3. Привід 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:

$$P(t) = P_1(t) \cdot \dots \cdot P_2(t) \cdot P_i(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) \quad (5.3)$$

Якщо імовірність безвідмовної роботи всіх елементів однакова, то:

$$P(t) = P_i^n(t) \quad (5.4)$$

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 визначити її через імовірність відмов, використовуючи методи наближених обчислень:

$$P(t) = [1 - F_1(t)] \cdot [1 - F_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - F_i(t)] \cdot \dots \cdot [1 - F_n(t)] \approx 1 - \sum_{i=1}^n F_i(t), \quad (5.5)$$

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.

$$F_i = 0,01 \text{ і } P(t) = 1 - n \cdot F_i(t) = 1 - 6 \cdot 0,01 = 0,94$$

5.5.2. 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. 5.4). Імовірність відмови всієї системи визначається за теоремою множення імовірностей:

$$F(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_i(t) \cdot \dots \cdot F(t) \cdot \dots \cdot F(t) = \prod_1^n F_i(t), \quad (5.6)$$

де $F_i(t)$ - імовірність відмови i -го елемента.

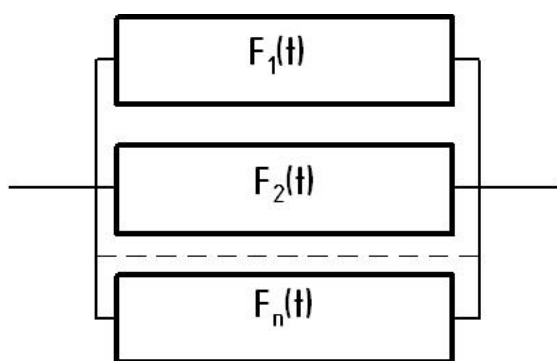


Рис. 5.4 Система з резервуванням

Тоді імовірність безвідмовної роботи системи буде такою:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_1^n F_i(t) \quad (5.7)$$

Якщо елементи системи рівнозначні, то

$$F(t) = F_i^n(t), \text{ а } P(t) = 1 - F_i^n(t) \quad (5.8)$$

Ці залежності у загальному вигляді характеризують гаряче резервування. Наприклад, якщо $P_i(t) = 0,9$ і $n = 2$, тоді

при гарячому резервуванні $P(t) = 1 - F_i^n(t) = 1 - 0,1^2 = 0,99$. 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:

$$F(t) \approx \frac{\prod_{i=1}^n F_i(t)}{n!} \approx \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i \cdot t}{n!} = Q(t) \quad (5.9)$$

Для рівнозначних елементів:

$$F(t) \approx \frac{F_i^n(t)}{n!} \approx \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (5.10)$$

Формули (5.9, 5.10) 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 елемента λ і резервного λ_p та середній тривалості ремонту \bar{t}_p імовірність безвідмовної роботи системи можна розрахувати так:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_0}}, \text{ де } T_0 = \frac{1}{\lambda} \left[1 + \frac{1}{(\lambda + \lambda_p) \cdot \bar{t}_p} \right], \quad (5.11)$$

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.

5.5.3. 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:

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p)}{2!} t; \quad (5.12)$$

при двохкратному: $P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p) \cdot (\lambda + 2\lambda_p)}{3!} t;$ (5.13)

при n-кратному: $P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p) \cdot \dots \cdot (\lambda + n\lambda_p)}{(n+1)!} t$ (5.14)

5.5.4. Надійність комбінованих систем

Такі системи включають ділянки з послідовно і паралельно діючими складовими елементами. Якщо в системі, a елементів не дубльовані і b елементів дубльовані (рис. 5.5), то імовірність безвідмовної роботи системи визначають за формулою:

$$P(t) = P_a(t) \cdot P_b(t), \quad (5.15)$$

де $P_a(t)$ і $P_b(t)$ - відповідно, імовірність безвідмовної роботи ділянок з послідовно, і паралельно діючими елементами.

При послідовному з'єднанні елементів

$$P_a(t) = \prod_{i=1}^a P_i(t) \quad (5.16)$$

Для повного гарячого резервування:

$$P_b(t) = 1 - \prod_{j=1}^b F_j(t) \quad (5.17)$$

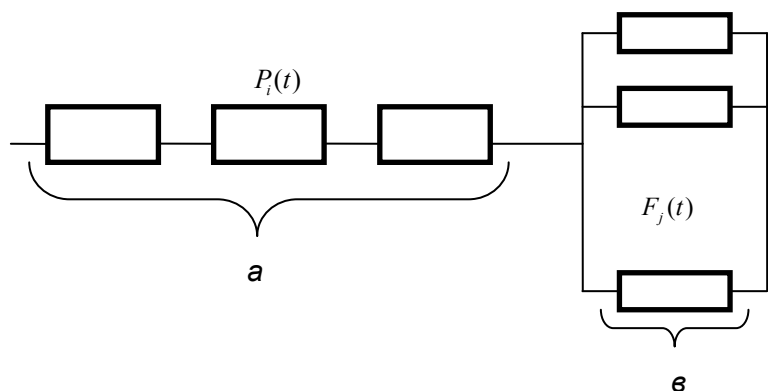


Рис. 5.5 Комбінована система з послідовним і паралельним поєднанням елементів

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 .

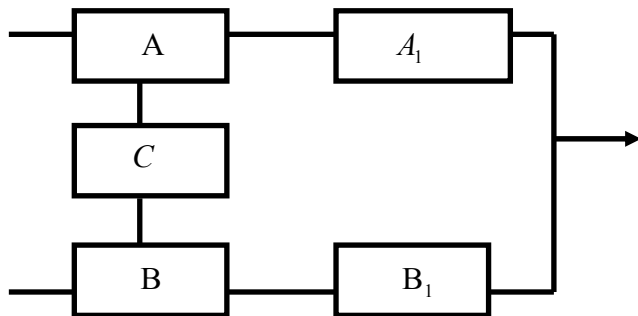


Рис. 5.6 Складна комбінована система

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 :

$$F(C \text{ дієздатний}) = F_{A_1} \cdot F_{B_1} = (1 - P_{A_1}) \cdot (1 - P_{B_1}) \quad (5.18)$$

Імовірність відмови системи при недієздатному резерві C :

$$F(C \text{ недієздатний}) = F_{AA_1} \cdot F_{BB_1} = (1 - P_A \cdot P_{A_1}) \cdot (1 - P_B \cdot P_{B_1}) \quad (5.19)$$

Тоді, у загальному вигляді, імовірність відмови такої складної системи може бути розрахована так:

$$F = (1 - P_{A_1}) \cdot (1 - P_{B_1}) \cdot P_c + (1 - P_A \cdot P_{A_1}) \cdot (1 - P_B \cdot P_{B_1}) \cdot F_c \quad (5.20)$$

Цей метод дозволяє обчислювати надійність комбінованих ділянок, що в складних системах можуть повторюватись багатократно.

5.6. Підвищення надійності складних систем

Сучасні методи проектування, засоби виробництва і матеріали дозволяють виготовляти технічні і технологічні системи з досить високими рівнями надійності. Але, в деяких випадках, ці системи можуть виявитися громіздкими, важкими і дорогими.

Критерієм оптимальної надійності системи може бути або критерій максимальної ефективності, або критерій мінімальної вартості. Але, навіть за наявності такого критерію, вимоги до надійності системи виявляються надто жорсткими, а надійність елементів – надто низькою. Задовольнити ці вимоги можна лише за рахунок спеціальних заходів підвищення надійності системи.

Аналітично порівняти методи підвищення надійності можна тільки тоді, коли відомі їх кількісні характеристики. Наприклад, при

експоненційному законі надійності кількісні характеристики нерезервованої системи визначаються через інтенсивність відмов, а для резервованої системи потрібно знати ще й кратність резервування.

У цьому випадку надійність системи є функцією:

$$\Psi(\lambda, m_{TB}, T, k, \text{вид резерву}), \quad (5.21)$$

де λ - інтенсивність відмов; m_{TB} - математичне сподівання часу відновлення (середній час відновлення) дієздатності; T - сумарний наробіток; k - кратність резервування.

Виходячи з цього, можна запропонувати наступні методи підвищення надійності технічних систем: зменшення інтенсивності відмов, середнього часу відновлення і часу безперервної роботи, а також застосування різних способів резервування.

5.6.1. Способи зменшення інтенсивності відмов

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. Спрощенням системи. Зменшуючи кількість елементів, можна істотно підвищити її надійність (рис. 5.7). Ефект буде тим більшим, чим нижча надійність елементів і чим складніша система.

2. Вибором надійніших елементів. Разом з тим підвищення надійності елемента часто призводить до збільшення маси системи, габаритів і вартості.

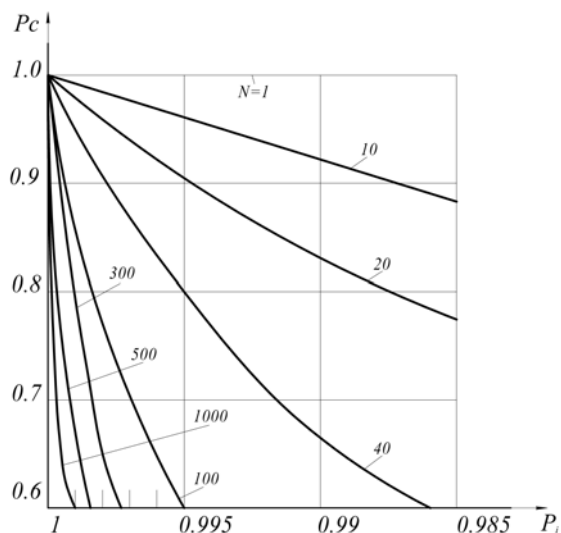


Рис. 5.7. Залежність імовірності безвідмовної роботи системи від кількості елементів N та імовірності їх безвідмовної роботи P_i

3. Полегшенням 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. Відбраковуванням малонадійних елементів за результатами випробувань елементів у важких умовах роботи, які можна погіршити, збільшуючи навантаження або задаючи негативні режими впливу зовнішніх чинників.

5. Створенням 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. Стандартизацією і уніфікацією 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. Удосконаленням технології виробництва та її автоматизацією і роботизацією. Ці заходи дозволяють забезпечити експлуатаційну стабільність характеристик елементів і систем.

8. Статистичним контролем якості, що дозволяє виявити чинники, які погіршують технологію виробництва елементів і систем, вплинути на їх якість і відбракувати непрацездатні.

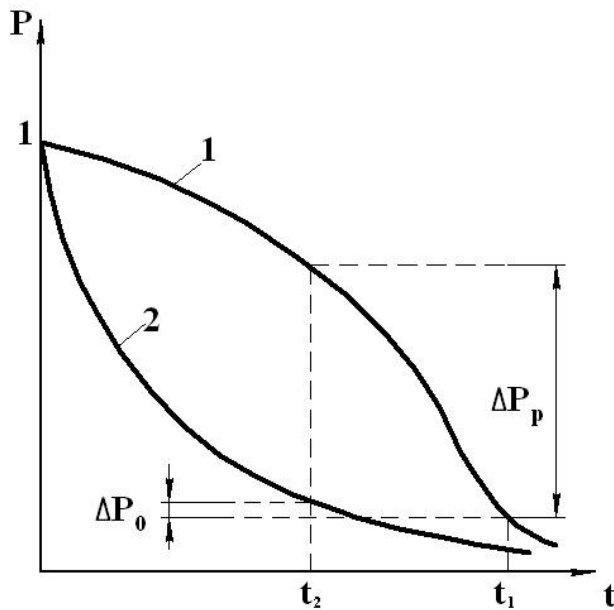
9. Профілактичними заходами, спрямованими на попередження відмов, які передбачають постійний контроль за технологією виробництва систем та їх елементів, а також забезпечення належної експлуатації і вчасного технічного обслуговування.

5.6.2. 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. 5.8).

Рис.5.8.Виграш збільшення імовірності безвідмовної роботи резервованої (1) і нерезервованої (2) систем при скороченні часу безперервної роботи

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 ($\Delta P_p \gg \Delta P_0$).

5.6.3. 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):

$$G_Q(t) = \frac{1 - \exp(-\lambda_c t / C)}{1 - \exp(-\lambda_c t)}, \quad (5.24)$$

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_i} , зі зростанням кратності резервування зростає, але швидкість зростання залежить від способу резервування (рис. 5.10).

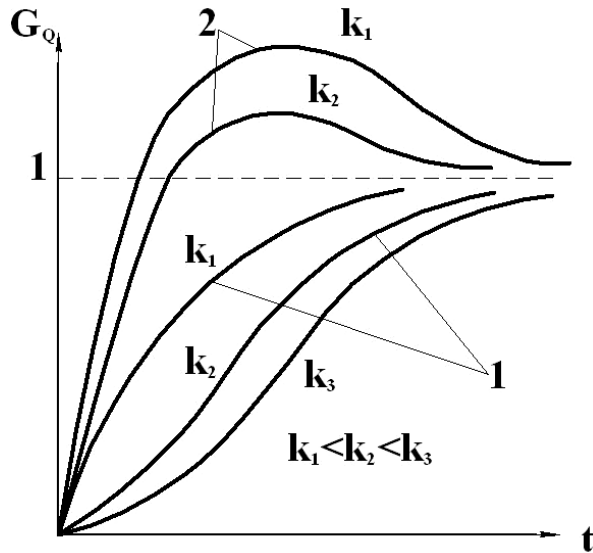


Рис.5.9. Залежність виграшу надійності за імовірністю відмов від часу t_i і кратності резервування: 1- резервування з цілою кратністю; 2- резервування з дробовою кратністю.

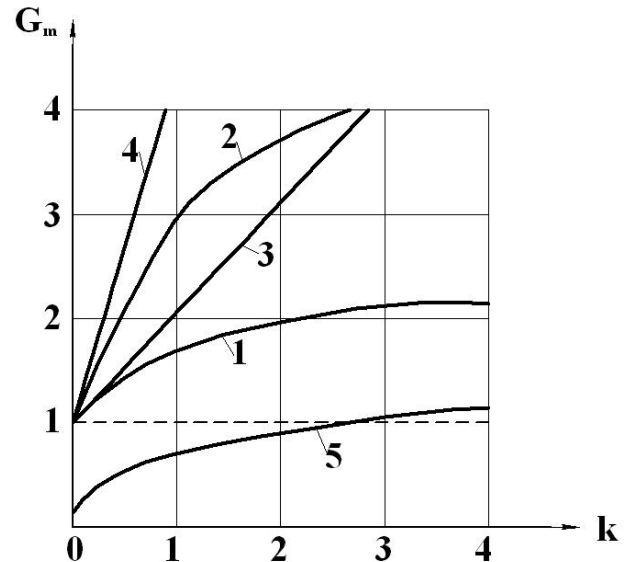


Рис. 5.10. Залежність виграшу надійності за математичним сподіванням часу безвідмовної роботи від кратності і виду резервування: 1- загальне постійне; 2 - поелементне постійне; 3 – загальне змашувальне; 4 – по елементне змашувальне; 5 – з дробовою кратністю

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:

1. Резервування вигідно застосовувати для систем, які розраховані на невеликий термін безперервної роботи;

2. Використання резервування для систем з тривалим часом безперервної роботи у більшості випадків вимагає збільшення його кратності.

3. Надійність систем підвищується при резервуванні на фоні збільшення їх маси, габаритів, вартості та ускладнення умов експлуатації.

5.6.4. 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 експоненційний 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)

$$P_c^*(2000) \cong 1 - tN\lambda_i^*,$$

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:

$$N = \frac{1 - P_c(2000)}{\lambda_i t / \kappa'} = \frac{1 - 0,99}{0,15 \cdot 10^{-4} \cdot 2000} \cong 3.$$

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 висувуються 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:

$$Q_c(t) = \left[1 - \prod_{j=1}^N P^{(j)}(t) \right]^{L+1} = [1 - P_0(t)]^{L+1} \quad (5.22)$$

$$P_c(t) = 1 - [1 - P_0(t)]^{L+1} = 1 - \left[1 - \prod_{j=1}^N P^{(j)}(t) \right]^{L+1}, \quad (5.23)$$

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. Назвіть основну різницю у порядку 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. У яких випадках у розрахунках систем застосовують формулу Бейеса?
7. Назвіть найбільш перспективні способи зменшення інтенсивності відмов технічних систем.
8. Чи можна підвищити надійність об'єктів і систем за рахунок зменшення часу їх безперервної роботи і часу на відновлення дієздатності?
9. Які способи резервування технічних систем є найбільш перспективними для підвищення надійності?
10. У яких випадках взагалі доцільно застосовувати резервування?

[перейти до змісту](#)

6. Випробування на надійність

6.1. Види 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 подавляючій 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 проектувальниками 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 відрізнятись 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 Π за результатами випробувань, прийнятих для оцінки показників надійності конкретного виробу.

Імовірність того, що дійсне значення показника, який оцінюється, знаходиться у довірчому інтервалі $I_m \cdot (P_n \leq \Pi \leq P_v) = \beta$ 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 $\bar{T}_{VV}, \bar{T}_{VN}$ 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 $I_m(P_n \leq \Pi) = \alpha$ (наприклад, для імовірності безвідмовної роботи, середнього наробітку на відмову), або не більша верхньої границі $I_m(\Pi \leq P_v) = \alpha$ (наприклад, для середньої тривалості відновлення дієздатності виробу). Оцінка α — це *одностороння довірча імовірність* знаходження параметру з необхідної сторони установленної 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.

6.2. Випробування невідновлюваних виробів

Для невідновлюваних виробів розглядають *два варіанти* оцінки нижньої P_n і верхньої P_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 кожною 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:

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_H)^i \cdot \Pi_H^{n-i} = 1 - \alpha; \quad (6.1)$$

$$\sum_{i=m}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_B)^i \cdot \Pi_B^{n-i} = 1 - \alpha. \quad (6.2)$$

Для безвідмовних випробувань, коли $m = 0$.

$$1 - \alpha = \sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_H)^i \cdot \Pi_H^{n-i} = \Pi_H^n, \quad (6.3)$$

де n – кількість випробуваних виробів, m – кількість відмов.

Тобто,
$$\Pi_H = \sqrt[n]{1 - \alpha}. \quad (6.4)$$

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:

$$x = \sum_{i=1}^2 x_i \cdot \Pi_i = 0 \cdot \frac{m}{n} + 1 \cdot \frac{n-m}{n} = \frac{n-m}{n} = P^*, \quad (6.5)$$

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:

$$S_{Ix} = \sqrt{\sum (x_i - x)^2 \Pi_i} = \sqrt{(0-x)^2 \cdot \frac{m}{n} + (1-x)^2 \cdot \frac{n-m}{n}} = \sqrt{x(1-x)} \quad (6.6)$$

а для n виробів воно в \sqrt{n} раз менше. А тому

$$S_{n_x} = \sqrt{\frac{x(1-x)}{n}} \quad (6.7)$$

Тоді нижня і верхня довірчі границі показника надійності визначаються за формулами:

$$\Pi_H = x + U_\alpha S_{n_x} = x + U_\alpha \sqrt{\frac{x(1-x)}{n}}, \quad (6.8)$$

$$\Pi_B = x - U_\alpha S_{n_x} = x - U_\alpha \sqrt{\frac{x(1-x)}{n}}, \quad (6.9)$$

де U_α — квантиль нормального розподілу, що відповідає вибраній довірчій імовірності α .

Наближення до нормального розподілення прийнятне, якщо виконуються дві умови: $n x > 10$ і $n(1 - x) > 10$.

На основі поданих вище формул побудовані графіки, по яких можна знайти P_n і P_v для різної кількості n випробуваних об'єктів при різних рівнях α і β (рис.6.1).

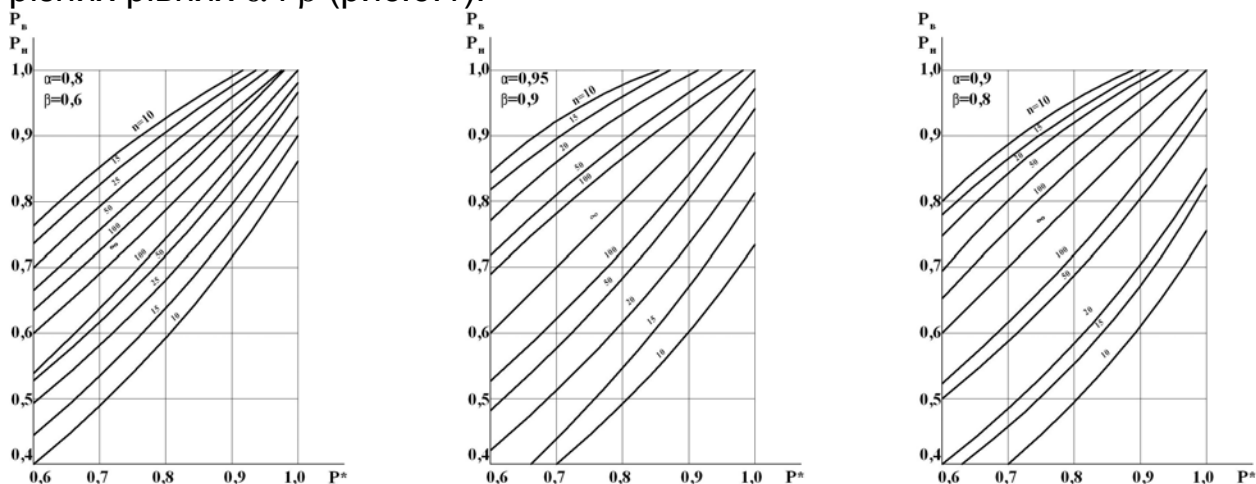


Рис.6.1. Залежність нижньої P_n і верхньої P_v довірчих границь імовірності безвідмовної роботи від об'єму і результатів випробувань об'єктів: α — одностороння довірка імовірність; β — двостороння довірка імовірність; $P^* = x$ — частість збереження дієздатності; $P^* = 1 - m/n$, де n — кількість випробуваних виробів, m — кількість відмов

6.3. 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

$$T = t_\Sigma / m, \tag{6.10}$$

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.

Довірчі границі середнього наробітку на відмову знаходять, використовуючи відношення $2t_\Sigma / T$, яке знаходиться через розподіл χ^2 (табл. 6.1 і додаток 3) 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:

$$\alpha = \text{Im}(\chi^2_{\alpha; 2m} \geq 2t_{\Sigma}/T); \quad (6.11)$$

$$\alpha = \text{Im}(\chi^2_{1-\alpha; 2(m+1)} \leq 2t_{\Sigma}/T), \quad (6.12)$$

звідки
$$T_H = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{(1-\alpha); 2(m+1)}}; \quad T_B = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{\alpha; 2m}} \quad (6.13)$$

Для двохстороннього довірчого інтервалу:

$$T_H = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{(1+\beta)/2; 2(m+1)}}; \quad T_B = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{(1-\beta)/2; 2m}}, \quad (6.14)$$

Таблиця 6.1.

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. 6.1.

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: $t_{\Sigma} = nt = 3 \cdot 600 = 1800$ год.

Використавши табл. 6.1, при $\alpha = 0,8$ маємо $\chi^2_{1-\alpha; 2(m+1)} = 13,4$.

$$T_H = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi^2_{(1-\alpha); 2(m+1)}} = \frac{2 \cdot 1800}{13,4} \approx 269 \text{ год.}$$

6.4. 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 Π для нормальних умов роботи технічного об'єкта обчислюється через коефіцієнт підсилення K_n (або критерій подібності) і значення фактичного показника $\Pi\phi$, одержаного при випробуваннях в форсованому режимі, корегується:

$$\Pi = \Pi\phi \cdot K_n \quad (6.15)$$

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 Π і форсованого $\Pi\phi$ режимів, за якими визначають коефіцієнт K_n , відомі. У загальній формі вони мають вигляд:

$$K_n = (\Pi\phi / \Pi)^m \quad (6.16)$$

Показник степені m у цьому рівнянні, наприклад, для співвідношення меж міцності для форсованого σ_ϕ 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_n , 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, виграючи 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:

$$\Pi_H = \sqrt[n]{1 - \alpha}, \quad (6.17)$$

де n - кількість випробувань, α - одностороння довірна імовірність.

Після логарифмування цього рівняння, отримуємо:

$$n_{\min} = \frac{\lg(1 - \alpha)}{\lg \Pi_H} \quad (6.18)$$

Найменшу сумарну тривалість випробувань відновлюваних виробів, виходячи з тих же умов ($m = 0$), можна знайти з формули.

$$T_H = \frac{2t_\Sigma}{\chi_{1-\alpha; 2(m+1)}^2}, \quad (6.19)$$

Тоді

$$t_{\Sigma \min} = \frac{T_H \cdot \chi_{1-\alpha; 2(m+1)}^2}{2} \quad (6.20)$$

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:

$$t = \bar{t} + Up \cdot S_t; \quad (6.21)$$

$$\lg t = \lg \bar{t} - Up \cdot S_{\lg t}; \quad (6.22)$$

$$P = \exp(-kt^\nu), \quad (6.23)$$

де $\bar{t}, \lg \bar{t}$ - середні 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 (див. підрозділ 4.2.1.5).

Виходячи з цього, формули для перерахування часу випробувань t_B на заданий ресурс t для названих трьох законів розподілу приймуть вигляд:

$$Up = \frac{t - t_B}{V_t \cdot t_B} + Up_B \frac{t}{t_B}; \quad (6.24)$$

$$Up = \frac{\lg t - \lg t_B}{S_{\lg t}} + Up_B; \quad (6.25)$$

$$\ln P = (kt^V) \ln P_{H_B}, \quad (6.26)$$

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.

Випробувавши виріб протягом $t_B > t$ і, оцінивши за графіками (рис.6.1) значення нижньої довірчої границі імовірності безвідмовної роботи протягом часу випробувань, цю оцінку за формулами (6.24)...(6.26) 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.

6.5. 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 контрольованого 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 $\alpha_в = \beta_с = 0,2$.

Бракувальний рівень $\Pi_в$ контрольованого показника надійності, як правило, приймають рівним нижчому за якістю граничному значенню, заданому в технічних умовах на об'єкт : ($\Pi_в = \Pi_H$). *Прийманий же рівень* $\Pi_а$ вибирають вищим за бракувальний у певному співвідношенні. Для імовірнісних показників надійності прийнятним може бути співвідношення:

$$\Pi_а \geq \Pi_в + 1/2; \quad (6.27)$$

Для показників надійності, заданих у фізичних одиницях, користуються ще таким співвідношенням:

$$\Pi_а = (1,5 \dots 15) \Pi_в \quad (6.28)$$

При виборі рівнів показників враховують техніко-економічні чинники: вартість технічних об'єктів, розмір партії виробів, складність випробувань, тип контрольованого показника надійності. Найзручніше приймати співвідношення (6.28) 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 бракувальними 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:

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_{\alpha})^i \cdot \Pi_{\alpha}^{n-i} = 1 - \alpha_B; \quad (6.29)$$

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - \Pi_{\beta})^i \cdot \Pi_{\beta}^{n-i} = \beta_C. \quad (6.30)$$

Планування одноступінчастих випробувань для контролю імовірнісних показників надійності спрощується при застосуванні даних табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Планування одноступінчастих випробувань для контролю показників типу P

При $\alpha_B = \beta_C = 0,1$				При $\alpha_B = 0,1; \beta_C = 0,2$			
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 $\alpha_B = \beta_C = 0,1$.

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 $\alpha_B = \beta_C = 0,2$; $P_{\beta}(t) = P_H(t) = 0,8$

$$P_{\alpha}(t)_{\min} = \frac{P_{\beta}(t) + 1}{2} = \frac{0,8 + 1}{2} = 0,9$$

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.6.3.

Таблиця 6.3.

Планування послідовних випробувань для контролю показників типу Р

α_b	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. 6.2) 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:

$$n_{об} = m_{об} / a . \quad (6.31)$$

Для контролю береться вибірка n' і піддається випробуванням.

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 $P_\alpha(600г) = 0,9$; $P_\beta(600г) = 0,6$; $\alpha_b = \alpha_c = 0,1$.

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.6.4.

Таблиця 6.4.

Планування послідовного контролю показників типу “наробіток” при експоненційному розподілі

$\alpha_e = \beta_c = 0,1$						$\alpha_e = \beta_c = 0,2$					
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 $m, t_\Sigma/T_\alpha$ (рис.6.3.) 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: $m_{об}$ і $t_{об}/T_\alpha = m_{об}/a$.

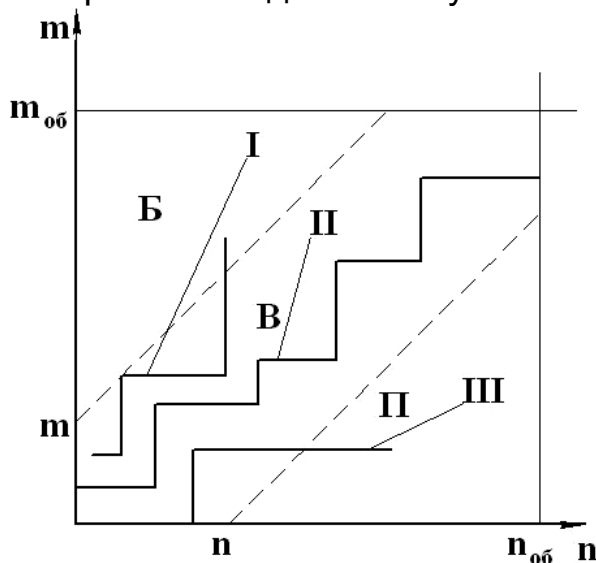


Рис. 6.2. Графік послідовних випробувань для контролю імовірнісних показників типу Р

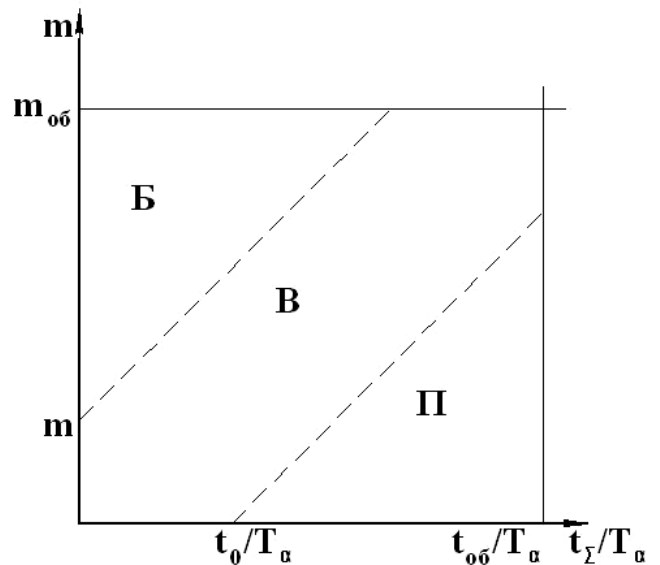


Рис. 6.3. Планування послідовних випробувань для контролю показників типу „наробіток”

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.6.3.) 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 $\alpha_e = \beta_c$

= 0,2. 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 $a = 1,4$; $m_0 = 2,0$; $t_0/T_\alpha = 1,39$; $m_{об} = 7$; $t_\Sigma/T_\alpha = 2,71$. Тоді $t_{об}/T_\alpha = m_{об}/a = 7/1,4 = 5$. 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. Які види випробувань технічних об'єктів застосовують для визначення показників надійності?
2. Назвіть переважні випадки застосування визначальних і контрольних випробувань.
3. У яких випадках застосовують приймальні і періодичні контрольні випробування виробів?
4. Чому сутність верхньої і нижньої границь довірчої імовірності для показників надійності?
5. У чому різниця між односторонньою і двохсторонньою довірчими ймовірностями при визначенні показників надійності?
6. Опишіть порядок визначення верхньої і нижньої довірчих границь імовірності безвідмовної роботи не відновлюваних виробів.
7. Поясніть як застосувати розподіл χ^2 для оцінки нижньої границі середнього наробітку на відмову відновлюваного технічного об'єкта.
8. Назвіть основні методи форсування випробувань.
9. Як визначити мінімальну кількість зразків для проведення випробувань невідновлюваних виробів за відомою односторонньою довірчою імовірністю?
10. Як зменшити кількість випробуваних зразків відновлюваних виробів завдяки збільшенню тривалості випробувань?
11. У яких випадках застосовується одноступінчастий метод випробувань виробів?
12. Охарактеризуйте поняття «ризик виготовлювача» і «ризик споживача».
13. Як визначити приймальний і бракувальний рівень контролюваного показника надійності?
14. Який порядок проведення послідовних випробувань для контролю показників надійності?

[перейти до змісту](#)

7. Прогнозування і забезпечення надійності виробів в різні періоди існування

Кожний технічний об'єкт харчових і переробних виробництв, як вид продукції практичного використання, має такі *періоди існування*: проектування, виробництво і експлуатація. Проблеми надійності технічних виробів у кожному з названих періодів мають свої особливості і вирішуються по-різному. В перший період — *період проектування* рівень надійності виробів закладається, при їх виробництві — забезпечується, а при використанні — підтримується. *Заходи*, що визначають надійність виробів у кожному з періодів існування, розділяють на *загальні (стратегічні) і часткові (тактичні)*.

7.1. Період проектування

В період проектування майбутня надійність технічних виробів залежить, в першу чергу, від загального рівня розвитку, якого досягла сфера, де проектується вироби, наскільки ефективно в ній застосовують загальні організаційно-технічні заходи з підвищення надійності, тобто від того, як підтримуються добрі традиції проектного колективу, кваліфікація персоналу, його досвід і знання сфери, для якої ведеться проектування, від роботи інформаційних служб, ефективності прямих і зворотніх зв'язків з машинобудівниками і експлуатаційниками. Тому у будь-якому проектному колективі підбір кадрів і підвищення їх кваліфікації, збагачення інформаційних банків є стратегічною гарантією забезпечення якості створюваного обладнання і, в першу чергу, його надійності.

В період проектування основою для прогнозування надійності виробів служать розрахунки, порівняння з відомими аналогами, іноді експертна оцінка. Розробка проекту ведеться в декілька стадій. Потрібний рівень надійності вибирається уже на першій стадії розробки *технічного завдання (ТЗ)*, виходячи з вимог до виробу в експлуатації і технічних можливостей виробника виробів. На стадії розробки ТЗ орієнтуються на показники надійності відомих аналогів, віддаючи перевагу найбільш вдалим. У подальших розробках вибраний рівень надійності стає показником, якого треба досягти або перевищити.

На стадії створення *ескізного проекту* проводяться перші інженерні розрахунки, у тому числі динамічні та на міцність. Від якості цих розрахунків в значній мірі залежить надійність виробів. Паралельно з'являється можливість аналізувати структурні схеми надійності і виконувати попередні розрахунки її показників. Це дозволяє обґрунтовувати вибір надійних комплектуючих елементів, перевірених вузлів і конструкцій, які запозичуються з інших виробів.

Розрахунки для прогнозування надійності виробів базуються на використанні відомих показників надійності елементів (додаток 5). Ці показники, у подавляючій більшості, є середньостатичними і не враховують конкретних умов функціонування елементів. Розрахунки ж

показників надійності елементів, які доводяться до співставлення за окремими критеріями розрахункових параметрів y з їх граничними величинами $y_{\text{доп}}$, дають точніші результати. Параметр y завжди може бути представлений функцією, яку в загальному вигляді можна подати рівнянням:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (7.1)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n — випадкові чинники.

Граничні значення параметрів можуть визначатись по такому ж рівнянню, або вибиратись за нормативами чи довідниковими даними. Іноді їх установлюють випробуваннями.

Дієздатність елемента по вибраних критеріях забезпечується, коли розрахунковий параметр не перевищує його граничного значення. В класичних розрахунках використовується коефіцієнт запасу n . Вибираються наступні умови розрахунків в залежності від напрямку зміни параметрів, від яких погіршуються умови роботи елемента.

$$y \leq y_{\text{доп}} \cdot n; \text{ або } y \geq y_{\text{доп}} \cdot n, \quad (7.2)$$

Розрахунок виконується для найнесприятливіших умов і тому дійсна величина коефіцієнта запасу n залишається невідомою.

У розрахунках, основаних на визначенні імовірності подій, y і $y_{\text{доп}}$ розглядають як випадкові величини, а мірою надійності є імовірність безвідмовної роботи P елемента за заданим критерієм. Тоді розрахункова умова забезпечення імовірності P безвідмовної роботи елемента визначається рівнянням:

$$\bar{y} - \bar{y}_{\text{доп}} = U_p \cdot S, \quad (7.3)$$

де \bar{y} і $\bar{y}_{\text{доп}}$ — середні значення параметра і середнє допустиме значення параметру $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$, U_p — квантиль нормального нормованого розподілу.

$$S = \sqrt{S_y^2 + S_{y_{\text{доп}}}^2}, \quad (7.4)$$

де S , S_y і $S_{y_{\text{доп}}}$ — середнєквдратичне відхилення відповідно суми двох випадкових величин, величини параметру і допустимої величини параметру $y_{\text{доп}}$. Середнє квадратичне y відхилення розраховують так:

$$S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{df(x)}{dx_i} \right)^2 S_i^2}, \quad (7.5)$$

де $\frac{df(x)}{dx_i}$ — похідна функції $f(x)$ по чиннику x_i , в яку підставляють

середні значення $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$, N — кількість досліджуваних зразків.

Кількісні характеристики розподілу випадкових факторів \bar{x}_i і S_i вибирають за довідниковими даними і, в деяких випадках, за результатами спеціальних експериментів. Можна визначити їх також за граничними значеннями чинників:

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i \max} + x_{i \min}}{2}; \quad (7.6)$$

$$S_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{d}, \quad (7.7)$$

де d — коефіцієнт, що залежить від кількості випробувань N і береться з такого ряду:

N	2	5	10	15	20	30	50	100
d	1,13	2,3	3,1	3,5	3,7	4,1	4,5	5,0

Для чинників з нормальним законом розподілу, граничні значення яких нормуються (наприклад, технологічні допуски), S_i можна визначити так:

$$S_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{6}$$

Це відповідає імовірності $P(t)$ знаходження значення чинника в допустимих межах, рівній 0,997. При інших значеннях P справедливий вираз:

$$S_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2U_p}, \quad (7.8)$$

де $2U_p$ вибирають із наступного ряду:

P	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995	0,999
$2U_p$	3,29	3,92	4,66	5,16	5,62	6,38

Припустимо, що різниця $y - y_{\text{дон}}$ має нормальний розподіл, що буває лише при нормальному розподілі величин y і $y_{\text{дон}}$. У цьому випадку імовірність $P(t) = 0,5$ забезпечується при $\bar{y} - \bar{y}_{\text{дон}} = 0$. Імовірність безвідмовної роботи елемента можна знайти за таблицею залежності між U_p і $P(t)$ по величині U_p , знайденому із рівняння:

$$U_p = - \frac{\bar{y}_{\text{дон}} - \bar{y}}{\sqrt{S_{y_{\text{дон}}}^2 + S_y^2}}; \quad (7.9)$$

Поділивши чисельник і знаменник на \bar{y} і ввівши коефіцієнт варіації

$$Vy = \frac{Sy}{\bar{y}} \quad i \quad Vy_{\Delta \text{ОП}} = \frac{Sy_{\Delta \text{ОП}}}{\bar{y}_{\Delta \text{ОП}}}, \quad (7.10)$$

знайдемо залежність між U_p і коефіцієнтом запасу \bar{n} по розрахунковому параметру:

$$U_p = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{n^2 V_{y_{дон}}^2 + V_y^2}} \quad (7.11)$$

За ескізним проектом виготовляються експериментальні зразки виробів для випробувань, або пробної експлуатації, де навантаження та інші експлуатаційні чинники, що впливають на надійність, можуть бути перевірені. Випробування або пробна експлуатація експериментальних зразків дають перші статистичні дані для наближеної оцінки показників надійності. На цьому підґрунті корегуються розрахунки і удосконалюється конструкція виробу на стадії розробки *технічного проекту*.

Потім, за результатами випробувань дослідних зразків і установочної серії виробів, виготовлених за технічним проектом, уточнюються кількісні і якісні вимоги до надійності, формулюються вимоги до періодичності і об'єму випробувань на надійність при серійному виробництві, розробляється система технічного обслуговування і ремонту для підтримування надійності в процесі експлуатації. Таким чином створюється *робочий проект* виробу і передається на виробництво. Подальше удосконалення проекту не виключається і під час серійного виробництва технічних об'єктів. Отже, процес проектування виробів об'єднує 4 стадії: технічне завдання (ТЗ) на проектування, ескізний проект, технічний проект і робочий проект. Велика кількість технічних об'єктів харчових і переробних виробництв проходить не всі з названих стадій проектування, що обмежує можливості в оцінці їх надійності в період розробки. Це стосується, в більшості випадків, великогабаритного потужного обладнання, яке з перших зразків іде в експлуатацію. Для визначення показників надійності такого обладнання використовується тільки *підконтрольна експлуатація*, яка теж не завжди реалізується. Тому надійність цих виробів при проектуванні забезпечується, головним чином, за рахунок якості проектних робіт та зв'язків проектувальників з виробничниками і експлуатаційниками.

Під час кожної стадії проектування виконуються конкретні конструктивні заходи (прийоми) по забезпеченню надійності виробів. Вирішальне значення для забезпечення надійності має правильний вибір принципу дії обладнання з урахуванням усіх фізичних та хімічних явищ, що складають основу технологічних процесів за участю цього обладнання. Заміна механічних процесів на процеси іншого принципу дії (пневматика, магнетизм, біохімічні, гідравлічні тощо) може дати підвищення показників надійності на порядок. У механічних гомогенізаторах, наприклад, жирові кульки руйнуються за рахунок інтенсивних ударів. Тому у їх конструкціях є високонавантажені

деталі, що швидко зношуються і часто руйнуються. Гомогенізатори, дія яких основана на розриві жирових кульок при стрибкоподібному переході з середовища з нормальним або підвищеним тиском у вакуум (вакуумні або кавітаційні), не мають таких швидкозношуваних деталей і їх надійність значно вища, ніж механічних. Аналогічного ефекту досягають заміною механічного змішування магнітним, пневматичним або гідравлічним, використанням замість механічного транспорту засобів транспортування з іншим принципом дії.

Окрім розрахунків на міцність, стійкість і зношування, при проектуванні виробів обґрунтовується вибір різних виконавчих систем, раціонально підбираються матеріали деталей з врахуванням умов їх роботи: агресивності складу і температури середовища, динамічних навантажень, наявності збудників вібрацій тощо. Для обладнання харчових виробництв є специфічні вимоги, які необхідно враховувати при проектуванні. Адже виключно важкі умови роботи спричиняють його підвищений знос і корозійне руйнування. Лімітуючими (з точки зору надійності) в більшості випадків є вузли тертя і деталі, поверхні яких контактують з технологічними середовищами. Проблеми надійності цих деталей і вузлів вирішуються за рахунок обґрунтованого вибору матеріалів і захисних покриттів. Причому, виготовленні обладнання можуть використовуватись лише матеріали, які допущені санітарними службами для застосування в контакт з продуктами харчування. Використовують також конструктивний захист деталей від середовищ. Для цього служать сальники, захисні щити, ізолятори, відводи для середовищ та інші засоби. Надійно працюють вузли тертя з ізольованими, автономними системами мащення. Затрати, викликані подібним ускладненням конструкції виробів, з надлишком компенсуються під час їх експлуатації.

Для зниження навантаженості деталей і вузлів прибігають до розосередження навантажень. Наприклад, використовують пристрої, що забезпечують рівномірність подачі сировини чи продукції на технологічні лінії, поділ вантажопотоку на декілька ліній.

Чутливої шкоди обладнанню харчових виробництв завдає корозія. Основним конструктивним заходом для боротьби з нею є відповідний вибір матеріалів або покриттів. Окрім традиційних металевих гальванічних покриттів (оксидних, нікелевих, хромових, цинкових) і неметалевих (полімерних, емалевих) впроваджуються відносно нові покриття різного складу і технології їх нанесення: термодифузійні і газоплазменні, нанесені в тліючому електророзряді, електроіскрові та ін.

Одним з ефективних засобів захисту обладнання від корозії є установка протекторів з більш активного металу, які змінюють електродний потенціал металевих деталей. Такі протектори передбачають, в основному, у конструкціях апаратів. Наприклад,

сталеві корпуси дифузійних апаратів бурякоцукрових заводів надійно захищаються протекторами з цинку.

До конструктивних заходів по забезпеченню надійності виробів також відносять спрощення конструкцій для забезпечення легкого демонтажу і монтажу вузлів при пошуках елементів, що відмовили, і при виконанні ремонтних операцій. Перспективними вбачаються конструкції у вигляді агрегатів, які при відмовах повністю могли б замінитись новими або відремонтованими. Агрегати ж, що відмовили, можуть ремонтуватись автономно і не обмежувати використання технічних об'єктів. Узагальнено названі конструктивні заходи можна описати наступним чином: *підкорення конструкції виробу існуючій системі обслуговування і ремонту обладнання в галузі, що використовує це обладнання.*

При проектуванні також задається система контролю і необхідних вимірювань виробів під час виробництва з тим, щоб гарантувати їх якість.

7.2. Період виробництва

У сфері виробництва виробів також виділяються стратегічні і тактичні засоби забезпечення їх надійності. До *стратегічних засобів* відносяться такі ж, як і при проектуванні: підтримка належного науково-технічного рівня виробництва, у тому числі оснащення, підготовка і підвищення кваліфікації інженерно-технічних і виробничих кадрів, підвищення рівня інформованості, забезпечення прямих і зворотніх зв'язків з проектувальниками і експлуатаційниками. Крім того, у виробничій сфері велике значення для забезпечення бажаної надійності технічних об'єктів мають організація і культура виробництва та рівень технологічної дисципліни. Для забезпечення надійності своєї продукції на машинобудівних підприємствах проводять вхідний контроль комплектуючих на відповідність технічним вимогам. Цим же цілям служить система контролю власного виробництва, прийому і випробування готових виробів.

До *тактичних технологічних прийомів* підвищення надійності відносяться: зміцнення і покращення матеріалу деталей методами термічної, хіміко-термічної, термодифузійної та інших видів обробки; зняття внутрішньої напруженості кованих, литих, термооброблених деталей за рахунок відпалу, старіння або відпускання; якісне виконання фінішних операцій (шліфування, хонінгування, полірування, вигладжування); заміна різання пластичною деформацією при формуванні деталей (наприклад, накатка різьби, галтелів і переходів на валах та інших ступінчастих важконавантажених деталях). Пластична деформація сприяє зміцненню деталей або їх поверхні за рахунок того, які в деформованому металі зникають (заліковуються) дефекти, що виникли під час попередніх процесів обробки, а при деформації волокна структури приймають форму готових деталей (наприклад, при куванні заготовок колінчастих валів) і надають

більшої міцності. Зміцнення деталей пластичною деформацією можна досягти, якщо внутрішню напруженість, що з'являється між деформованим шаром і основною структурою, протиставити діючому навантаженню. Несуча здатність деталей підвищується якраз завдяки такому протиставленню зусиль пружної деформації діючим зовнішнім силам.

7.3. Період експлуатації

Методи експлуатації машин і апаратів харчових і переробних виробництв суттєво впливають на їх показники надійності і довговічності.

Умови і режими експлуатації визначають спектр негативних чинників, які впливають на об'єкт (середні навантаження, швидкості, температури, агресивні середовища тощо) та інтенсивність руйнування його елементів.

Для створення сприятливих умов роботи машин і обладнання необхідне регулярне мащення рухомих з'єднань, захист їх деталей від попадання агресивних речовин і забруднення. Особливо важливо ізолювати поверхні технічних об'єктів у тому випадку, коли навколишнє середовище насичене абразивними частинками.

У сучасних складних технічних системах (літаках, двигунах, верстатах та ін.) передбачені спеціальні датчики і системи контролю, які дозволяють вимірювати основні параметри (тиск оливи, температуру, зусилля тощо) і контролювати працездатність окремих елементів і механізмів. Така постійна технічна діагностика необхідна для забезпечення раціональних умов експлуатації і підвищення надійності виробів.

Відновлення працездатності технічних об'єктів при відмові їх елементів і зниженні характеристик виконується у період їх ремонтів. Для виконання усього комплексу ремонтних робіт розробляється спеціальна система, яка відображає специфіку і умови роботи машин і апаратів конкретного типу. Добре зарекомендувала себе система планово-попереджувальних ремонтів (ППР), яка вперше була запроваджена в авіації, автомобілебудуванні і при ремонтах металорізальних верстатів. Типова система ППР мала дев'ять періодів зі структурою ремонтного циклу I-II-I-II-I-II-I-III (або M-M-C-M-M-C-M-M-K), де I(M)-малий ремонт, II(C)-середній, III(K)-капітальний.

У наш час система ППР широко застосовується на харчових і переробних підприємствах АПК. Нормативні матеріали по системі ППР розроблені практично у всіх галузях промисловості і об'єднують статистичні дані, формули і правила встановлення об'єму ремонтних робіт і терміну міжремонтного періоду для кожного конкретного випадку. При створенні будь-якої ремонтної системи необхідно виходити з умови забезпечення високого рівня надійності і довговічності технічного об'єкта.

Величина міжремонтного періоду (T_1) є основним параметром системи ППР, який відображає специфіку конкретного обладнання, характер його навантаження і експлуатації.

Міжремонтний період можна вважати оптимальним ($T_1=T_{\text{опт}}$), коли встановлюється таке співвідношення між об'ємами робіт при періодичних ремонтах і міжремонтному обслуговуванні, яке забезпечує мінімальну трудомісткість ремонту для даних умов.

При збільшенні міжремонтного періоду велика кількість деталей ремонтується при міжремонтному обслуговуванні. Це приводить до того, що, з однієї сторони, повніше використовуються строки служби окремих деталей, а з другої – збільшується об'єм складально-розбиральних робіт. Виходячи з цього, О. С. Проніковим запропонована наступна формула для визначення оптимального міжремонтного періоду:

$$T_{\text{опт}} = \frac{1.8}{k} \left(\frac{\tau_k}{\tau_1} + 1 \right) (\beta - \sqrt{\beta^2 - 1}) T_\phi, \quad (7.12)$$

де k - кількість ремонтів в циклі ($k=6$ або $k=9$); τ_k - трудомісткість капітального ремонту; τ_1 - трудомісткість малого ремонту; T_ϕ - фактичний міжремонтний період; β - коефіцієнт, що показує зростання трудомісткості ремонту деталей вузла при міжремонтному обслуговуванні за рахунок збільшення об'єму складально-розбиральних робіт. Коефіцієнт залежить від конструкції технічного об'єкта, його можна розрахувати або визначити практично.

Підвищення довговічності деталей і вузлів технічного об'єкта чи складної системи, покращення їх конструкцій і технології ремонту буде повністю сприяти підвищенню надійності і довговічності лише у тому випадку, коли правильно вибрані основні параметри системи ремонту і, в першу чергу, структура ремонтного циклу і величина міжремонтного періоду.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. У чому полягає сутність стратегічних і тактичних методів забезпечення надійності у період проектування і виробництва технічних об'єктів?
2. Як вибирається потрібний рівень надійності на стадії розробки технічного завдання на проектування виробу?
3. Які розрахунки для прогнозування надійності проводять на стадії розробки ескізного проекту виробу?
4. Яка різниця між технічними і робочим проектом виробу?
5. Охарактеризуйте вплив фізичного принципу дії обладнання на рівень його надійності.
6. Які специфічні вимоги треба врахувати при проектуванні і виготовленні харчового, мікробіологічного і фармацевтичного обладнання для забезпечення належного рівня його надійності?
7. У яких випадках для підвищення показників надійності деталей харчового обладнання будуть ефективні металеві, неметалеві і полімерні покриття?

8. Де застосовується протекторний захист від корозії у харчових виробництвах?
9. Які конструктивні заходи найбільш ефективні для підвищення показників надійності технічних об'єктів?
10. Охарактеризуйте вплив кадрово-інформаційного забезпечення проектних і виробничих колективів на рівень надійності технічних об'єктів, які проектуються і виготовляються ними.
11. Навіщо на машинобудівних підприємствах проводять вхідний контроль комплектуючих для виготовлення технічних об'єктів?
12. Назвіть тактичні технологічні прийоми для підвищення надійності виробів у період їх виробництва.
13. Охарактеризуйте переваги планово-попереджувальних ремонтів обладнання на харчових підприємствах.
14. Як визначити оптимальний період для машин і обладнання?
15. Які заходи будуть ефективними для створення сприятливих умов роботи машин і обладнання на харчових підприємствах?

[перейти до змісту](#)

8. Особливості прогнозування і оцінки надійності обладнання харчових виробництв

8.1. Структурно-імовірнісний підхід в дослідженні показників надійності

Особливістю проблеми надійності машин і апаратів є її зв'язок зі всіма періодами їхнього існування — проектуванням, виготовленням та експлуатацією, починаючи з моменту формування і обґрунтування ідеї створення нового виробу і закінчуючи прийняттям рішення про його списання. Основні заходи по забезпеченню надійності, прийняті на стадії проектування або виготовлення машин чи апаратів, безпосередньо впливають на їхні експлуатаційні та економічні показники.

До останнього часу при створенні методів розрахунку показників надійності технічних об'єктів, в основному, використовувались лише статистичні підходи, в яких або зовсім не відводиться, або відводиться другорядне місце врахуванню змін фізико-хімічного стану матеріалів, з яких виготовлені деталі обладнання. Основою цих методів були статистичні дані випробувань або навіть реальної експлуатації. При такому підході в тіні залишаються ті зміни, які проходять в деталях машин і апаратів з плином часу від різного роду навантажень та дії технологічних середовищ.

Проблема надійності пов'язана, в першу чергу, з прогнозом, тому що констатація того або іншого рівня надійності для машини, яка вже відпрацювала свій ресурс, має досить малу цінність. Надійність машини або апарату в умовах експлуатації необхідно визначити вже на стадії проектування.

Наука і дослідження по надійності розвиваються по двох основних напрямках. **Перший**, який виник в радіоелектроніці, зв'язаний з розвитком математичних методів оцінки надійності, з статистичною обробкою експлуатаційної інформації, з розробкою структур складних систем, які забезпечують високий рівень надійності.

Другий, який виник в машинобудуванні і зв'язаний з вивченням фізики відмов (зносу, корозії, втомлювальної міцності і таке інше), з розробкою методів розрахунку на знос, міцність, теплостійкість, з використанням технологічних прийомів, які забезпечують необхідну надійність виробів. Основою цього напрямку є результати дослідження природничих наук, які вивчають фізико-хімічні процеси руйнування, старіння та зміни властивостей матеріалів, з яких виготовлене обладнання та машини, або які необхідні для їх функціонування. З позицій надійності результати цих наук концентруються в області, яка отримала назву «*фізика відмов*».

Фізика відмов вивчає незворотні процеси, які приводять до втрати матеріалом деталі початкових властивостей при експлуатації

машин та обладнання. Часові залежності фізики відмов — це база для розв'язання основних задач надійності.

Рівень надійності машин та обладнання в харчовій та переробній галузях АПК визначається, в основному, на етапах проектування та виготовлення. До експлуатуючого персоналу є тільки вимога підтримувати його. Проте, при раціональній організації експлуатації, можуть бути отримані показники надійності, що перевищують проектні. Наприклад, правильне і своєчасне проведення профілактичних заходів, своєчасне відновлення працездатності деталей з метою попередження відмов еквівалентне зниженню розрахункової інтенсивності відмов машин.

Розроблені імовірнісні методи кількісної оцінки надійності технічних пристроїв мають той недолік, що вони не зв'язуються з фізико-хімічними процесами виникнення і природою відмов, тому мають принципові обмеження, особливо в оцінці надійності обладнання та машин в харчових і переробних галузях агропромислового комплексу, які працюють при постійній зміні навантаження і характеристик технологічного середовища. Запропонований метод оцінки довговічності враховує фізику процесів руйнування та інтенсивність експлуатаційного впливу навантажень і технологічних середовищ. Основою його є функціональні залежності, хоча фізичні процеси руйнування мають фізико-імовірнісну природу. Такий метод є **структурно-імовірнісним**, тому що, на відміну від імовірнісного вводить до розгляду фізичну природу міцності і кінетичні закономірності. Він оснований на використанні апріорної інформації про можливі фізичні реалізації і закономірності процесу руйнування в залежності від факторів навантаження і середовища. Фізичний підхід є єдино можливим у тих випадках, коли статистичний матеріал в достатньому об'ємі не може бути отриманий, або коли для цього потрібно забагато часу.

Поєднання імовірнісних методів з проникненням у фізичну сутність процесів, які викликають деградацію і старіння виробів, є найбільш правильним напрямком розвитку способів оцінки надійності машин і апаратів в харчовій і переробній галузях АПК, які працюють в агресивних корозійно-активних середовищах. При цьому необхідне встановлення безпосередньої залежності основних показників надійності, по-перше, від фізичних властивостей і параметрів матеріалів і елементів, від фізико-хімічних процесів зміни цих властивостей і, по-друге, від інтенсивності експлуатаційних чинників з врахуванням випадкового характеру їх величин і процесів, які реалізуються.

Оцінка надійності машин, основана на даних про фізичні властивості матеріалів, про характеристики елементів і діючих чинників не лише не виключає, але й передбачає використання ймовірнісних, статистичних методів, тому що ці властивості і

характеристики, як правило, випадкові функції часу або випадкові величини. Це пов'язане з двома основними причинами. По-перше, початкові властивості матеріалів, геометричні і експлуатаційні параметри деталей мають розсіювання, тому що вони є продуктом якогось технологічного процесу, який може проходити лише з деякою точністю і стабільністю. По-друге, стохастична природа процесів старіння матеріалів і деградації виробів зв'язана з широкою варіацією режимів роботи та умов експлуатації. В результаті залежності, які описують процеси старіння, є функціями випадкових аргументів — навантажень, швидкостей, температур, характеристик технологічних середовищ тощо.

Розглядаючи процеси старіння (корозії чи зношування) як випадкові, часто доцільно зводити їх до досить простих закономірностей, особливо якщо вдається виділити ту частину процесу, яка формує стохастичну природу, у вигляді випадкової величини або стаціонарної функції. Апарат теорії випадкових функцій можна використовувати як до диференціальної функції, яка відображає швидкість процесу, так і до інтегральної, яка описує зміну ступеня пошкодження виробу.

8.2. 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 контактi 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. 8.1).

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.8.1. 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_B , а за рахунок похибок виготовлення і налагодження виробів — в межах поля A_H . Загальне поле розсіювання може бути оцінене імовірнісним методом складання дисперсій:

$$A_1 = \sqrt{A_H^2 + A_B^2} \quad (8.1)$$

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_1 і A_C :

$$A_2 = \sqrt{A_H^2 + A_B^2 + A_C^2} \quad (8.2)$$

Таким чином, до кінця періоду T_0 залишається невичерпаним резерв δ_H по параметру X :

$$\delta_H = \delta - \left[a_0 + a_C + 0,5\sqrt{A_H^2 + A_B^2 + A_C^2} \right] \quad (8.3)$$

Поле розсіювання параметру X за цей період визначається областю станів I.

Запас надійності K_H визначається, як відношення максимально допустимого значення параметру $X = X_{max} = \delta$ до експериментального його значення для даних умов

$$X_{ек} = \delta - \delta_H \quad (8.4)$$

$$K_H = \frac{\delta}{\delta - \delta_H} = \frac{X_{max}}{X_{ек}} \quad (8.5)$$

За наявності резерву δ_H 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 ($K_H = 1$, або $\delta_H = 0$).

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 $\delta_H = 0$;
- зменшити навантаження машини чи апарата для забезпечення $\delta_H = 0$ (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 $K_H=1$, 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. 8.2).

Проявляючись у вигляді механічної, теплової, хімічної енергія 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.

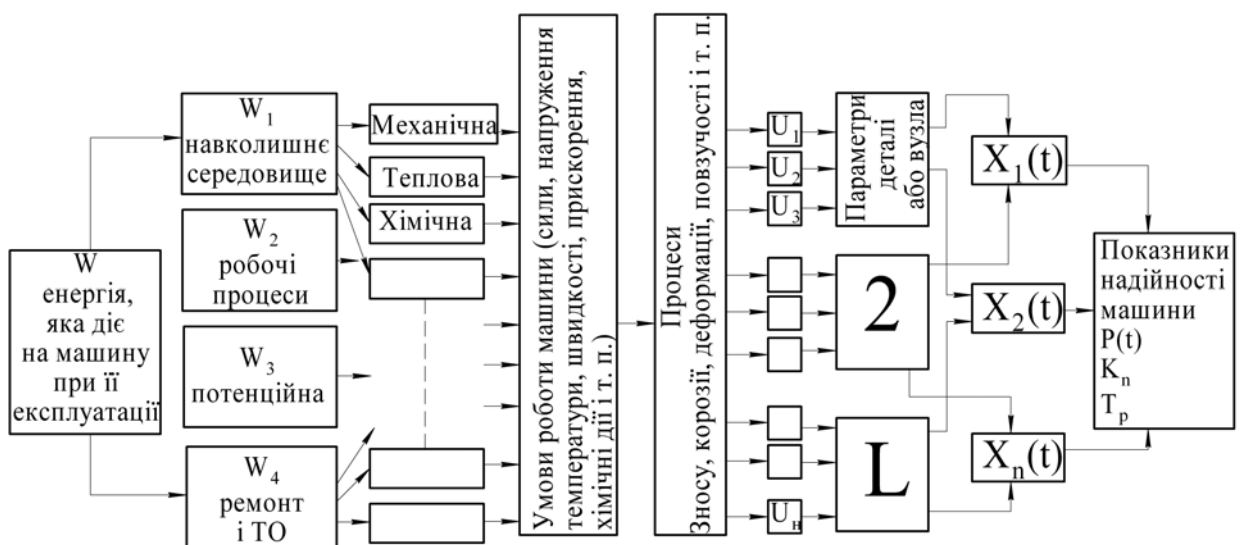


Рис.8.2. Схема формування показників надійності машини (апарата)

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. 8.2 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. 8.3):

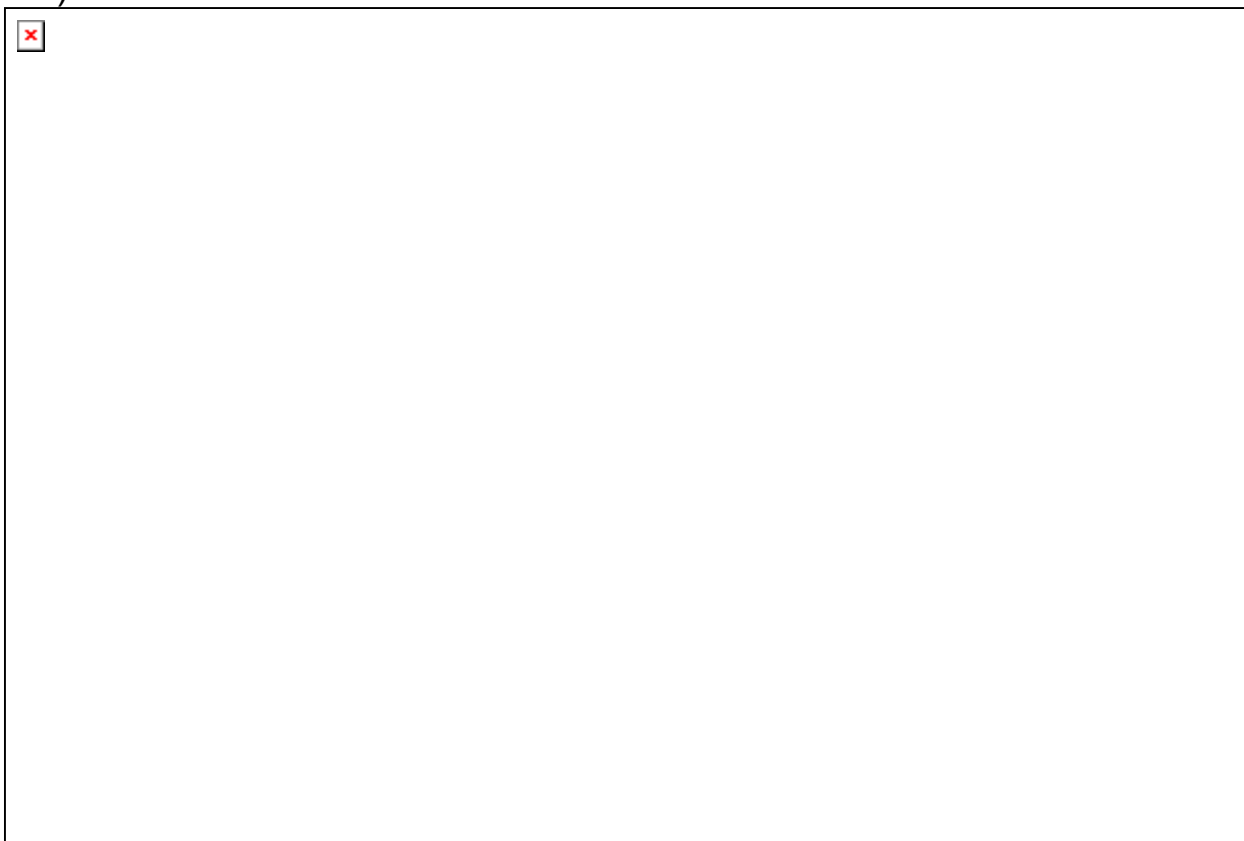


Рис. 8.3. Области прогнозування надійності машин і апаратів харчових і переробних виробництв

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.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Области застосування статистичних методів у дослідженні показників надійності технічних об'єктів.
2. Які недоліки мають суто імовірнісні методи оцінки надійності машин і апаратів харчових виробництв?
3. Поясніть сутність структурно-імовірнісного методу прогнозування надійності технічних об'єктів і систем.
4. Які процеси старіння і деградації машин і апаратів галузі впливають на вихідні параметри?
5. Опишіть випадок настання граничного стану любого технічного об'єкта і запропонуйте спосіб продовження його строку служби.
6. Як здійснити прогнозування показників надійності конкретних одиничних машин і апаратів галузі, якщо відсутні статистичні дані для їх обчислення?

[перейти до змісту](#)

9. Якість, ефективність і економічність технічних об'єктів і систем

Надійність і довговічність є одним з основних показників якості, ефективності і економічності виробів. Ці показники закладаються на стадії проектування виробів, забезпечуються під час їх виробництва і підтримуються у період експлуатації.

Терміни і визначення основних понять в області якості продукції наведені в ДСТУ 3230-95 „Управління якістю та забезпечення якості. Терміни та визначення.” ДСТУ ISO 9001-95 установлює моделі забезпечення якості в процесі проектування, виробництва і обслуговування виробів, а ДСТУ ISO 9004-1-95 установлює опис елементів, що мають складати систему забезпечення якості виробів на підприємстві. Вибір номенклатури показників для оцінки рівня якості продукції залежить від мети цієї оцінки.

9.1. Якість і надійність виробів

Загальною характеристикою будь-якої продукції є якість. **Якість** - це сукупність властивостей, що визначає ступінь відповідності продукції її призначенню. Якість - поняття об'єднуюче і складається, по меншій мірі, з десяти основних показників: відповідність основному призначенню; надійність; вартість; технологічність і матеріаломісткість; безпека; екологічність і енергозатратність; естетичність; ергономічність; стандартизованість; патентоспроможність.

Показники призначення продукції характеризують основні функції, для виконання яких вона призначена (працездатність, технічні параметри машин, наприклад, продуктивність, швидкість, точність та ін.)

Показники надійності характеризують зміну основних показників призначення в часі. Основні показники надійності - це безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збережуваність і готовність.

Економічні показники характеризують затрати на розробку, виготовлення та експлуатацію виробу, а також економічну ефективність його експлуатації. Інтегральним економічним показником для споживача є ціна виробу.

Технологічні показники характеризують розподіл затрат матеріалів, засобів праці в часі при технологічній підготовці виробництва, виготовленні та експлуатації продукції (трудомісткість, матеріаломісткість, собівартість)

Показники безпеки кількісно характеризують безпеку людини при використанні виробу (наприклад, імовірність отримання травм при аваріях автомобілів тим вища, чим менша маса автомобіля, імовірність вибуху телевізора та ін.)

Екологічні показники характеризують рівень зовнішніх дій, виникаючих при експлуатації і споживанні виробу (токсичність вихлопних газів двигунів, наявність нітратів і ядохімікатів в продуктах і воді тощо)

Естетичні показники характеризують композиційну цілісність, інформаційну виразність, раціональність форми, культуру виконання виробу. Кількісні показники тут встановити важко і вони замінюються системою рівнів у п'ятибальній системі: 5-кращий з світових; 4-на рівні світових; 3-національний рівень; 2-для внутрішнього ринку; 1-нижче рівня внутрішнього ринку.

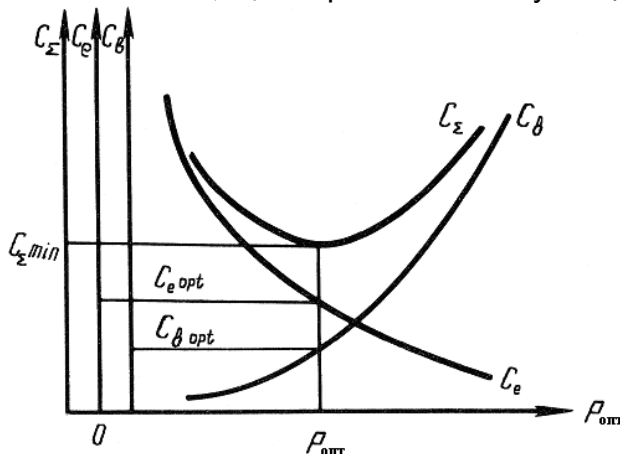
Ергономічні показники пов'язані з участю людини в роботі чи експлуатації виробу. До таких показників відносяться гігієнічні, антропологічні, фізіологічні, психологічні, вплив умов експлуатації на людину (вібрація сидіння, шум, загазованість тощо).

Показники стандартизації і уніфікації характеризують насиченість продукції уніфікованими та оригінальними частинами, а також рівень уніфікації з іншими виробами (наприклад, можливість використання програмного забезпечення на різних ЕОМ, касет на різних магнітофонах тощо).

Показники патентоспроможності (патентна чистота, захист авторськими свідоцтвами, патентами) сприяють підвищенню конкурентоспроможності виробу.

Забезпечення одних показників, як правило, вступає у протиріччя з виконанням інших. Розробка комплексних показників-одна з необхідних задач оптимізації якості. В багатьох випадках беруть два основних показники: вартість і надійність. Розв'язок задачі оптимізації в цьому випадку ілюструється графіком (рис.9.1).

Рис. 9.1. Визначення оптимального рівня надійності виробу: C_v - затрати на виготовлення; C_e - затрати на експлуатацію; C_{Σ} - сумарні затрати; P -



надійність (імовірність безвідмовної роботи)

Очевидно, існує деяка оптимальна надійність, до якої необхідно наближатися. У цьому випадку буде досягнуте найкраще співвідношення затрат на виготовлення і експлуатацію виробу.

9.2. Надійність об'єктів і систем та їх ефективність

В процесі проектування, як правило, розглядається декілька варіантів конструкції технічного об'єкта чи технічної системи, з яких потім вибирають найкращий. Для їх порівняння вводять критерії ефективності, які можуть бути різними.

Ефективність – це ступінь відповідності об'єкта або системи цільовому призначенню у певних умовах експлуатації, а критерієм ефективності є певний кількісний показник, який застосовують для оцінювання і порівняння варіантів об'єктів чи систем. Розрізняють показники якості функціонування і вихідний ефект системи. Показники

якості функціонування дають диференціальну, а вихідний ефект — інтегральну оцінку процесу експлуатації виробів.

Ефективність залежить від ряду факторів, у тому числі і від надійності складових елементів. Причому, для системи в цілому визначаються показники надійності і критерій ефективності, а для окремих елементів оцінка ефективності є не обов'язковою. Не варто, наприклад, розглядати ефективність застосування термопари або вакууметра, як складових автоматичної системи керування, технологічним процесам (АСК ТП), а визначення їх надійності є актуальною задачею.

Таким чином, для окремого технічного об'єкта, що має певне цільове призначення і самостійне застосування (АСК ТП, система передавання даних автоматичного контролю тощо) доцільно розглядати і надійність, і ефективність. А для частин об'єктів (датчик, перетворювач, реле та ін.) - лише надійність.

Для великої сукупності об'єктів (система мобільного зв'язку, АСК ТП, автоматизована система управління рухом поїздів тощо) доцільно визначати тільки ефективність, тому що при відмовах окремих їх частин тільки погіршуються властивості подібних комплексів.

Для оцінювання надійності об'єкта можуть застосовуватися різні показники. При їх виборі основним показником надійності треба вважати той, що найкраще характеризує об'єкт і входить до формули визначення ефективності.

Показники ефективності можуть бути імовірнісними, інформаційними, вартісними. Від цього залежить їх розмірність. Для інформаційних систем, наприклад, розмірністю можуть бути одиниці інформації, для обчислювальних систем – одиниці часу, для автоматичних систем – безрозмірні, тому що для них доцільно визначати імовірність виконання ними заданих функцій.

Зв'язок між критерієм ефективності і надійністю складових об'єкта чи системи можна визначити двома способами:

1. Інколи можна оцінити зниження ефективності виробу внаслідок недостатньої надійності. Тоді показники надійності окремих елементів або системи враховуються при визначенні показника ефективності. Для цього обчислюються два його значення: бажане(ідеальне) B_0 при абсолютно надійній системі і реальне B , яке відповідає фактичній надійності об'єкта чи системи.

$$\text{Різниця} \quad \Delta B = B_0 - B, \quad (9.1)$$

$$\text{або відношення} \quad \Delta B / B_0 = (B_0 - B) / B_0, \quad (9.2)$$

$$\text{чи} \quad B / B_0 \quad (9.3)$$

характеризують зниження ефективності внаслідок недостатньої надійності системи.

2. Розраховують показник надійності технічної системи з оцінкою змін її ефективності у процесі роботи. Відмовою вважається випадок,

у якому значення ефективності роботи виявляється меншим від граничного значення. Показник надійності у цьому випадку є характеристиками часу непрацездатного стану, в якому значення показника ефективності роботи є меншим, ніж граничне.

При оцінці ефективності системи виділяють дискретні стани, в яких може знаходитися система. Тоді показник ефективності доцільно визначати за формулою математичного сподівання:

$$B = \sum_{i=1}^q B_i P_i, \quad (9.4)$$

де q - множина станів системи; B_i - умовний показник ефективності, який мала б система, опинившись у i -му стані; P_i - імовірність перебування системи у i -му стані.

Для великої кількості систем (зв'язку, обчислювальних машин, АСК ТП та ін.) часто застосовують економічні показники ефективності:

1. Прибуток за одиницю часу

$$\Pi = B - W_E, \quad (9.5)$$

де W_E - величина експлуатаційних витрат за одиницю часу.

Величина вихідного ефекту B є доходом D за одиницю часу, що отриманий від експлуатації об'єкта чи системи об'єктів.

2. Термін окупності

$$\tau_{ok} = \frac{W_K}{B - W_E}, \quad (9.6)$$

де W_K - величина капітальних витрат, що визначається в грошових одиницях.

3. Повні витрати за час T_c експлуатації системи

$$W = W_K + T_c(W_E + \Delta B), \quad (9.7)$$

де ΔB враховує зміну ефективності системи при використанні одного та іншого її варіанта.

Для однакових систем з різними умовами експлуатації можуть обиратися різні показники ефективності.

Приклад. Сервер утворює мережу для обміну інформацією з трьома підрозділами, яка підтримує роботу $N = 240$ комп'ютерів. Підрозділ 1 має $n_1 = 120$, підрозділ 2 - $n_2 = 80$, підрозділ 3 - $n_3 = 40$ комп'ютерів. Імовірності безвідмовної роботи сервера з кожним із підрозділів протягом наробітку $(0, t_i)$ відповідно дорівнюють: $P_1(t_i) = 0,96$; $P_2(t_i) = 0,98$; $P_3(t_i) = 0,99$.

Дохід від експлуатації кожного комп'ютера в мережі протягом 10 годин складає $d = 2$ у євро. Якщо комп'ютер втрачає можливість роботи в мережі, дохід від нього втрачається.

Треба визначити середню величину очікуваного реального доходу D , середню величину втрати доходу і середній відсоток $\left(\frac{\Delta D}{D_0} \cdot 100\%\right)$ втрати доходу

при експлуатації мережі за рахунок ненадійності підрозділу протягом $t_i = 10$ годин роботи. Тут D_0 - ідеальний дохід.

Розв'язок. Середня величина втрати доходу

$$\Delta D = D_0 - D.$$

Величина ідеального доходу складається з доходу від експлуатації усіх комп'ютерів.

$$D_0 = Nd = 240 \cdot 2 = 480 \text{ євро.}$$

Для визначення реального доходу врахуємо усі можливі стани системи обміну інформацією (табл. 9.1). Літера "П" у таблиці означає, що розглядуваний підрозділ працездатний, літера "В" є ознакою його відмови. Для даного прикладу відмовою комп'ютера варто вважати власне його відмову і також неможливість для нього працювати у мережі.

Відмовою підрозділу — відмову хоча б одного, його комп'ютера.

Таблиця 9.1

Працездатність комп'ютерів у підрозділах

Підрозділ	Стан							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	П	П	П	В	П	В	В	В
2	П	П	В	П	В	В	П	В
3	П	В	П	П	В	П	В	В

Оскільки восьмий стан передбачає відмови усіх підрозділів, а отже, нульовий дохід, цей стан не враховуватиметься при визначенні реального доходу. Отже, реальний дохід:

$$D = d \sum_{k=1}^7 (N - n_k) P_k(t_i), \quad (9.8)$$

де k - кількість можливих станів системи обміну інформацією; n_k - кількість комп'ютерів підрозділу, які відмовили; $P_k(t_i)$ - імовірність виникнення k -го стану у момент часу t_i .

$$D = d \left\{ \begin{aligned} &NP_1(t_i)P_2(t_i)P_3(t_i) + (N - n_3)P_1(t_i)P_2(t_i)[1 - P_3(t_i)] + (N - n_2) \times \\ &\times P_1(t_i)P_3(t_i)[1 - P_2(t_i)] + (N - n_1)P_2(t_i) \times P_3(t_i)[1 - P_1(t_i)] + (N - n_2 - n_3) \times \\ &\times P_1(t_i) - [1 - P_2(t_i)][1 - P_3(t_i)] + (N - n_1 - n_2)P_3(t_i)[1 - P_1(t_i)][1 - P_2(t_i)] + \\ &+ (N - n_1 - n_2)P_2(t_i) \times [1 - P_1(t_i)][1 - P_3(t_i)] \end{aligned} \right\} \quad (9.9)$$

Після підстановки числових значень у (9.9) показники ефективності будуть такими: $D_0 = 466 \text{ €}$; $\Delta D = 14 \text{ €}$; $\frac{\Delta D}{D_1} \cdot 100\% \approx 3\%$.

9.3. Економічні показники надійності

Підвищення безвідмовності і довговічності машин зв'язане з однієї сторони, з додатковими матеріальними витратами, а з другої — з підвищенням ефективності капітальних вкладень, зменшенням витрат на ремонт, підвищенням продуктивності машин.

Критерієм ефективності підвищення надійності може служити сума затрат, пов'язаних з виготовленням і експлуатацією технічного об'єкта віднесена до терміну його доцільної експлуатації:

$$K_e = \frac{Q_B + Q_e}{T_e}; \quad (9.1)$$

де K_e - економічний показник надійності, грн/год;

Q_B - вартість виготовлення нового виробу, грн;

Q_e - сумарні витрати на експлуатацію, ремонт, обслуговування;

T_e - термін доцільної експлуатації виробу, год.

Цей показник повинен бути мінімальним, що можна забезпечувати за рахунок раціонального розподілу капіталовкладень між сферою виробництва і сферою експлуатації.

При інших рівних умовах, чим дешевший виріб, тим більше затрат приходить на його експлуатацію. Наприклад, при зниженні вартості середньостатичного електродвигуна на 5% витрати на його експлуатацію зростають на 13%.

Співвідношення між вартістю виготовлення і експлуатації виробу характеризується коефіцієнтом експлуатаційних витрат:

$$K_{EB} = \frac{Q_B}{Q_B + Q_E} < 1; \quad (9.11)$$

де Q_B - затрати на виготовлення виробу;

Q_E - затрати на його експлуатацію;

Завжди більш висока надійність виробу досягається за рахунок додаткових затрат. У зв'язку з цим, часто користуються поняттям ціна надійності.

Загальні затрати на виготовлення виробу складаються з постійних затрат Q_n , які не залежать від вимог надійності і Q_H - змінних складових затрат, обумовлених вимогами надійності:

$$Q_b = Q_n + Q_H \quad (9.12)$$

Для прогнозування затрат, пов'язаних з підвищенням надійності, часто застосовують метод порівняння з прототипом на основі загальних емпіричних залежностей, отриманих в результаті обробки дослідних даних про ціну надійності. В багатьох випадках така залежність для ціни надійності Q_H має степеневий характер :

$$Q_H = Q_{H_0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^a, \quad (9.13)$$

де Q_{H_0} - ціна надійності аналога або прототипу виробу; T_0 - напрацювання на відмову (середній строк служби) прототипу; T - напрацювання на відмову виробу, що проектується; a - емпіричний показник, який характеризує рівень прогресивності виробництва з точки зору можливостей підвищення надійності ($a \approx 0,5 \div 1,5$).

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Назвіть десять основних показників якості виробів.
2. Яка роль показників надійності у забезпеченні якості технічних об'єктів?
3. Чому рівень стандартизації і уніфікації складових технічної системи впливає на рівень її надійності, довговічності та якості?
4. Від чого залежить конкурентоспроможність виробів?
5. Дайте визначення поняття «ефективність технічного об'єкта» і охарактеризуйте його зв'язок з надійністю.
6. Якими бувають показники ефективності об'єктів і систем? Який порядок їх визначення?
7. Як визначити оптимальний рівень надійності технічного об'єкта?
8. Охарактеризуйте інформативність економічного показника надійності.
9. Як збільшити коефіцієнт експлуатаційних витрат виробу у період його виготовлення і експлуатації?
10. Як розрахувати ціну надійності нового технічного об'єкта за відомою ціною надійності аналога?

[перейти до змісту](#)

10. Корозія обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв

10.1. Основні види корозії

Корозія - руйнування металів і сплавів під впливом зовнішнього середовища. Вона завжди 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. 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 спричинитись 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. 10.1).

Найбільш імовірно, що зона нарощування товщини знаходиться всередині плівки і вона потовщується за рахунок переміщення до неї, з 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. 10.2) згодом переходить у горизонтальну пряму (рис. 10.2, а). Якщо ж плівка лише частково захищає поверхню, то крива має параболічну форму (рис. 10.2, б) і якщо вона зовсім не спроможна захищати виріб, то крива переходить у пряму (рис. 10.2, 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

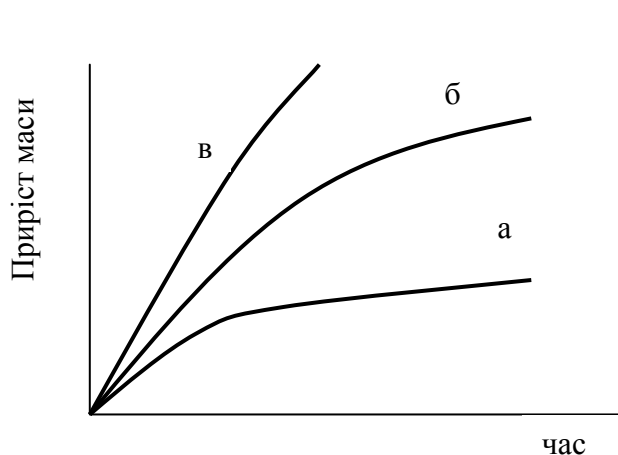


Рис. 10.2. Схема приросту маси плівок при окисленні поверхні металу

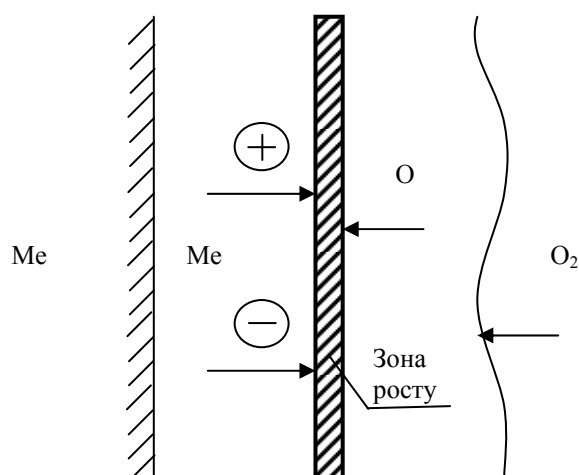


Рис. 10.1. Схема утворення захисних плівок на металевій поверхні

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 через електричного струму кородуючий метал і електроліт, у якому він знаходиться. У відповідності з сучасними уявленнями, в металі завжди існують напіввільні електрони, які постійно рухаються. Вони 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 двоїста природа 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. 10.3).

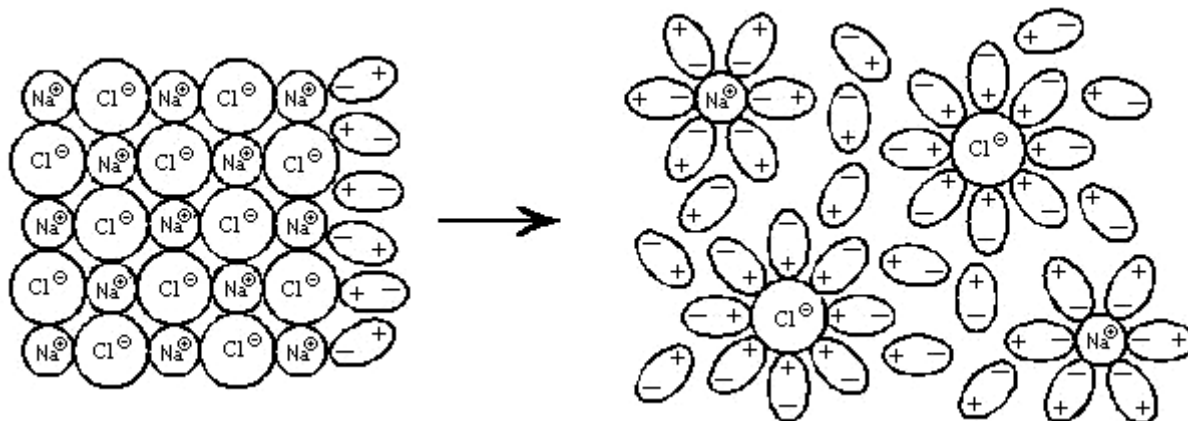


Рис. 10.3. Гідратація катіонів та аніонів повареної солі полярними молекулами води

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**.

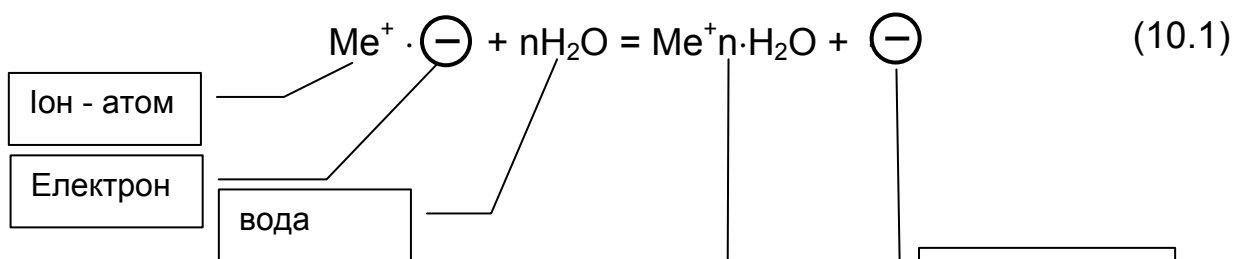
10.2. Вплив середовищ – електролітів на корозійні процеси

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

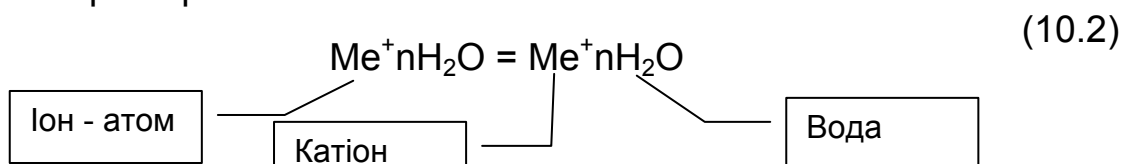
розчин, іони з'єднуються з диполями води і стають гідратованими іонами:



По мірі утв. Гідратований іон к-іонів на М ерхні накопичуються надлишкові електрони, які чинять все більший опір відриванню позитивних іонів. Позитивні іони, що перейшли у розчин, створюють також електростатичний опір переходу 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.10.4).

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. 10.5).

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.

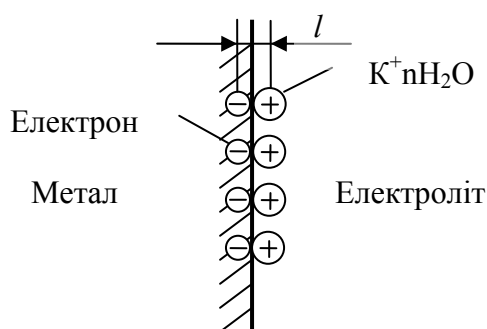


Рис. 10.4. Виникнення негативного електродного потенціалу металу

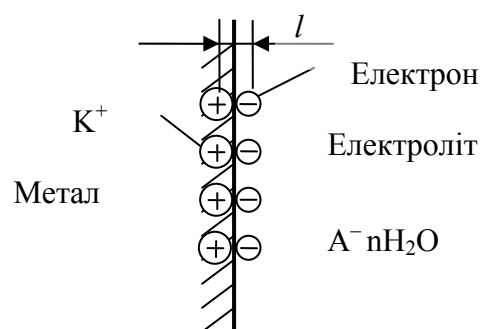


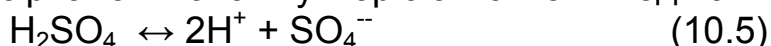
Рис. 10.5. Виникнення позитивного електродного потенціалу металу

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.

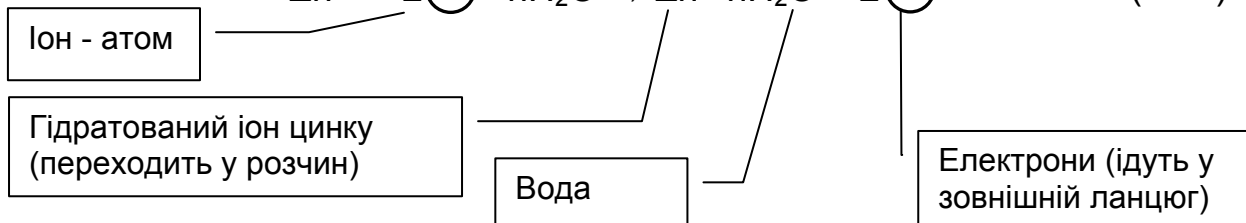
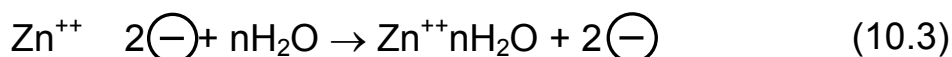
За умовами так званої деполяризації можна виділити два види електрохімічної корозії: з водневою та кисневою деполяризацією.

Корозія з водневою деполяризацією характеризується виділенням газоподібного водню. Наприклад, електроди з Zn і Cu зануримо в розчин H_2SO_4 (рис. 10.6). 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:

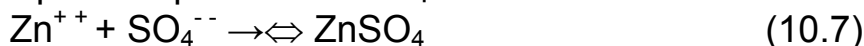


Вивільнені при цьому електрони рухаються від анода до катода:



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. 10.7). Деполяризація, тобто відвід електронів із катода, відбувається за рахунок взаємодії електронів з киснем і водою за схемою:

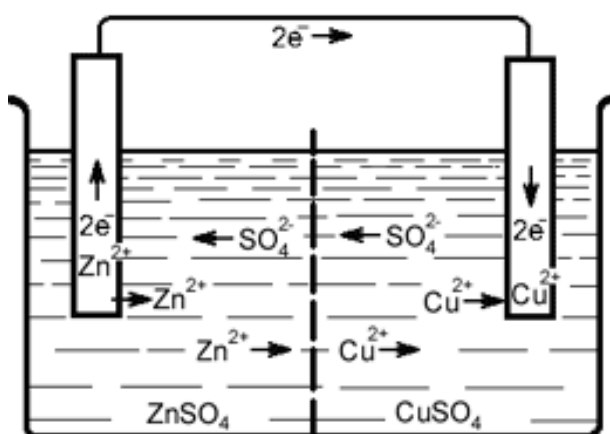
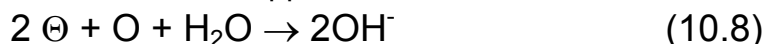


Рис. 10.6. Електродні процеси у гальванічному елементі з водневою деполяризацією

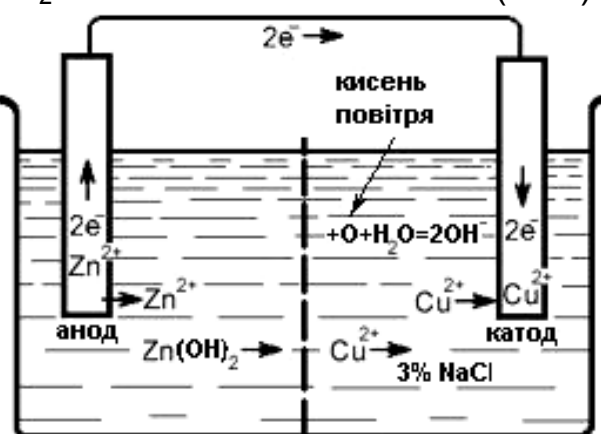
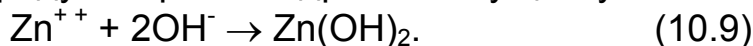


Рис. 10.7. Електродні процеси у гальванічному елементі з кисневою деполяризацією

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 різнорідних металів і сплавів, що мають різко відмінні електродні потенціали (сталь у контакті з міддю або магнієвими сплавами).

10.3. Вплив деяких чинників на корозійне руйнування металів

Пасивування металів – це 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÷0,5В, а в пасивному стані його потенціал зміщується до +1В.

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.

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.

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.

10.8). 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.

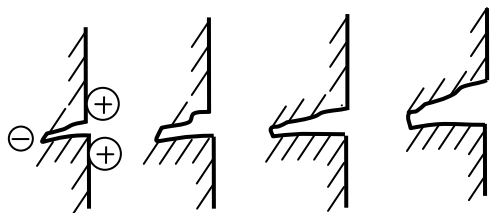


Рис. 10.8. Руйнування поверхні металу в умовах корозійної втоми

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 в глиб 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.

10.4. Види корозійних руйнувань

Розрізняють такі основні різновиди корозії рівномірна, місцева, міжкристалітна.

При рівномірній корозії (рис. 10.9,а) руйнування відбувається майже рівномірно по всій поверхні деталі. **При місцевій** (рис. 10.9,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. 10.9,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. 10.9,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.

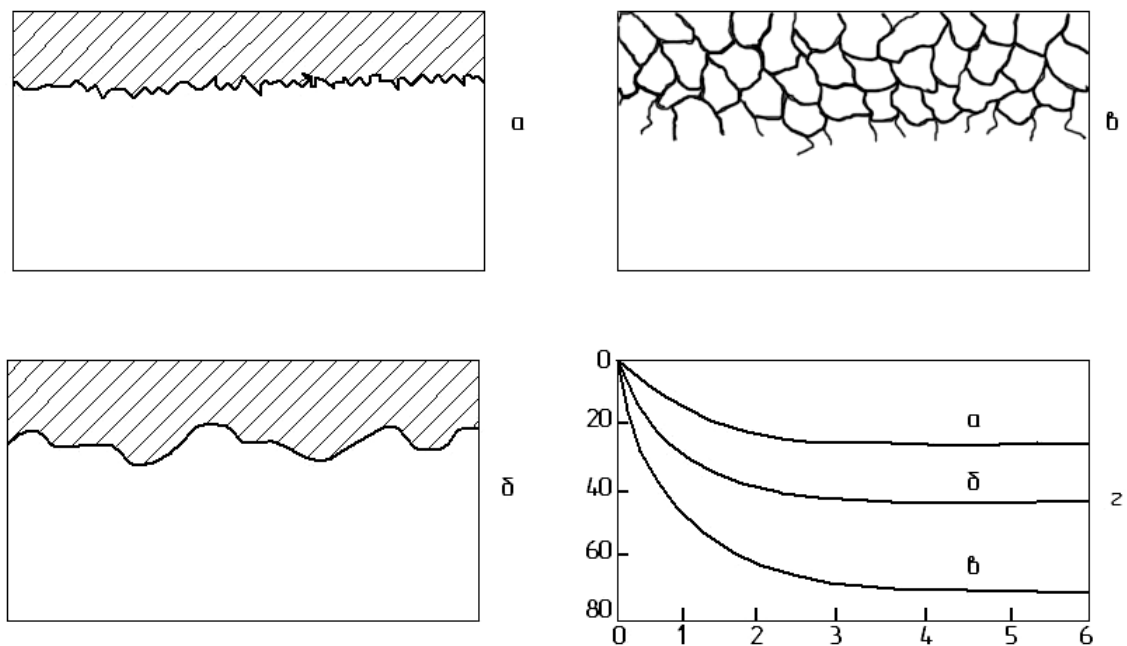


Рис. 10.9. Види корозії металевих сплавів: а- рівномірна, б- місцева, в- міжкристалітна і графік залежності втрати міцності сталей від втрати маси

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.

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

10.5. Методи корозійних випробувань металів

Відомі методи визначення і оцінки корозійної стійкості металів та сплавів розділяються на якісні і кількісні.

Якісні 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.

Кількісні методи. До числа найбільш поширених з них 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.

10.6. 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, мурав'їна, 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 рН6,0 до рН4,2. Тому такі середовища є агресивними.

О. Авдєєва досліджувала корозійну стійкість деяких матеріалів у заквасці для житнього тіста при температурі 22 °С та в борошняному кислому пшеничному заторі при температурі 54 °С, рН3,5 (табл. 10.1).

Таблиця 10.1

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 таблиці 10.1 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. 10.2 приведені результати випробувань матеріалів у кислому пшеничному заторі.

Таблиця 10.2

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.

10.7. Корозія металів у спиртовій промисловості

Етиловий спирт і його напівфабрикати (напівпродукти) є корозійноактивними 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. Авдєєва 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 (10X13, 10X17 і 12X18Н9Т), алюміній А-00.

Кращою виявилася сталь 12X18Н9Т, що не піддається міжкристалітній корозії, пластична, добре зварюється і дає корозійностійкий зварний шов. У сталей 10X13 і 10X17 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, надають 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.

10.8. Корозія обладнання лікєро-горілчанних заводів

О. Авдєєва досліджувала нержавіючі сталі, сталь Ст3 і емальовану сталь Ст3, сірий чавун і сталь Ст3, плаковані сталлю 12X18Н9Т 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 12X18Н9Т виявилася найстійкішою. Деяко меншу стійкість мала сталь 10X17Т. Добрі результати показали при випробуваннях в усіх середовищах емалеві покриття.

10.9. Корозія в пивоварному виробництві

Хімічний склад пива може коливатися залежно від його сорту і вихідної сировини. З практики відомо, що пиво і сушло - 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, сушварочні 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 сушло 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 сушла рекомендується виробляти з нержавіючої сталі, міді, фосфористої бронзи і деяких інших матеріалів, корозійностійких у пивному суслі.

Зброджування сушла 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:

- У середовищах пивоварного виробництва сталь Ст3 піддається нерівномірному корозійному руйнуванню, а сірий чавун – структурно-вибірковій корозії.
- Чорні метали в суслі нестійкі і погіршують якість пива.
- Алюміній А-1 абсолютно стійкий в умовах зброджування сушла і застосовується в лагерних танках і танках для транспортування пива.
- Корозійностійкі в цих умовах мідь, латунь, фосфористая бронза, олово, нержавіючі сталі 10Х17Т і 12Х18Н9Т та хромистий чавун (17% Cr).
- Від значної кількості кольорових металів треба, по можливості, відмовлятися через їх дефіцитність і велику вартість.
- Емалеві покриття добре захищають сталі від корозії.

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

10.10. Корозія сталей в середовищах фармацевтичних виробництв

10.10.1. Об'єкти і методи досліджень

Для оцінки корозійної стійкості нержавіючих сталей в середовищах фармацевтичних та мікробіологічних виробництв були застосовані такі методи: візуальний огляд зразків з метою визначення характеру корозійного ураження; визначення глибини корозійного руйнування при локальних видах корозії; електронно-мікроскопічний контроль структури покриттів і сталей в процесі досліджень, електрохімічний метод оцінки корозійної стійкості сталей.

Гравіметричний метод використовували при визначенні швидкості корозії металів за зміною маси зразків після їх експозиції в агресивному середовищі. Дослідження проводили за стандартними методикам в лабораторних умовах. Тривалість досліджень склала 1000 годин. Оцінку корозійної стійкості матеріалів проводили у відповідності із стандартизованою десятибальною шкалою корозійної стійкості. В тому випадку, коли корозія мала місцевий характер, її оцінювали за глибиною і кількістю корозійних уражень на одиницю поверхні за допомогою індикатора годинникового типу.

Після експозиції у агресивному середовищі зразки також піддавали ретельному візуальному огляду за допомогою лупи з 8-10 кратним збільшенням для встановлення характеру корозійних руйнувань. Швидкість корозії K розраховували за формулою:

$$K = \frac{m_0 - m_k}{S \cdot \tau}, \frac{г}{м^2 \cdot год}, \quad (10.10)$$

де m_0 - початкова маса зразка, г; m_k - маса зразка після корозійних досліджень, г; S - площа поверхні зразка, $м^2$; τ - тривалість випробувань, год.

Перерахунок швидкості K корозії на швидкість проникнення корозії Π проводили за формулою:

$$\Pi = \frac{8,76 \cdot K}{E}, \frac{мм}{рік}, \quad (10.11)$$

Коефіцієнт 8,76 розрахований виходячи з кількості годин у календарному році (8700), поділений на 1000.

Для визначення залежності швидкості розчинення металу від потенціалу був використаний електрохімічний метод досліджень. Потенціодинамічні анодні криві знімали за допомогою потенціостата (рис. 10.10) і реєструючого потенціометра за стандартними методиками, які досить детально викладені у підручниках з електрохімії.

Дослідження проводили у скляній трьохелектродній комірці об'ємом 0,5. Робочі електроди із досліджуваних марок сталей були виготовлені циліндричними (площа досліджувальної поверхні 1,5-2,0 см²) з внутрішньою різьбою і з'єднані з електротримачем, який ізолюваний від робочого середовища склом і фторопластом. Поверхня електродів мала дзеркальний блиск.

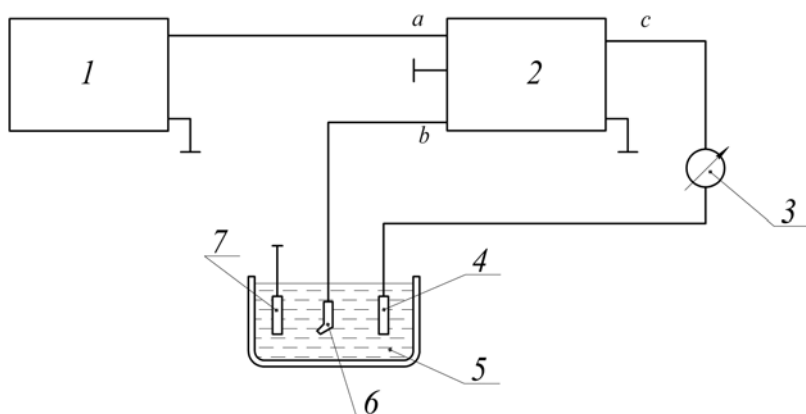


Рис. 10.10. Спрощена схема електро-хімічних досліджень за допомогою потенціостата: 1- задатчик потенціалу; 2- підсилювач; 3- вимірювач струму; 4- допоміжний електрод; 5- електрохімічна комірка; 6- електрод порівняння; 7- досліджуваний електрод.

Як електрод порівняння був використаний хлорсрібний електрод, що знаходився у розчині хлориду калію. З'єднання просторів робочого електрода і електрода порівняння здійснювалось за допомогою електролітичного ключа, кінець якого (капіляр Лuggіна) був підведений до поверхні робочого електроду на відстань 1мм. Всі потенціали реєструвались відносно нормального водневого електрода. Допоміжним електродом у електрохімічних дослідженнях був електрод із платини.

Модельні розчини для досліджень готували у відповідності з вимогами до фармацевтичних препаратів, тобто використовували хімічні реактиви і розчинники відповідної чистоти.

Потенціодинамічні анодні криві знімали, починаючи від стаціонарного потенціалу робочих електродів. За величиною сили струму корозії і по розташуванню стаціонарного потенціалу ($E_{ст}$) на потенціодинамічній кривій робили висновок про характер та інтенсивність корозійного процесу.

Принцип дії потенціостата оснований на тому, що при проходженні через електрохімічну комірку струму, потенціал досліджуваного електрода залежно від величини і напрямку струму зміщується в той чи інший бік. При виникненні струму, що проходить через комірку у напрямку від робочого до допоміжного електрода, потенціал робочого електрода зміщується в бік додатніх значень відносно потенціалу допоміжного за відсутності струму поляризації ($\phi_1=0$), а при проходженні струму протилежного напрямку - в бік більш від'ємних значень.

Було досліджено ряд економнолегованих і безнікелевих сталей з метою заміни ними високолегованої сталі 12X18H10T для виготовлення більш дешевого і надійного обладнання,

корозійностійкого в середовищах фармацевтичних і мікробіологічних виробництв.

Досліджені економнолеговані сталі марок 08X22Н6Т, 08X18Г8Н2Т, безнікелева сталь 10X13Г18Д, а також, для порівняння, сталь 12X18Н10Т, яка є однією з основних для виготовлення обладнання хіміко-фармацевтичної промисловості.

Для досліджень на загальну корозію вибирали зразки у вигляді пластин з сталей 12X18Н10Т, 08X22Н6Т, 08X18Г8Н2Т, 10X13Г18Д, а також пластин зі зварними з'єднаннями з тих же сталей. Хімічний склад досліджених сталей поданий у табл. 10.3.

Таблиця 10.3

Хімічний склад досліджених сталей

Марка сталі	Вміст легуючих елементів, %					
	Вуглець (С)	Хром (Х)	Нікель (Н)	Титан (Т)	Марганець (Г)	Мідь (Д)
12X18Н10Т	≤0,12	17-19	9-11	5.С-0,8	≤2,0	-
08X22Н6Т	≤0,08	21-23	5,3-6,3	5.С-0,65	≤0,8	-
08X18Г8Н2Т	≤0,08	17-19	1,8-2,8	0,2-0,5	7,0-9,0	-
10X13Г18Д	≤0,10	12-14	-	-	17-19	0,4-0,6

Заміна високонікелевої сталі 12X18Н10Т економнолегованими і безнікелевими сталями для виготовлення деталей обладнання хіміко-фармацевтичних виробництв можлива за умови вивчення корозійного впливу технологічних середовищ, що контактують з ними. Тому для корозійних досліджень були вибрані найагресивніші середовища галузі:

- Настоянки, екстракти, спирт різних концентрацій (табл. 10.4).
- Таблеткові маси (табл. 10.5).

Таблиця 10.4

Спиртовмісні лікарські середовища

№ п/п	Назва середовища	Склад
1	Етиловий спирт	40 %, 50 %, 70 %, 80 %
2	Настоянка полину	Спирту не менше 64 %
3	Настоянка валер'янки	Спирту не менше 65 %
4	Екстракт елеутерококу рідкий	Спирту не менше 30 %
5	Екстракт бояришнику рідкий	Спирту не менше 55 %

Таблиця 10.5

Таблеткові лікарські середовища

№ п/п	Назва препарату	Хімічна назва основної речовини	Склад лікарської форми
1	Анаприлін	1 - ізопропіламіно - 3 - (1-нафтокси)-2-пропанолу гідрохлорид	Анаприлін-0,01 г, допоміжні речовини-0,04 г
2	Ізадрин	Ізопропіладреналіну	Ізадрин-0,005 г,

		гідрохлорид	Допоміжні речовини до 0,1 г
3	Таблетки Петрова	Хлорид натрію	Натрію хлорид-0,6 г, Калію хлорид-0,02 г, Кальцію хлорид-0,01г,
4	Таблетки Рінгера-Локка	Хлорид натрію	Натрію хлорид-0,6 г, Калію хлорид-0,02 г, Кальцію хлорид-0,02г, Натрій двохвуглекислий-0,01 г, Глюкоза-0,1 г
5	Калію йодид	Калію йодид	Калію йодид-0,5 г
6	Дипразин	10-(2-диетиламінпропіл)- фенотіазину гідрохлорид	Дипразин-0,025 г, Допоміжні речовини до 0,1 г
7	Трифтазин	2-трифтометил-10 (3-/1-метилпілеразініл 4/пропіл) фенотіазину дигідрохлорид	Трифтазин-0,01 г, допоміжні речовини до 0,1 г
8	Глюкоза	Глюкоза	
9	Ацетилсаліци лова кислота	Саліциловий ефір оцтової кислоти	Ацетилсаліцилова кислота-0,5 г, допоміжні речовини- достатня кількість

10.10.2. Корозійна стійкість безнікелевої сталі

В літературних джерелах дані про корозійну стійкість безнікелевої сталі 10X13Г18Д (ДИ-61) обмежені. Тому були проведені дослідження по вивченню корозійної стійкості цієї сталі у середовищах різної хімічної природи (воді, розчинах кислот, лугів, солей, водяних спиртових розчинах, настоянках і екстрактах) для її використання замість сталі 12X18Н10Т при виготовленні деталей технологічного обладнання фармацевтичних та мікробіологічних виробництв.

Результати досліджень наведені у табл. 10.6 і 10.7. Типові залежності швидкостей проникнення корозії від часу експозиції зразків, що характерні для всіх досліджуваних середовищ, подані на рис. 10.11 і 10.12.

Дослідження показали, що при порівняно невисоких швидкостях проникнення корозії всі розчини, за виключенням спиртових і дистильованої води, при контакті зі сталлю ДИ-61 змінили свої якісні параметри (див. табл. 10.6 і 10.7). Характер корозії сталі в досліджуваних середовищах, за виключенням розчинів 0,1 N соляної кислоти і 0,9 % хлориду натрію, - рівномірний, а в розчинах 0,1 N соляної кислоти і 0,9 % хлориду натрію досліджувана сталь піддається піттинговій корозії, причому швидкості корозії в цих розчинах різні.

Корозійна стійкість сталі ДІ-61 у різних агресивних середовищах

№ п/п	Агресивне середовище	Температура, °С	Характер корозії	Проникненість корозії, $\Gamma \cdot 10^{-3}$, мм/рік	Група стійкості		Характеристика середовища після досліджень
					Балів	Назва	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Розчин хлориду натрію 0,9 %	20	Піттинговий	4,6	2	—	Розчин пожовтів, містить бурий осад
2	Соляна кислота	20		108	6	—	Розчин яскраво-блакитного кольору
3	Гідрооксид натрію	20	Рівномірний	1,0	1	Зовсім стійкий	Розчин пожовтів
4	Розчин новокаїну 0,5 N	20		2,0	2	Досить стійкий	—
5	Вода дистильована	20		1,1	1	Зовсім стійкий	Без змін
6	Вода дистильована при 100 °С	100		3,2	2	Досить стійкий	Пожовтіла
7	Вода водопровідна	20		7,8	3	Досить стійкий	Пожовтіла
8	Етанол 40 %, 50 %, 70 %, 80 %	20		5,4-9,2	3	—	Без змін

Корозійна стійкість сталі ДИ-61 в настоянках і екстрактах

№ п/п	Назва середовища	Характер корозії	Проникненість корозії, П·10 ⁻³ мм/рік	Бал стійкості	Група стійкості	Кількість екстрактивних речовин		Характеристика розчинів після дослідження
						до дослідження	після дослідження	
1	Настоянка валер'янки	Рівно мірний	7,5	1	Зовсім стійкий	9,7	9,6	Без змін
2	Настоянка полину	—	15,1	2	Достійкий	9,7	8,6	Велика кількість осаду, що випадає
3	Екстракт елеутерококу	—	5,6	2	Достійкий	7,3	7,3	Без змін
4	Екстракт глоду	—	5,2	1	Зовсім стійкий	2,1	2,1	Теж

В 0,1 N розчині соляної кислоти сталь ДИ-61 має невисоку стійкість через те, що в ній замало легуючих елементів, які збільшують стійкість сталей в хлормістких середовищах (хрому, титану). Такий розчин після контакту зі сталлю за фарбувався у блакитний колір завдяки процесу іонізації міді, яка входить до складу сталі 10X13Г18Д (ДИ-61), з утворенням хлориду міді. Дослідження корозійної стійкості цієї ж сталі у дистильованій воді показали, що збільшення температури з 25°C до 100°C призводить до зростання швидкості проникнення корозії у 3 рази і до зміни кольору розчину. Корозійна стійкість дослідженої сталі у водопровідній воді виявилась у 7 разів нижчою, ніж у дистильованій, що пояснюється присутністю у водопровідній воді різних солей та іонів хлору, які сприяють розвитку корозії.

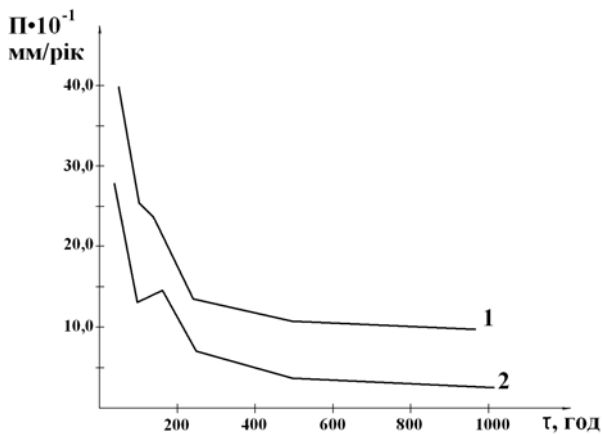


Рис. 10.11. Залежність швидкості проникнення корозії у сталь 10X13Г18Д від часу експозиції в настоянці полину (1) і 80% етиловому спирті (2)

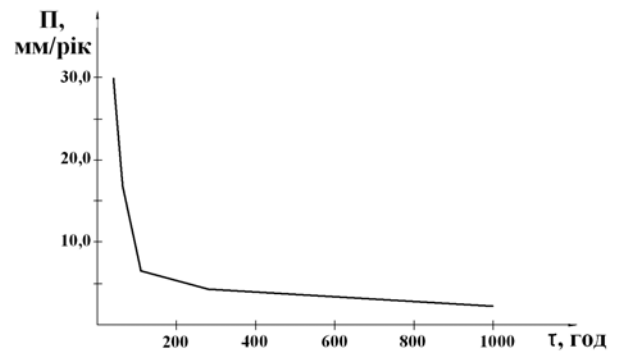


Рис. 1.12. Залежність швидкості корозії сталі 10X13Г18Д від часу експозиції у 0,1N розчині соляної кислоти

Висока корозійна стійкість сталі у спиртових розчинах різних концентрацій дозволяє рекомендувати ДИ-61 для виготовлення деталей апаратів, які застосовується в технологіях виготовлення настоянок і екстрактів (табл. 10.7. і рис. 10.11). Результати цих досліджень дозволяють зробити наступні висновки:

- Сталь ДИ-61 має високу корозійну стійкість. Характер корозійних ушкоджень рівномірний, а їх швидкість зменшується зі збільшенням часу експозиції в агресивних середовищах.

- Настоянки і екстракти, за виключенням настоянки полину, не змінили в умовах контактування з сталлю своїх якісних характеристик.

- Контакткування з настоянкою полину протягом 1000 годин викликав помітне (на 1,1 %) зниження вмісту екстрактивних речовин. Якщо перерахувати цю величину на час відстоювання настоянок і екстрактів (відповідно з технічними вимогами - протягом трьох діб), то зменшення кількості екстрактивних речовин можна знехтувати (0,1 %).

Таким чином, враховуючи високі вимоги до чистоти лікарських препаратів, зміна параметрів якості розчинів, що контактують зі сталлю ДИ-61, робить непридатним її використання для виготовлення обладнання, поверхня якого буде омиватися водяними розчинами лугів, кислот і галогенвмісних солей. У зв'язку зі зміною якості дистильованої води після контакту зі сталлю ДИ-61 не рекомендується використання обладнання, виготовлене із цієї сталі, для експлуатації у водяних середовищах, особливо при підвищених температурах. Разом з тим, сталь ДИ-61 успішно може бути застосована для апаратного забезпечення виробництва настоянок і екстрактів та бути рівноцінним заміником сталі 12X18H10T.

10.10.3. Корозійна поведінка економнолегованих сталей у розчині хлориду натрію

В літературі є цілий ряд даних про корозійну стійкість різних матеріалів у розчинах хлориду натрію. Так, в роботах А. Поздєєвої показано, що вуглецеві (сталь 10 і 20) та економно леговані (12ХНФА, 30ХГСА) сталі піддаються у цих розчинах інтенсивній корозії точково-виразкового характеру, починаючи з концентрації хлориду натрію 0,001%, і непридатні для виготовлення фармацевтичного і мікробіологічного обладнання, у якому переробляються подібні розчини. Дослідження Г. Уліга показали, що з підвищенням концентрації хлористого натрію швидкість корозії сталі збільшується, досягаючи максимуму при 3 %-ному його вмісті у воді, а потім знову знижується, а в насиченому 26%-вому розчині, зменшується до менших значень, ніж в дистильованій воді. Така поведінка сталі пояснюється зміною захисних властивостей дифузійно-бар'єрної плівки іржі, що утворюється на сталі. При підвищенні концентрації хлориду натрію у розчині поступово зменшується розчинність у ньому кисню, що спричиняє перехід поверхні металу у пасивний стан і знижує швидкість корозії.

В літературних джерелах є дані про стійкість деяких сталей у 3%, 20% і насиченому розчинах NaCl. У цих середовищах при температурах кипіння і при 20⁰C сталі 08X13, 12X13, Ст3, 15XСНД, 12Н17, 14X17Н2 є нестійкими і піддаються інтенсивній точковій корозії. У 3 % і 20 % розчинах NaCl при температурі 20⁰C добре протидіють корозії сталі 08X22Н6Т, 12X18Н10Т, 10X17Н13М2Т, а у насиченому розчині NaCl ці матеріали інтенсивно кородують. Таким чином, корозійна стійкість металів залежить від концентрації хлориду натрію і від температури розчину.

Авторами досліджені корозійні і електрохімічні характеристики нержавіючих сталей у розчинах хлориду натрію різних концентрацій (0,9 %; 2 %; 10 %) і температурах 20⁰C і 80⁰C (рис. 10.13 і 10.14). У цих розчинах на анодних потенціодинамічних кривих для сталей існують дві характерні області: пасивного стану і пітингоутворення. При 20⁰C стаціонарний електродний потенціал $E_{ст}$ у 0,9 % розчині NaCl для всіх досліджених сталей знаходиться в області пасивації, що забезпечує низькі значення струмів розчинення. Значення ж стаціонарного потенціалу $E_{ст}$ і потенціалу поляризації $E_{пол}$ суттєво відрізняються. Це свідчить про достатній опір високонікелевої та економнолегованих сталей пітинговій корозії, що відповідає результатам гравіметричних досліджень.

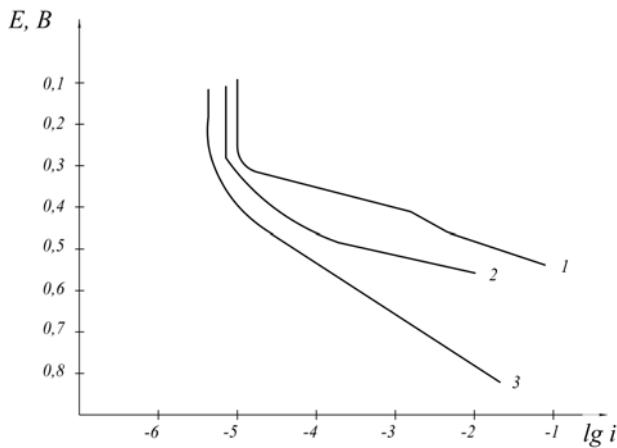


Рис. 10.13. Анодні потенціодинамічні криві сталей 12X18H10T (1), 08X22H6T (2), і 08X21H6M2T (3) у 2 % розчині хлориду натрію при температурі 20 °С

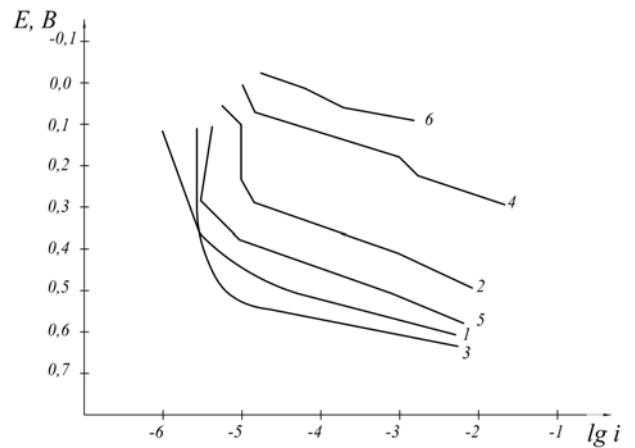


Рис. 10.14. Анодні потенціодинамічні криві сталі 08X22H6T у розчинах хлориду натрію 0,9 % (1,2); 2 % (3,4) і 10 % (5,6) при температурах 20 °С (1, 3, 5) і 80 °С (2,4,6).

Збільшення концентрації розчинів хлориду натрію і температури відбивається на корозійній поведінці сталей таким чином (рис. 10.14): значення $E_{ст}$ зсуваються у бік більш від'ємних значень; збільшується струм розчинення; різниця між значеннями $E_{ст}$ і $E_{пол}$ зменшується, збільшуючи схильність сталі до піттингової корозії.

Встановлено, що більш стійкою до піттингової корозії у розчинах хлориду натрію 0,9 % і 2 % при температурах 20 °С і 80 °С є сталь 08X21H6M2T, що є наслідком її легування молібденом, схильним до пасивації у галогеновмісних середовищах (рис. 1.13). У 10 %-ному розчині хлориду натрію при температурі 80 °С такої залежності не спостерігалось.

Сталь 12X18H10T виявилось більш стійкою до піттингоутворення у порівнянні сталлю 08X22H6T у 0,9 % і 10 % розчинах хлориду натрію. А у 2 % розчині спостерігався протилежний результат (див. рис. 10.13).

При 80 °С схильність до утворення піттингів зростала у послідовності 08X21H6M2T < 12X18H10T < 08X22H6T для випробувань у 2%-му розчині хлориду натрію. У 10 % розчині цієї солі всі досліджені сталі піддаються піттинговій корозії, про що свідчили близькі значення $E_{ст}$ і $E_{пол}$.

Таким чином, для виготовлення фармацевтичного і мікробіологічного обладнання, що працює у контакті із розчинами хлориду натрію можливе використання сталей 12X18H10T, 08X22H6T і 08X21H6M2T при веденні технологічних процесів при кімнатній температурі і концентрації хлориду натрію до 10%.

10.10.4. Стійкість нержавіючих сталей у таблеткових масах лікарських препаратів

Для застосування у реакційному і подрібнювальному обладнанні фармацевтичних і мікробіологічних виробництв важливою є оцінка

корозійної поведінки економнолегованих нержавіючих сталей у таблеткових масах у порівнянні з високолегованою 12X18H10T.

Досліджували корозійну стійкість сталей марок 08X22H6T, 08X18Г8Н2Т, 10X13Г18Д, а також базової сталі 12X18H10T (див. табл. 10.3) у таблеткових масах (див. табл. 10.5) різного хімічного складу. Це препарати, що містять хлорид-іони (анаприлін, ізадрин, дипразин, трифтазин, таблетки Петрова і Рідгера-Локка), сульфат-іони (феррокалі), вільний хлор (аквасепт, неоаквасепт, пантоцид), йодид-іони (йодид калію), речовини, що мають органічну природу (ацетилсаліцилова кислота, глюкоза). Експериментально було встановлено наступне:

- Швидкості корозії сталей 08X22H6T, 08X18Г8Н2Т, 10X13Г18Д в досліджуваних масах за величинами співрозмірні зі швидкостями корозії високонікелевої сталі 12X18H10T, за виключенням маси феррокалі, в якому найбільшу корозійну стійкість має сталь 12X18H10T. При зменшенні в сталях легуючих елементів, особливо нікелю і титану, швидкість корозії зростає в 2-4 рази ($P_{12X18H10T} < P_{08X22H6T} < P_{10X13Г18Д}$).

- Характер корозійних руйнувань економнолегованих сталей аналогічний характеру руйнувань 12X18H10T, за виключенням таблеткової маси Петрова, в якій економнолегована сталь була найбільш стійкою до піттингової корозії.

- Швидкості корозії досліджуваних марок сталей знижуються при збільшенні часу їх контактування з таблетковим масами, що свідчить про поступову пасивацію поверхонь металевих зразків. Приведена на рис.10.15 залежність швидкості від часу експозиції в ацетилсаліциловій кислоті типова для всіх досліджених таблеткових мас.

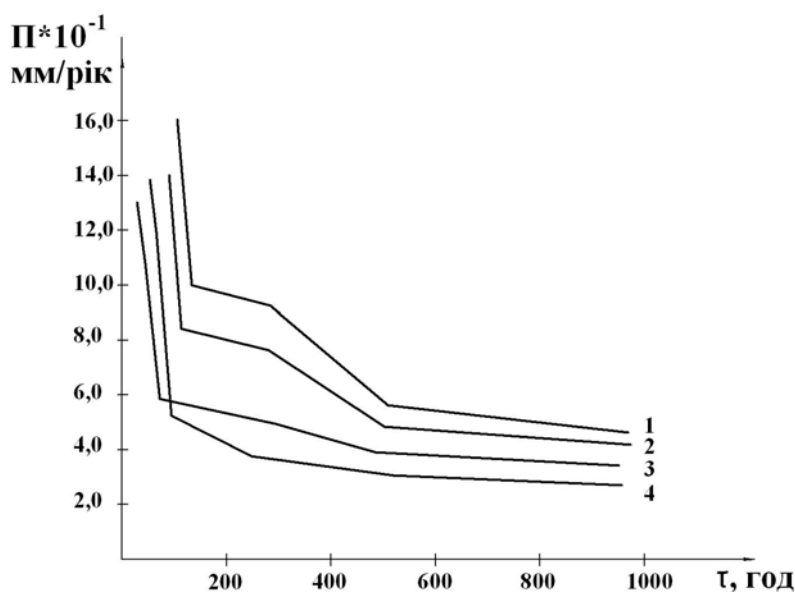


Рис. 10.15. Залежність швидкості проникнення корозії у сталі 08X18Г8Н2Т (1), 08X22H6Т (2), 10X13Г18Д (3), 12X18H10Т (4) від часу експозиції в ацетилсаліциловій кислоті

- Зміни зовнішнього вигляду таблеткових мас після контактування з економнолегованою сталлю 08X22H6T, аналогічні змінам після

контакту зі сталлю 12X18H10T. Виключенням є досить агресивна таблеткова маса Петрова, яка після контактування зі сталлю 08X22H6T містила продукти корозії, а після контактування зі сталлю 12X18H10T залишалась без видимих змін. Таблеткові маси після контактування зі сталями 10X13Г18Д і 08X18Г8Н2Т були забруднені продуктами корозії сильніше, ніж зі сталями 08X22H6T і 12X18H10T.

Звідси впливають наступні рекомендації:

- Для серійного обладнання таблеткових виробництв з середовищами середньої і високої агресивності, що містять хлорид-іони, можна застосувати сталь 12X18H10T поряд з економнолегованою 08X22H6T, яка виявилась в цих середовищах корозієстійкою і не вплинула на їх якість.

- В таблеткових масах високої агресивності (наприклад, феррокалі) сталь 12X18H10T має перевагу над економнолегованими сталями.

- Сталі 08X18Г8Н2Т і 10X13Г18Д можуть бути рекомендовані для виготовлення допоміжного обладнання (наприклад, збірників таблеток) і в таблеткових масах низької агресивності.

- В таблеткових масах, які в процесі контактування зі сталями змінили свій зовнішній вигляд і, відповідно, погіршили якість продукції варто експлуатувати не сталеве обладнання, а обладнання, виготовлене з полімерів, або металеве, покрите захисними полімерними покриттями.

10.11. Протикорозійні властивості титану

Титан і його сплави є одним з найбільш корозієстійких матеріалів в атмосферних умовах, у воді, лугах, розчинах багатьох солей, у більшості органічних і неорганічних кислотах. Їх висока корозійна стійкість пояснюється утворенням на поверхні захисних оксидних пасивуючих плівок, які досить міцні і самовідновлюються при порушенні їхньої цілісності. Проведені останнім часом дослідження показали можливість і доцільність застосування титану в харчовій промисловості.

Відомі приклади тривалої експлуатації різноманітного титанового харчового обладнання за кордоном. У США з титану виготовляють котли для ропи, томатних продуктів, соусів, які не руйнуються в цих середовищах. Виготовляються також титанові холодильники, які дали можливість зменшити витрати холодоагентів і збільшити їх робочий тиск. Фірма «Хейнз» виготовила й успішно експлуатує зварні титанові котли для соусів і кетчупів. У Японії з титанових сплавів виготовляють автоклави та інше обладнання для виробництва глютамінової кислоти. Є відомості, що листову сталь, плаковану титаном, використовували для виготовлення колон реакторів, теплообмінників, резервуарів тощо. Перегінний куб для виробництва спирту, необхідного для одержання

пектину, висотою 11,6 м і продуктивністю 45,4 л/хв із плакованої титаном сталі встановлений кампанією «Синкист Роверс Лимон Продакшн». Раніше цією кампанією вже були замінені два перегінних куби на титанові, тому що мідні куби при дистиляції інтенсивно кородували.

Систематизованих даних про стійкість титанових сплавів у харчових середовищах мало, а частина з них суперечлива. Б. Жалов, Ф. Товадзе і С. Манжгаладзе досліджували можливість застосування титанових сплавів марок АТ у виноробному, консервному і чайному виробництвах. Сплави АТ3 і АТ8 виявилися досить стійкими. Після річної роботи на цитрусовому комбінаті на всіх стадіях консервації слідів корозії деталей не було виявлено, консерви не змінили своїх органолептичних властивостей, переходу іонів металу в продукт не спостерігалось.

Високу корозійну стійкість і бактерицидність показали титанові сплави марок АТ у молоці і молочних продуктах, які після контактування з титановими сплавами зберігали свою якість набагато довше, ніж у тарі зі скла або з нержавіючої сталі. Але всі ці дослідження відносяться до сплавів марок АТ, хоча промисловістю найбільше освоєно виробництво сплаву ВТ1 - 0.

Ф. Товадзе, Т. Лашхи, а також С. Тюрин, С. Важенін досліджували поведінку титанових сплавів у виноробних і дезинфікуючих середовищах. Експерименти підтвердили виняткову корозійну стійкість сплавів ВТ1 - 0, ОТ4, ВТ5-1 у цих середовищах. Спектральний аналіз вина показав, що метал не переходить у продукт навіть при тривалому контакті з ним.

Дослідження В. Супрунчука показали, що в дифузійному соці корозія сплаву ВТ1-0 не виявляється, у той час як для сталі Ст3 вона складає 0,91 мм/рік, а для сталі 12Х18Н9Т – 0,031 мм/рік.

Враховуючи, що дані про стійкість титанових сплавів у харчових середовищах, порівняно зі стійкістю традиційно використовуваних матеріалів практично відсутні суперечливі, кафедрою МіТМ НУХТ спільно з Інститутом Титану було проведено дослідження стійкості цих сплавів у середовищах харчових кислот і крохмальопродуктів, пектинового і лікєро-горілкового виробництв.

Для проведення випробувань були вибрані такі матеріали:

- ВТ1-0 – найбільш корозієстійкий і дешевий із серійних сплавів (технічно чистий титан), достатньо технологічний і добре освоєний у хімічному машинобудуванні;

- ОТ4 – легований Al і Mn, має більш високі механічні властивості і може бути використаний для обладнання, яке працює з великими навантаженнями, легко оброблюється, має високу корозійну стійкість;

- BT5-1 – легований Al і Sn, призначений для виготовлення штампованих і зварених деталей, які працюють при високих температурах і тисках;

- Ч200 і Ч201 – леговані відповідно Pd і Mo висококорозієстійкі сплави досліджувалися у виробництві виннокам'яної кислоти, де за літературними джерелами звичайні титанові сплави нестійкі.

Для порівняння досліджувалися також сталі Ст3, 12Х18Н10Т і 10Х21Н5Т.

У середовищах виробництва виннокам'яної кислоти при температурі 65 °С була встановлена корозійна стійкість випробуваних матеріалів (табл. 10.8). Очевидно, що титанові сплави мають високу стійкість у середовищах виннокам'яної кислоти, причому кородують вони рівномірно по всій поверхні. Нержавіюча сталь малостійка (корозія виразкова) і не може бути рекомендована для виготовлення обладнання для виробництва виннокам'яної кислоти.

Таблиця 10.8.

Корозійна стійкість металевих сплавів у виннокам'яній кислоті

Сплав	Швидкість корозії, г/м ² ·год	Бал корозійної стійкості
Титановий сплав BT-0	0,0003	1
Титановий сплав BT-5	0,0076	3
Титановий сплав Ч200	0,0026	2
Титановий сплав Ч201	0,0088	3
Сталь Х18Н10Т	3,405	8

У розчинах упарюваної лимонної кислоти при температурі 78 °С були отримані такі дані, наведені в табл. 10.9.

У середовищах виробництва лимонної кислоти титанові сплави показали рівномірну корозію і задовільну стійкість, а сталь 12Х18Н10Т – низьку стійкість з проявленням виразкової корозії.

Таблиця 10.9

Корозійна стійкість металевих сплавів у розчині
упарювання лимонної кислоти

Сплав	Швидкість корозії, г/м ² ·год	Бал корозійної стійкості
Титановий сплав BT1-0	0,0420	4
Титановий сплав BT5-1	0,0372	4
Сталь Х18Н10Т	2,4218	8

У різноманітних середовищах виробництва крохмальопродуктів швидкість корозії титанових сплавів відповідала 2÷4 балам, а сталі 12Х18Н10Т – 4÷8 балам. У середовищах виробництва бурякового харчового пектину стійкість матеріалів характеризується такими

даними: титанові сплави - 2 бал; сталь 12X18H10T - 2÷8 бал; сталь 10X21H5T – 3÷10 бал; сталь Ст3 - від 2 бала до повного розчинення. Поряд з титановими сплавами сталь 12X18H10T показала достатньо добру стійкість, але внаслідок розвитку точкової корозії в зоні зварних швів доцільність використання цієї сталі в зварних конструкціях сумнівна.

З титанових сплавів були виготовлені окремі дослідно – промислові зразки обладнання і випробувані на виробництві, наприклад, випарний апарат з камерою нагрівання із ВТ1-0 для виробництва лимонної кислоти. Серійні апарати виготовляються з сталі 12X18H10T і призначені для упарювання розчинів лимонної кислоти до концентрації 85 %. За даними Белгородського заводу лимонної кислоти (Росія) через 6 місяців нагрівальні труби виходять із ладу внаслідок корозії. Кількість капітальних ремонтів зі заміною 10 – 25 % труб складає щорічно 5-6. Через корозію нагрівальних труб втрати продукції перевищують 30 т/рік. Сортність кислоти знижується через підвищений вміст у ній солей заліза. На 4 – 8 % збільшуються нормативні витрати пари через утворення щільного шару накипу і зниження теплопровідності. Тому на Белгородському заводі був встановлений апарат з титановою нагрівальною камерою, а також апарат із сталі 12X18H10T. Після 2-х місяців експлуатації у першому слідів корозії не виявлено і у розчині лимонної кислоти домішок металу не встановлено. В апараті ж зі сталі 12X18H10T у нагрівальних трубах спостерігалось інтенсивна піттингова корозія, а у розчинах кислоти виявлено $1 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-4}$ г/л солей заліза, що неприпустимо.

У крохмальопатоківому виробництві найбільш агресивне середовище містить 1,5 % соляної кислоти і 0,07 % KMnO_4 . Основним обладнанням, що працює в цьому середовищі, є осадова центрифуга зі сталі 12X18H10T, яка призначена для сгущення крохмальної суспензії у виробництві модифікованих крохмалів. За даними Клімівського крохмальопатоківого заводу (Росія) термін служби осадової центрифуги не перевищує 150 діб.

Дослідна центрифуга була виготовлена з ОТ4. Вже через 2 тижні на сталевому роторі серійної центрифуги були значні сліди корозійних руйнувань, а ротор дослідного апарата залишився незмінним. У розчинах, відібраних для аналізу із титанової центрифуги не було виявлено іонів металу, а в розчинах із сталевих центрифуги були виявлені іони заліза.

Основним технологічним обладнанням на дільниці фільтрації лікєро-горілочаних виробів є вугільна колонка зі сталі 12X18H10T виробництва Сумського насосного заводу. За даними УкрНДІпродмаш і Мелітопольського лікєро-горілочаного заводу через 3 місяці експлуатації на зовнішній поверхні колонки на поверхні по кільцевих зварних швів з'являються наскрізні корозійні мікротріщини, що призводять до витікання і втрат продукту. Устаткування стає

непридатним для подальшої експлуатації. Тому була розроблена і виготовлена вугільна колонка з ВТ1-0. Її випробування провели в патоці на Мелітопольському заводі. Протягом одного року експлуатації на титановій колонці слідів корозії не виявлено, а сталеві з 12Х18Н10Т піддалася двом капітальним і чотирьом поточним ремонтам. В ній на зварних швах з'явилися мікротріщини і виразки. Державна комісія прийняла титанову вугільну колонку і рекомендувала розроблене обладнання до серійного виробництва.

За даними В.Г. Крючек для середовищ, аналогічних випробуванню, доцільно виготовляти різноманітне титанове устаткування. Воно може бути перспективним у виробництвах харчових кислот (розщеплювачі, випарні апарати, запірні і трубопровідна арматура, мийні пристосування), бурякового пектину (ректифікаційні колони, місткості для гідролізу, фільтри, вентилятори, насоси, запірні і трубопровідна арматура, мийні апарати), лікеро-горілчаних виробів (вугільні колонки) та при виготовленні інших машин і апаратів харчових виробництв.

Дослідно-промислові випробування показали перспективність застосування титанових сплавів замість нержавіючих сталей. Термін служби, наприклад, випарного апарата з титановою нагрівальною камерою у виробництві лимонної кислоти збільшився у 2,7 рази, витрати на ремонт зменшилися в 30 разів, а також знизилась втрата кислоти з конденсатом і покращився її товарний вигляд.

Вже зараз харчова промисловість вийшла на третє місце по споживанню титану після хімічної промисловості та кольорової металургії. При раціональному його використанні у харчовій промисловості економічний ефект може скласти 6-7 тис. грн. на 1 тону застосованого титану на рік. Але для цього держава повинна стимулювати використання титану, а відпускна ціна на нього повинна максимально знижуватись. На застосування титану в контакт з харчовими продуктами і середовищами є дозвіл Міністерства охорони здоров'я України.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. У чому різниця між хімічною і електрохімічною корозією металів?
2. Які середовища харчових і переробних виробництв є електролітами?
3. Що називається енергією гідратації молекул?
4. Як впливає енергія гідратації молекул на виникнення позитивного і негативного потенціалу в середовищах – електролітах?
5. У якому випадку при контакті двох різнорідних металів або сплавів виникає гальванічний елемент?
6. Опишіть механізм водневої і кисневої деполяризації металів в середовищах – електролітах.
7. Поясніть механізм пасивування металів у середовищах – електролітах.

8. Від яких чинників залежить здатність металів до пасивації?
9. Як впливає мікроструктура сплавів на їх корозійну стійкість?
10. У яких випадках проявляється корозійна втома металів?
11. Опишіть різновиди корозійних руйнувань металів?
12. Назвіть основні методи корозійних випробувань металів і сплавів.
13. Як впливають технологічні середовища хлібопекарських виробництв на корозійну стійкість чорних і легованих вуглецевих сплавів?
14. Яке обладнання спиртової промисловості інтенсивно кородує і які метали доцільно рекомендувати для виготовлення обладнання галузі?
15. Чи можна застосовувати сталь Ст3 для виготовлення обладнання, що контактує з лікєро-горілочаними виробами?
16. З яких матеріалів треба виготовляти апарати і місткості для отримання пива?
17. Назвіть матеріали, які є найбільш стійкими у середовищах пивоварного виробництва.
18. Якими сталями можна замінити сталь 12Х18Н10Т для виготовлення обладнання хіміко-фармацевтичних виробництв для виготовлення настоек, екстрактів і таблеткових мас?
19. Які сталі доцільно використовувати для виготовлення фармацевтичного і мікробіологічного обладнання, що контактує з розчинами хлориду натрію?
20. Опишіть види обладнання харчових і переробних виробництв, яке доцільно виготовляти з титану?
21. Порівняйте корозійну стійкість харчових апаратів, виготовлених з титану і нержавіючої сталі 12Х18Н10Т.

[перейти до змісту](#)

11. Захист обладнання від корозії

11.1. Гальванічний і хімічний захист

Застосовують такі найбільш поширені методи гальванічного і хімічного захисту обладнання: хромування захисне і захисно – декоративне; нікелювання захисне і захисно – декоративне; цинкування; кадмування; оксидування; фосфатування. Гальванічні покриття наносять на поверхні деталей осадженням металів із водяних розчинів їхніх солей під дією постійного електричного струму. Хімічні покриття одержують за рахунок взаємодії поверхневих шарів металів і сплавів з хімічними реагентами без застосування електричного струму від зовнішнього джерела.

Хромування забезпечує високу корозійну стійкість і широко використовується для захисту від корозії харчового обладнання. При ретельному підготовленні поверхонь деталей під покриття забезпечується висока міцність зчеплення хрому зі сталлю, чавуном, міддю та латунню. У сталей з високим вмістом вуглецю, вольфраму, кобальту, а також у високомарганцовистих чавунів міцність зчеплення з хромом мала і вони не хромуються. Товщина захисного хромового покриття досягає декількох десятків мкм. Відомі хромові покриття завтовшки 1 мм.

Хромові покриття стійкі до дії сірководню, багатьох кислот і лугів, вологої атмосфери, тривалий час зберігають свій колір і блиск. Маючи більш високий, ніж залізо, нормальний потенціал (-0.55В) хром не забезпечує електрохімічного захисту чорних металів. Тому, за наявності пористого шару хрому на деталях, вони все ж піддаються корозії. Істотною вадою звичайних хромових покриттів є наявність у нанесеному шарі залишкових розтягуючих напружень, які значно знижують втомну міцність сталевих деталей (з вуглецевих сталей на 25 - 40 %).

Нікелювання. Гальванічно-осаджений нікель добре протистоїть корозії в розчинах солей, лугів і органічних кислот. Мікротвердість нікелевого шару порівняно невелика і сягає ~ 300 кгс/мм². В атмосферних умовах за відсутності пор, нікель добре захищає залізо від корозії, тому що по відношенню до нього є катодом.

Останнім часом для захисту від корозії все ширше застосовується хімічне нікелювання, якому можуть піддаватися майже всі метали, пластмаси, кераміка та скло. Технологія хімічного нікелювання значно простіша, ніж гальванічного. Немає потреби в накладанні електричного струму та застосуванні дорогого електротехнічного устаткування. Цим способом отримують більш рівномірні, чим при гальванічному нанесенні, нікелеві покриття.

Процес полягає в зануренні деталей у ванну з нагрітим розчином солей нікелю і деяких інших компонентів. Отримані покриття містять 3 - 10% фосфору, а тому їх називають нікель - фосфорними. Для них характерні більш високі антикорозійні властивості, ніж у гальванічних

нікелевих покриттів. Порівняльні випробування показали, що покриття завтовшки 12 мкм, отримані хімічним нікелюванням, за захисними властивостями не поступаються електролітичним покриттям завтовшки 24 мкм. Надійний захист алюмінієвих сплавів від корозії забезпечується при застосування покриття 5÷30 мкм (залежно від марки сплаву). Хімічне нікелювання широко застосовують для полегшення паяння алюмінієвих сплавів. Покриття забезпечує добре розпливання припою і одержання корозієстійких з'єднань.

Цинкування гальванічне застосовують для захисту деталей із сталей і чавунів від атмосферної корозії. У парі залізо – цинк останній є анодним покриттям і захищає деталі від електролітичного розчинення. У сухій атмосфері цинкові покриття мають високу корозійну стійкість. У воді при 65 – 75°C їхні захисні властивості різко знижуються, а на холоді вони стають крихкими. Цинк досить активний і легко реагує з неорганічними і органічними кислотами, лугами, сірчаними з'єднаннями і вологим вуглекислим газом.

Кадмування. Кадмій має більшу хімічну стійкість, ніж цинк. Він не розчиняється в лугах і повільніше реагує з кислотами. Значення нормальних потенціалів заліза і кадмію близькій, тому характер захисту кадмієвого покриття залежно від умов його експлуатації може бути електрохімічним, подібно до Zn, або механічним, аналогічно Ni. У морській воді і в умовах тропічного клімату кадмієве покриття забезпечує кращий корозійний захист, ніж цинкове. Електролітичний шар кадмію пластичний і тому застосовується для захисту відповідальних різьбових і спряжених деталей. Однак, солі кадмію отруйні і потребують обережності при нанесенні гальванічних покриттів.

Оксидування. При взаємодії з атмосферою поверхня металевих деталей покривається тонкою плівкою окислів, які не забезпечують належного захисту від корозії. Отримані штучним шляхом оксидні плівки більшої товщини і щільності застосовують для захисту деталей, які працюють в полегшених корозійних умовах. Ефективність застосування оксидування зростає при подальшому насиченні оксидованих поверхонь мастильними і лакофарбовими матеріалами.

Оксидування може здійснюватись термічним, хімічним і електрохімічним способами. На сталевих деталях оксидна плівка товщиною 0,1 – 0,8 мкм складається з магнітного оксиду заліза Fe_3O_4 і надає поверхні деталі чорний колір з характерним металевим блиском. Оксидовані деталі з кремнистої сталі і чавуну мають коричневий відтінок.

Термічне оксидування (воронування) здійснюють зануренням розігрітої деталі в рослинні олії, розплавлену селітру, лужні розчини.

У промисловості найбільше поширення має лужне і кисле хімічне оксидування. Лужне оксидування проводять у підігрітому концентрованому розчині їдкого лугу, який містить окислювачі. Кисле

оксидування проводять у розчині ортофосфорної кислоти й окислювачів. Тривалість такого процесу в 2 - 3 рази менша, ніж при лужному оксидуванні, а корозійна стійкість і механічна міцність плівок, що досягають товщини 3 мкм, набагато вища. Електрохімічне оксидування сталі здійснюють у гальванічних ваннах в підігрітому розчині їдкого натрію.

Оксидування – достатньо простий та надійний засіб захисту від корозії кольорових металів і сплавів. Широко застосовується оксидування алюмінію, магнію, міді і їхніх сплавів. Найчастіше застосовується електрохімічний метод оксидування. Після нього товщина плівки на алюмінії становить 3-4 мкм.

Фосфатування – процес одержання на поверхні деталі плівки, що складається з нерозчинних солей фосфорної кислоти. Застосовується для захисту від корозії деталей з чорних металів, алюмінію, магнію, цинку та ін. Здійснюють фосфатування хімічним і електрохімічним способами, внаслідок чого на деталі утворюється плівка завтовшки 2÷15 мкм. Фосфатні плівки більш корозієстійкі, ніж оксидні, отримані хімічним оксидуванням у лужних розчинах.

Недоліком фосфатування є те, що після нього метали і сплави наводнюються і підвищується крихкість деталей, а сама плівка також крихка і нестійка до стирання.

Фосфатні покриття застосовуються для захисту від атмосферної корозії деталей, що не потребують декоративного оздоблення. У поєднанні з лакофарбовими матеріалами такі покриття забезпечують високу стійкість у морській воді та можуть експлуатуватись у тропічному кліматі.

11.2. Протикорозійні лакофарбові, пластмасові та емалеві покриття

11.2.1. Лакофарбові покриття

Для надійного захисту металів і сплавів від дії повітря і агресивних середовищ лакофарбові покриття повинні утворювати на поверхнях деталей суцільні плівки і мати з ними добре зчеплення, характеризуватися механічною міцністю, стійкістю до температурних змін та змін сонячної радіації. До лакофарбових покриттів можуть бути і спеціальні вимоги, наприклад, стійкість до впливу олив, бензину, кислот, лугів та інших агресивних середовищ.

За умовами експлуатації лакофарбові покриття поділяються на атмосферостійкі, стійкі в приміщенні, до впливу кислот, лугів, агресивних парів і газів, води, олив і бензину, температури та термоізоляційні.

У лакофарбових матеріалах в якості плівкоутворювачів використовуються швидковисихаючі олії, розчини лаків або

синтетичних смол. Товщина лакофарбових плівок досягає 60÷100 мкм і більше.

Процес фарбування складається з підготовки поверхні, нанесення ґрунту, шпатлювання, нанесення одного або декількох шарів покриття. Підготовка полягає в очищенні поверхні від окалини, іржі, жирових та інших забруднень. Використовують механічні і хімічні способи очищення: дрібоструменеве, гідропіскоструменеве, віброгалтування, сталевими щітками, травлення в розчинах кислот тощо. Підготовлену поверхню шпатлюють, висушують, зачищають, а потім накладають шар ґрунту і знову висушують. Лакофарбові матеріали наносять пензлями, зануренням, обливанням, пульверизаторами та в електростатичному полі, безповітряним розпиленням. Висушування проводять гарячим повітрям, конвекційними апаратами, інфрачервоними променями тощо. Термін висушування деталей коливається від 10 хв до декількох годин.

Маркування лакофарбових матеріалів складається з 5 груп знаків і визначає вид лакофарбового покриття (лак, емаль, ґрунт, шпаклівка), плівкоутворюючу основу (смола, ефір, целюлоза, олія), переважне призначення, порядковий номер, наданий даному матеріалу. Наприклад, емаль ЕП91 чорна – це епоксидна емаль чорного кольору, що має електроізоляційні властивості. Для захисту деталей від впливу агресивних середовищ застосовують хімічно стійкі покриття. До них відносять лаки ХСЛ - 3; ХС - 76; КФ - 252; ХСЛ - 76; емалі ЕП255; ПХВ та ін. Їх наносять у декілька шарів. Для захисту поверхонь деталей, які працюють при підвищених температурах, використовують термостійкі покриття емалями ПФ - 28, ГФ - 820, ВЛ - 725, К - 2, КО - 84 та ін.

11.2.2. Пластмасові покриття

Пластмасами можна захищати різноманітні матеріали: чорні і кольорові метали, бетон, кераміку, дерево та інші матеріали. Покриття наносять способами напилювання (газополуменевим, вихровим, вібровихровим, струменевим, в електростатичному полі), плакування, намазування.

Для покриття газополуменевим і вихровим способами використовується дрібнодисперсний порошок термопластичних пластмас. При газополуменевому напилюванні струмінь повітряно – порошкової суміші за допомогою спеціального пістолета зі швидкістю близько 30 м/с продувається через полум'я з високою температурою горіння. Частинки порошку розігріваються і разм'якшуються, а потім, удараючись об поверхню деталі, прилипають до неї і сплавляються між собою у суцільний монолітний шар.

Спосіб вихрового напилювання, який широко розповсюджений, здійснюється за допомогою спеціального устаткування. Порошок полімеру засипають у місткість з газопропускним дном, через яке подається стиснуте повітря або інертний газ, потік якого піднімає частинки порошку. Утворюється шар

пластмаси, який псевдокипить. У цей псевдокиплячий шар занурюється деталь, підігріта до температури плавлення полімеру. Частинки порошку плавляться і утворюють на ній суцільне полімерне покриття. Враховуючи те, що переміщення частинок полімеру у вертикальному напрямку більше, ніж у горизонтальному, деталі при напиленні обертають. Час покриття деталі встановлюється дослідним шляхом і складає 3÷30с залежно від необхідної товщини покриття, тепломісткості деталі та площі її поверхні.

Вихровий спосіб має такі недоліки. Внаслідок нагрівання деталі до високої температури, що спричиняє окислення і деструкцію полімерів. При нанесенні покриття великі частинки порошку погано струшуються, а дуже дрібні виносяться потоком газу. Повітря попередньо необхідно ретельно очищувати від вологи і частинок мастил. Недоліки вихрового способу можна частково усунути при накладанні вібрацій на ємність з порошком примусивши ванну вібрувати. При вібраційних коливаннях сили внутрішнього тертя між частинками зменшуються, порошок інтенсивніше розпушується, фракційний склад стовпа завихреного порошку стає більш рівномірним по висоті, зменшуються витрати повітря. Це дозволяє зменшити температуру нагрівання деталі і, таким чином, зменшити окислення та деструкцію полімерного покриття.

Метод напилювання в електростатичному полі ґрунтується на тому, що при внесенні в нього твердих або рідких частинок речовини на їх поверхні адсорбуються іони, і частинки заряджаються та захоплюються силовими лініями поля. При напилюванні в електростатичному полі виріб занурюють у псевдозріджений шар порошку полімеру, який знаходиться під спільною дією електричної напруги і стиснутого повітря. Частинки полімеру заряджаються, переміщуються до деталі і рівномірно осідають на ній. Потім деталь поміщають у піч, де полімер розплавляється й утворює рівномірне і щільне покриття. Перевага методу полягає в тому, що не потрібне попереднє нагрівання деталі, зменшується забрудненість атмосфери, тому що порошок, що знаходиться у повітрі, електризується і осідає на виробах.

Метод струминного напилювання полягає в тому, що струмінь повітряно – порошкової суміші направляється на розігріту поверхню і частинки порошку, стикаючись з нею, розплавляються та утворюють покриття. Цей метод застосовується для деталей, які не можна нагріти повністю або помістити у ємність з порошком, а також для захисту внутрішніх поверхонь виробів.

Метод плакування – це покриття пластмасою металевих листів або смуг з наступним виготовленням із них штампуванням, вирізанням та іншими способами різноманітних деталей. За кордоном цей спосіб захисту досить поширений. В Україні виробництво металопласта

організовано на заводі “Запоріжсталь”. Перспективність його застосування обумовлена тим, що матеріал має одночасно комплекс властивостей, притаманних металам і пластмасам, поєднуючи високий опір корозії і задовільні механічні властивості. Плакувати метали і сплави можна полівінілхлоридом, поліетиленом, полівінілбутиралем тощо. Наносять пластмасу в рідкому або пастоподібному стані після спеціальної обробки заготовки.

Враховуючи високу ефективність застосування пластмас у харчовій, мікробіологічній і фармацевтичній промисловості, більш детально способи їх застосування викладені у розділі 17.

11.2.3. Емалеві покриття

Емальовані деталі мають високу корозійну стійкість в кислих і лужних розчинах, при високих температурах та її коливаннях. Звичайні побутові емалі захищають метал від корозії до температури 500 °С, а жаростійкі – до 900÷1000 °С. Емалюється переважно вуглецева сталь з вмістом вуглецю до 0,12 % або сірий чавун.

Основними компонентами емалі є кремнезем (до 30÷70 %), окисли натрію або калію (до 30 %), борний ангідрид (до 20 %). Крім них до складу емалей можуть входити різноманітні оксиди металів, за допомогою яких змінюють різноманітні властивості покриттів. Для надання покриттям декоративного вигляду в емаль добавляються пігменти (Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , Mn , Al_2O_3 та ін.).

Основні операції при нанесення покриттів здійснюють в такій послідовності: підготовка поверхні (очищення, знежирювання, травлення, промивання і нейтралізація); приготування шлікеру (сметаноподібної маси емалі); нанесення шлікеру на деталь (іноді з попередньою грунтовкою); висушування при 140 – 180 °С; відпалювання при 820 – 840 °С. Найбільш розповсюджений спосіб нанесення шлікеру – обливання деталі при її обертанні. Після сушіння шлікеру проводять відпалювання у газополуменевих печах або СВЧ.

11.3. Інгібіторний захист обладнання

11.3.1. Області застосування інгібіторів корозії

В арсеналі методів боротьби з корозійними руйнуванням основного і допоміжного обладнання харчових підприємств посідають чільне місце інгібітори - протикорозійні добавки до середовищ і захисних покриттів. Вони ефективні, універсальні і економічні. Створені інгібітори для кислих, лужних і нейтральних середовищ.

У харчовій та переробній промисловості поширені замкнені системи циркуляції ропи, які охолоджують і нагрівають технологічні рідини, системи кондиціювання повітря, теплотехнічні системи, нагрівальні і упарювальні пристрої, збірники мийних і дезінфікуючих розчинів, технологічні апарати, місткості і комунікації, що при в процесі експлуатації інтенсивній корозії.

Для захисту обладнання і комунікацій застосовують інгібітори та інгібіторні системи. Інгібітори та інгібовані матеріали доцільно застосовувати для попередження корозії:

- теплообмінного та іншого технологічного обладнання при його очищенні кислотними розчинами від різноманітних відкладень;
- холодильно-компресорного обладнання;
- металевих конструкцій цехів харчових і переробних підприємств, зовнішніх поверхонь трубопроводів, резервуарів, що експлуатуються в умовах підвищеної вологості;
- апаратів для переробки окремих технологічних середовищ;
- у технологічних процесах підготовки поверхонь апаратів, місткостей, цистерн під гумування, емалювання і фарбування.

Залежно від виду агресивного середовища застосовуються:

- інгібітори для кислих середовищ (мінеральні та органічні кислоти, кислі технологічні розчини, розчини для видалення різноманітних відкладень з поверхонь теплообмінників тощо);
- інгібітори для захисту від атмосферної корозії;
- інгібітори для органічних середовищ (спиртові розчини);
- інгібітори для водяних і водно-солевих середовищ (системи циркуляції води, системи охолодження, ропопроводи, насоси тощо).

Дія інгібіторів специфічна. Рекомендований для конкретного середовища і матеріалу інгібітор не можна застосовувати для іншого середовища або іншого конструкційного матеріалу. Ефективність захисної дії значною мірою залежить від дотримання співвідношення концентрації компонентів інгібітора, технології його введення в агресивне середовище або захисний матеріал, температурного інтервалу, у якому проявляється його ефективність, гідродинамічних умов потоків технологічних рідин.

11.3.2. Механізм захисної дії інгібіторів корозії

Загальної теорії корозії або теорії інгібування, яку можна було б застосувати в усіх випадках для любого типу обладнання, не існує. Механізм корозії може змінюватись під впливом різноманітних чинників, а тому спосіб інгібування буде також змінюватись залежно від хімічної природи інгібітора і чинників, які спричиняють корозію. Для конкретних умов буде справедливим свій механізм корозії і, отже, індивідуальний спосіб інгібування.

Існує декілька загальних положень про механізми корозії та інгібування, що відбуваються у воді - основному технологічному середовищі харчових і переробних виробництв. Корозія у воді є електрохімічним процесом, що реалізується на анодних ділянках поверхні виробу, де залізо переходить у розчин, а іони водню перетворюються в атоми з поглинанням електронів анодної реакції. Потім на поверхні відбувається рекомбінація атомів водню в його

молекулу. Таким чином, ці реакції засновані на реновації іонів водню. Отже, для зменшення корозії необхідно зупинити анодну чи катодну реакцію, тобто застосовувати інгібітори цих реакцій.

Анодними вважаються інгібітори, які гальмують анодну реакцію. Такі інгібітори реагують із первинними продуктами корозії з утворенням важкорозчинної плівки, адгезійно міцно пов'язаної з металевою поверхнею. Плівка перешкоджає безпосередньому контакту агресивного розчину з поверхнею металу, припиняючи його розчинення. **Катодні** інгібітори гальмують катодні реакції. На металевій поверхні з'являється осад, який покриває катодні ділянки і, в такий спосіб, припиняє катодну реакцію. Захист у цьому випадку є побічним, тоді як анодні інгібітори безпосередньо запобігають корозії металу.

Встановлено, що деякі інгібітори є донорами електронів і, при адсорбції на поверхні сталі, вони заряджаються позитивно. Адсорбційний позитивний заряд, локалізований на молекулах інгібітора, компенсується негативним зарядом, розташованим на внутрішній межі окисла Fe - FeO_x. Зміна величини поверхневого потенціалу або роботи виходу електронів прямопропорційна кількості адсорбованої на електроді речовини.

В умовах корозії з кисневою деполяризацією недостатня об'ємна концентрація адсорбційного інгібітора може виявитися небезпечною і призвести до локалізації процесу корозії на обмеженій ділянці поверхні. Корозія, що протікає з дифузійними обмеженнями, може бути припинена лише при створенні майже суцільного покривного шару.

При протіканні корозії з водневою деполяризацією адсорбований інгібітор значно більше впливає на корозійний процес, а ефективний захист може досягатися без ініціювання локальної корозії.

Під механізмом дії інгібіторів розуміють сукупність процесів адсорбції інгібіторів і наступного впливу адсорбованої речовини на протікання електрохімічних реакцій. Гальмування катодної реакції інгібітором може здійснюватися по-різному: зміною константи швидкості за рахунок зміни енергії активації при адсорбції інгібітора, зміною об'ємної концентрації іонів, порядку реакції, зменшенням частки поверхні металу, на якій протікає реакція, зміною електродного потенціалу. Вплив інгібіторів на кінетичні характеристики анодного процесу пов'язується насамперед з адсорбцією інгібітора та його участю в одній із стадій анодного процесу розчинення. Передбачається, що адсорбований інгібітор зменшує концентрацію позитивного каталітичного комплексу Fe(OH)₂, який визначає загальну швидкість розчинення заліза. Важливу роль у процесах анодного розчинення та інгібування відіграє ступінь гетерогенності поверхні металу, який розчиняється.

11.3.3. Захист устаткування від атмосферної корозії

Інгібітори корозії змінюють кінетику електрохімічних реакцій, які спричиняють атмосферну корозію, внаслідок фізичної або хімічної адсорбції поверхнею металу іонів або молекул інгібіторів. Відомі такі способи застосування інгібіторів атмосферної корозії: нанесення на захищувану поверхню з водяних або органічних розчинів; сублімація на поверхні виробів з повітря, насиченого парами інгібітора; нанесення на поверхню, яка захищається, полімерної плівки з інгібітором корозії; пакування виробів у інгібований папір; внесення у замкнутий об'єм пористого носія з інгібітором.

Інгібітори атмосферної корозії поділені на контактні і леткі. Контактні інгібітори безпосередньо наносять на поверхню металу, а леткі самі адсорбуються на поверхні металів, у тому числі в щілинах і зазорах. Захист виробів леткими інгібіторами дозволяє зберігати їх при будь-якій вологості повітря. До складу обох типів входять ще і органічні радикали, спроможні в потрібному напрямку впливати на кінетику електродних реакцій. Крім того, до складу летких інгібіторів входять радикали, що надають їм необхідну леткість. Контактні інгібітори – це, в основному, неорганічні з'єднання, а леткі - солі амінів і слабких неорганічних і органічних кислот.

Як інгібітори атмосферної корозії використовують: динітробензоат пиперидину і бензотриазол з терміном захисту понад 10 років; УНІ (нітрит - уротропінові суміші), які захищають деталі до 5 років; нітрит-бензоатні суміші та нітрит-мочевинні суміші з терміном захисту до 2 років; нітрит-амонієві суміші, які захищають на період до 2 років; КЦА (карбонат циклогексиламіну) з строком дії до 2 років; МЕАК захищає деталі до 6 місяців; М-2 - до 5 років; МСДА –1 рік, МСДА-2 - до 1 року; ВНХ-1, ВНХ-5, ВНХ-101 - до 10 років.

До нетоксичних і малотоксичних інгібіторів атмосферної корозії відносяться: інгібітор ВМЕА (сіль моноетаноламіну і бензойної кислоти, розчинена у воді при 298 К до концентрації 460 г/л, або в спирті при 293 К до концентрації 40 г/л); малотоксичний інгібітор УНІ, розчинний у воді, спирті; малотоксичний інгібітор ВН (натрієва сіль бензойної кислоти), розчинний у воді, етиловому спирті; малотоксичний інгібітор дициклогексиламін динітробензойноокислий (нерозчинний у воді, леткий); малотоксичний інгібітор Г-2.

У харчовій та переробній промисловості інгібітори атмосферної корозії застосовують для захисту обладнання і трубопроводів у період складського зберігання і консервування перед монтажем, під час їх монтажу і транспортування, а також для захисту обладнання, яке працює сезонно.

11.3.4. Запобігання руйнуванню металів у нейтральних і кислих середовищах

Основою більшості технологічних рідин, які застосовуються у харчових та переробних галузях АПК, є вода. Але при використанні в

технологічних процесах вона змінює свої фізико-хімічні властивості і показники. Зокрема, на харчових підприємствах розрізняють воду водопровідну, питну, технічну, госпфекальну, транспортно-мийну, барометричну, сульфітовану, аміачну та ін. Часто у водах розчинені солі, що сприяє збільшенню їх корозійної активності.

Інгібітори корозії для водяних нейтральних середовищ бувають катодними, анодними і змішаними. В залежності від способу дії інгібітори поділяють на плівкоутворювачі і адсорбенти.

Катодними інгібіторами для захисту залізних сплавів від корозії у воді є $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, ZnSO_4 , BaCl_2 , ZnCl_2 та ін. До анодних інгібіторів, що утворюють на поверхні деталі захисні плівки, відносяться NaOH , Na_2CO_3 , фосфати. Ці інгібітори проявляють захисну дію тільки за наявності розчиненого кисню, без якого утворення захисних плівок не відбувається.

Можливості інгібування питної води жорстко обмежені санітарними нормами. Питну воду дозволено обробляти лише мікродозами силікату натрію або гексаметафосфату натрію. У системах промислового водопостачання є можливості для більш широкого застосування найрізноманітніших інгібіторів: фосфатів, вольфраматів, ванадатів, молібдатів, нітритів, бензоатів, боридів, органічних сполук. Гексаметафосфат натрію спроможний запобігати заростанню труб карбонатом кальцію. Агресивні властивості води можна також значно знизити за допомогою силікату натрію, молібденатів, вольфраматів, амінів, нітритів натрію, біхромату калію.

Для того, щоб захистити арматуру і трубопроводи технологічного і допоміжного обладнання від корозії і накипоутворення застосовують поліфосфати, що мають загальну формулу $\text{Na}_x + 2\text{P}_x\text{O}_{3x+1}$. Найбільше застосування знаходять гексаметафосфат натрію $(\text{NaPO}_3)_6$, триполіфосфат натрію $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ і дифосфат натрію $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Розроблені інгібіторні композиції на основі водорозчинних фосфатів і органічних фосфонових кислот, які не містять токсичних хроматів. Ці інгібітори в ефективних концентраціях придатні для захисту сталі та деяких інших металів.

В основних і допоміжних технологічних процесах харчових і переробних виробництв широко застосовуються різноманітні кислоти. Виробництво харчових продуктів пов'язане з процесами гідролізу і екстрагування. Для їх здійснення застосовують неорганічні (HCl , H_2SO_4 , H_2SO_3) та органічні (молочну, оцтову, винну, лимонну, яблучну та ін.) кислоти.

Часто самі середовища харчових виробництв мають кислу реакцію. Наприклад, середовища бурякопереробного відділення цукрових заводів слабокислі, що спричиняє інтенсивне спрацювання деталей обладнання. Висока агресивність середовищ виноробної промисловості пов'язана з підвищеною кислотністю виноматеріалів

(рН 2,5 – 4,2) і втрати металу від корозії на цих підприємствах надзвичайно великі.

Виробництво патоки, глюкози, крохмалів пов'язане з гідролізом полісахаридів з використанням сірчаної та соляної кислот 0,15 – 1,5 % мас. концентрації. До складу овочевих та фруктових консервів входять харчові кислоти. Середовища у виробництві самих харчових кислот (молочної, лимонної, винної, яблучної, оцтової) досить агресивні. Наприклад, лактат кальцію у виробництві молочної кислоти розщеплюють 93-98 % сірчаною кислотою. Сама ж молочна кислота надзвичайно агресивна по відношенню до металів. У виробництві дріжджів освітлення меляси і декантування по кислотному-холодному методу проходить з додаванням у дріжджевищувальний апарат сірчаної кислоти. У хлібопекарській промисловості застосовують апаратуру для подачі кислих дріжджів. У виробництві вітамінів застосовують сірчану, азотну, соляну, оцтову та молочну кислоти. Причому, багато реакцій відбувається при підвищених температурах. Застосовують у харчовій промисловості неорганічні та органічні кислоти також для очищення теплотехнічних систем і апаратів.

Технологічне обладнання цукрових заводів складається з різноманітних машин (каменевловлювачів, транспортерів, центрифуг, шнеків, насосів) і апаратів (дифузійних, випарних тощо). Апарати для виробництва цукру виготовляють, в основному, з вуглецевих сталей Ст3, 10, 20 і вони, особливо в кислих агресивних середовищах, кородують до 2 мм/рік.

Середовища в бурякопереробному відділенні цукрового виробництва бувають нейтральними або слабокислими. Середовища сокоочисного відділення мають підвищену лужність (рН8-14), а температура досягає 65-95 °С. Середовища продуктового відділення слаболужні (рН8-9), а їх температура знаходиться в межах 40-85 °С. Все це сприяє корозії обладнання.

Наприклад, дифузійні апарати працюють при температурі 40-80 °С і рН дифузійного соку 6,5 – 5,5, а їх деталі інтенсивно кородують та спрацьовуються.

В дифузійних апаратах похилого типу найбільше кородує та зношується транспортна система, яка складається з трубовала, шнека і підшипників ковзання. На рис. 11.1 показаний фрагмент нового та зношеного шнека дифузійного апарата А1-ПДС-20 після відпрацювання двох виробничих сезонів на Кожанському цукровому заводі.

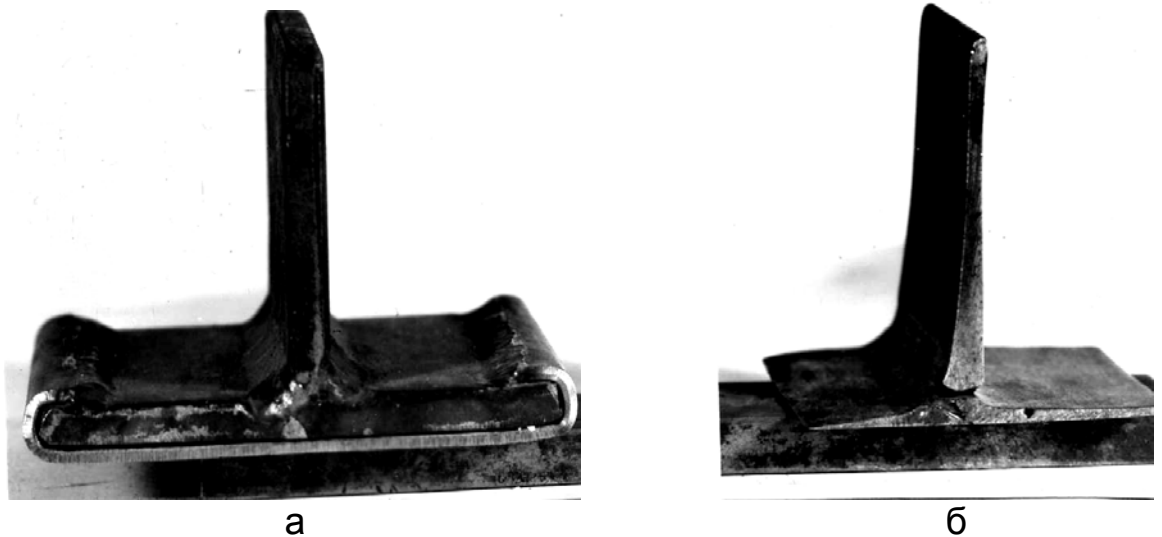


Рис. 11.1. Фрагменти нового (а) та спрацьованого в слабоекислому середовищі (б) шнека транспортної системи дифузійного апарата А1-ПДС-20 (Кожанський цукровий завод)

При корозійно-механічному зношуванні шнека із сталей Ст3 та Ст5 утворені на їх поверхні корозійні плівки мають дуже малу механічну міцність і руйнуються не лише абразивними частками і сокостружковою масою, але навіть потоком рідини. Тому корпус і транспортну систему потрібно захищати надійними захисними покриттями, або вводити у сокостружкову суміш нетоксичні і безпечні інгібітори корозії, які б виключили утворення рихлої іржі на деталях дифузійного апарата.

Інтенсивному корозійному руйнуванню піддається теплообмінна апаратура цукрових заводів. На підігрівачах поверхні, які знаходяться у контакті з дифузійним соком, суцільно покриваються продуктами корозії, що обумовлено його кислотністю. В підігрівачах сирого соку і випарних апаратах труби з вуглецевої сталі піддаються виразковій корозії. В дифузорах та на випарній станції труби з вуглецевої сталі 20А за виробничий сезон кородують на глибину 0,5 – 0,6 мм.

Важливе значення в цукровій промисловості має очищення випарних апаратів від накипу. Содово-кислотний спосіб очищення пов'язаний з інтенсивним корозійним руйнуванням труб, великими витратами кальцинованої соди та простим обладнанням протягом тривалого часу. Разом з тим, цей спосіб не гарантує повного видалення накипу через використання розчинів соляної кислоти низької концентрації.

Накип на нагріваючих поверхнях розчиняється швидше, якщо застосовувати розчини з концентрацією соляної кислоти 5-10 %. Такі розчини застосовують з одночасним додаванням інгібіторів ПБ-5, ПБ-6, або диалкілдіамонійхлориду в кількості 0,5-1% мас. до маси розчину кислоти. Тоді очистку можна здійснити за 3-5 годин. При цьому шавлевокислий і сірчаноокислий кальцій в останніх корпусах випарної

установки видаляється на 60-80%. Після промивання кислотою в апаратах кип'яють слабкі розчини кальцинованої соди або тринатрійфосфату.

В усіх випадках у кислих середовищах для захисту металів від корозії технічно доцільне і економічно вигідне застосування нетоксичних інгібіторів корозії. Найбільш ефективні інгібітори кислотної корозії, які випускаються промисловістю і мають практичне застосування, охарактеризовані нижче.

Інгібітор БА-6 є продуктом конденсації бензиламіну з уротропіном. Ступінь захисту інгібітором БА-6 (2%) сталі-катанки з окалиною у розчині, що містить 13% H_2SO_4 та 8% $FeSO_4$, при концентрації інгібітору 0,3% (мас.) у залежності від температури середовища складає 72-80%. Ступінь захисту вуглецевої сталі в 30%-вому розчині HCl у присутності піноутворювачів, при вмісті інгібітору 0,8% мас., складає 99,7%. Існує ряд інших інгібіторів кислотної корозії: ТДА, І-1-В, І-2, І-3-В, І-1-Е, І-К-40, ОБ-1, КІОЕ-15. Ефективність більшості інгібіторів корозії помітно знижується при підвищенні температури. Один із кращих інгібіторів корозії сталі при високих температурах - катапін А (п-алкілбензилпіридинійхлорид).

Встановлено можливість використання чорного шовку - відходу сульфітного оброблення целюлози - в якості інгібітора корозії вуглецевої сталі Ст3 у 0,5-5% розчинах HCl при температурах 308-373 К. Концентрація чорного шовку складає 2-16 г/л.

В агресивних кислих середовищах найбільш широко використовують нетоксичні інгібітори корозії для захисту обладнання. До таких інгібіторів відносяться: ІФХІ - залишок при виробництві йодобілкового препарату "йодкі", пеназолін, ПКУ-КМ, КПІ-3, БА-6, ХОСП-10, КІ-1.

Нетоксичні інгібітори корозії доцільно застосовувати не лише в харчовій і переробній промисловості, але й у інших галузях промисловості для захисту металів і покращення стану навколишнього середовища.

11.3.5. Захист від корозії теплоенергетичного устаткування

Враховуючи відсутність в Україні достатньої кількості власних енергоносіїв, особливо цінні для теплоенергетичного устаткування харчових і переробних галузей промисловості такі інгібітори, що є одночасно інгібіторами солевідкладень і реагентами для видалення карбонатних шарів з поверхонь теплообміну. Їх застосування може значно підвищити надійність і довговічність та зменшити енергозатратність теплоенергетичного устаткування.

Таких інгібіторів на харчових і переробних підприємствах потребують парові котли ДКВР, брагоперегонні апарати, бродильні та заторні чани, сушварочні котли, парові підігрівачі типу ППНД для екстрагування фарбувальних розчинів з оболонки винограду, розварювальники сировини для виробництва спирту, змійовикові та

трубчасті теплообмінники на пивоварних, спиртових, виноробних і цукрових заводах, пастеризаційні установки та інші теплоенергетичні апарати під час експлуатації та їх очищення розчинами кислот.

Молекули багатоцільових інгібіторів – це багатофункціональні органічні сполуки -похідні фосфонової кислоти і їхніх солей, об'єднані під загальною назвою ЕТХІМ. Ці інгібітори мають високу ефективність у широких межах рН (0,5 - 8), температур (≤ 368 K) і солемісту (≤ 2000 мг/л). У промислових умовах випробувані фосфорно- і солянокислі розчини реагентів при температурах 293-368K та концентраціях кислот 10-30% (HCl) і 10-72% (H₃PO₄). Швидкість видалення відкладень із поверхонь теплообміну при застосуванні поліфункціональних реагентів скорочується в 3-5 разів. Особливістю дії реагентів є розпушування й одночасна флоатація відкладень, завдяки виділенню (поряд з СО₂) газових продуктів розпаду реагенту. У нейтральних водних середовищах при жорстких умовах - високих температурах і солемісті, активність ЕТХІМ співрозмірна або навіть вища за активність цинкхромфосфатних інгібіторів, застосування яких обмежене високою токсичністю солей Cr і Zn. Інгібітори відповідають вимогам санітарно-гігієнічних норм. Мікробіологічні випробування активного мулу показали відсутність токсичності реагентів і їх згубної дії на мікрофлору, що дозволяє подавати продувні води і промстоки після оброблення теплових установок на біологічне очищення.

При утворенні відкладень на внутрішніх поверхнях нагрівання парових котлів, які широко застосовуються у харчовій та переробній промисловості, знижується їхня продуктивність, збільшуються витрати палива, відбувається локальне перегрівання металу, що є причиною виникнення аварійних ситуацій. Для запобігання накипоутворенню і відмивання раніше утворених відкладень, живильну воду доцільно обробляти субстехіометричною композицією фосфорорганічних інігібіторів: І -оксиетилидендифосфоною (ОЕДФ) та нітрлотриметилтрифосфоною кислотами (НТФ). В даний час із фосфорорганічних комплексів тільки для ОЕДФ і її цинкового комплексу є дозвіл органів Держсаннагляду на застосування у воді об'єктів паропостачання і господарсько-питного із ГДК (0,6 мг/л ОЕДФ і 5,0 мг/л Zn - ОЕДФ).

Для видалення кисню з живильної води котельних установок застосовується заміщений гідроксиламін, що відрізняється низькою токсичністю і здатністю видаляти кисень також із конденсату. Така домішка до води більш ефективна в порівнянні з гідразином, не токсична і може використовуватися разом із сульфатом натрію.

Очищення теплообмінного устаткування від різноманітних відкладень проводять кислотними розчинами з добавками інгібіторів. За мийні правлять розчини соляної і сірчаної кислот, органічні кислоти (лимонна, щавлева, оксиетилидендифосфонова, фталева, сульфамінова, адіпінова та ін.), комплекс-іони, композиції мінеральних

кислот з комплексіонами, суміші низькомолекулярних кислот (КНМК). Вибір варіанту відмивання залежить від виду металу теплообмінника і характеру відкладень. Технологічна схема видалення відкладень повинна забезпечувати достатню якість очищення внутрішніх поверхонь труб теплообмінників, апаратів, колон і сприяти створенню необхідних гідродинамічних і температурних режимів відмивання.

Для запобігання корозії, гідратуутворенню і солевідкладенню в агресивних кислих середовищах при нормальній і підвищеній температурах застосовують інгібітор комплексної дії КППГ, що містить (у %): 1-10 катапіну, 20-60 поліпропіленгліколю, інше - вода.

На основі великотоннажного побічного продукту хіміко-фармацевтичного виробництва розроблений ефективний інгібітор кислотної корозії металів ХФІ (низьков'язкий водяний розчин смолоутворюючих гетероциклічних азотомістких з'єднань), призначений для захисту вуглецевих і легованих сталей у розчинах H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 , оцтової та інших органічних кислот різних концентрацій при звичайних і підвищених температурах. Оптимальна концентрація інгібітора 0,5-2,0 г/л. Ступінь його захисту в кислотах 98-99%. Інгібітор ХФІ знаходить промислове застосування при кислотному очищенні теплообмінної апаратури.

Досліджена можливість промислового випуску водяного розчину інгібітора корозії в кількості більше 1000т із відходів виробництва кремнію. Вторинна сировина ($SiO_2 \cdot 2CaCl_2$) промивається водою і центрифугуванням з неї виділяють дрібнодисперсний двоокис кремнію, який є інгібітором.

На основі відходів миловарного і дріжджового виробництв синтезовані інгібітори корозії ГІК-2, ГІК-3, а також їх композиції з аніонною ПАВ. Вивчено вплив інгібіторів на корозію сталі Ст3 у розчині соляної кислоти. Максимум ефективності дії інгібіторів досягається при концентрації 10-12 г/л.

11.3.6. Протикорозійний захист холодильного обладнання і комунікацій

В більшості галузей харчової і переробної промисловості АПК для проведення технологічних процесів застосовують охолодження перероблених продуктів.

Одним з найбільш розповсюджених холодоносіїв на підприємствах бродильної промисловості є вода. Найбільш раціонально застосовувати оборотну воду, охолоджену на градирнях. Вода легко транспортується, має високу теплоємність, великий коефіцієнт теплопередачі, доступна і має низьку вартість. Охолоджуючі низькотемпературні агенти (розчини солей, льодяна вода, аміак, хладон та фреон) застосовують тоді, коли неможливо отримати потрібну температуру при охолодженні водою. В бродильній промисловості теплообмінники застосовуються для регулювання зброджування, варіння сусла, стабілізації і освітлення вина,

пастеризації вина і пива. Обладнання виготовляють з вуглецевих та легованих сталей, чавунів, міді, латуні, бронзи, алюмінію та неметалевих матеріалів.

Відстійні чани на пивзаводах це, найчастіше, циліндричні сталеві резервуари з розташованими всередині сталевими змійовиками, куди подають воду для охолодження сусла.

Зрошувальні охолоджувачі застосовують для охолодження пивного сусла і виноматеріалів. Вони мають до трьох сталевих секцій, які охолоджуються водопровідною і льодяною водою, або ропою. Причому, витрати холодоносіїв у 2 – 2,5 рази перевищують об'єм охолоджуваного сусла. Під час роботи апаратів труби з вуглецевих сталей кородують, покриваються осадам, що значно збільшує витрати охолоджуючих рідин.

Кожухотрубні теплообмінники найчастіше використовують для охолодження сусла, вина, конденсації водно-спиртових парів тощо. У багатьох випадках кожухи і труби, виготовляють із сталей Ст3 і 10. Аналогічне призначення мають і дефлегматори спиртових заводів. Їх трубчасті поверхні омиваються бражкою та холодною водою.

Змійовикові та пластинчасті теплообмінники використовують на заводах первинного виноробства і підприємствах бродильної промисловості. Підведення до них холодоносіїв здійснюється по трубах з вуглецевих сталей, які кородують і зменшують теплопередачу в апаратах.

Пастиризаційно-охолоджувальні установки для вина ВПУ-5 забезпечують подачу вина по трубах з нержавіючої сталі, а гарячої і холодної води – по трубах з вуглецевих сталей, які з часом кородують і зменшують ефективність теплообмінних апаратів. Аналогічні за конструкцією і пастеризатори Р-11-Е фірми „Альфа-Лаваль”, де як холодоносії використовують холодну воду або ропу.

Охолоджуючі ропні системи в харчовій і переробній промисловості застосовуються там, де безпосереднє охолодження за допомогою холодильного агента небажане. Найбільш вживаними холодоносіями у цих випадках є розчини хлористого натрію (NaCl), хлористого кальцію (CaCl), хлористого магнію (MgCl₂), які забезпечують отримання низьких температур (до – 50 °С). Для досягнення більш низьких температур за проміжний холодоносій можна взяти етиленгліколь, фреон, етиловий спирт, толуол, ізопропілбензол та інші речовини. Принципова схема ропного охолодження подана на рис. 11.2.

З випарника аміачної чи фреонової машини ропа насосом подається в охолоджувальні батареї, отримує тепло з навколишнього середовища і повертається назад. Ропні системи знайшли широке використання на промислових і торгових підприємствах – холодильниках, на фабриках по виробництву морозива, в фармацевтичній, мікробіологічній, бродильній, молочній, м'ясній,

винній та інших галузях харчової та переробної промисловості промисловості, а також у вагонах-льодниках.

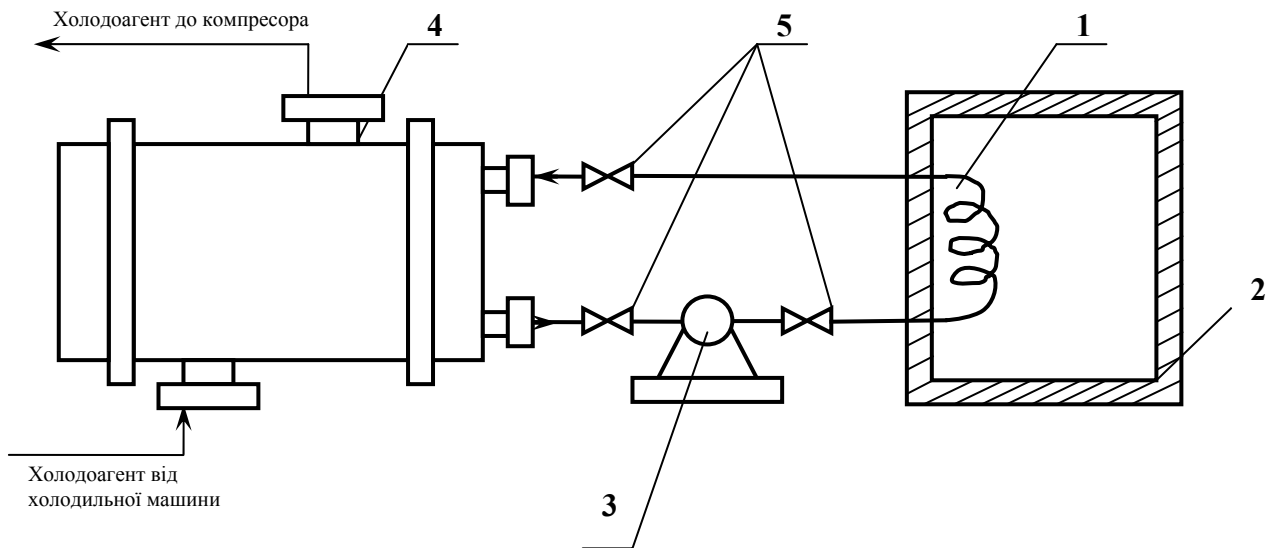


Рис. 11.2. Схема ропного охолодження апарата або приміщення: 1- ропна батарея; 2- апарат (приміщення); 3- насос; 4- випарник холодильної машини; 5- регулювальний вентиль

Для виготовлення трубопроводів аміачних та фреонових холодильних машин великої і середньої продуктивності, водяних і ропних трубопроводів застосовують безшовні труби із сталей марок В Ст3 сп 1, ВМ Ст3 сп 1, Ст3 та 20.

Термін служби обладнання до появи наскрізних руйнувань під дією холодильної ропи коливається в межах 0,5-3 роки. Характерна нерівномірна корозія насосів, апаратури і трубопроводів, виготовлених з чавуну та вуглецевої сталі (рис.11.3).

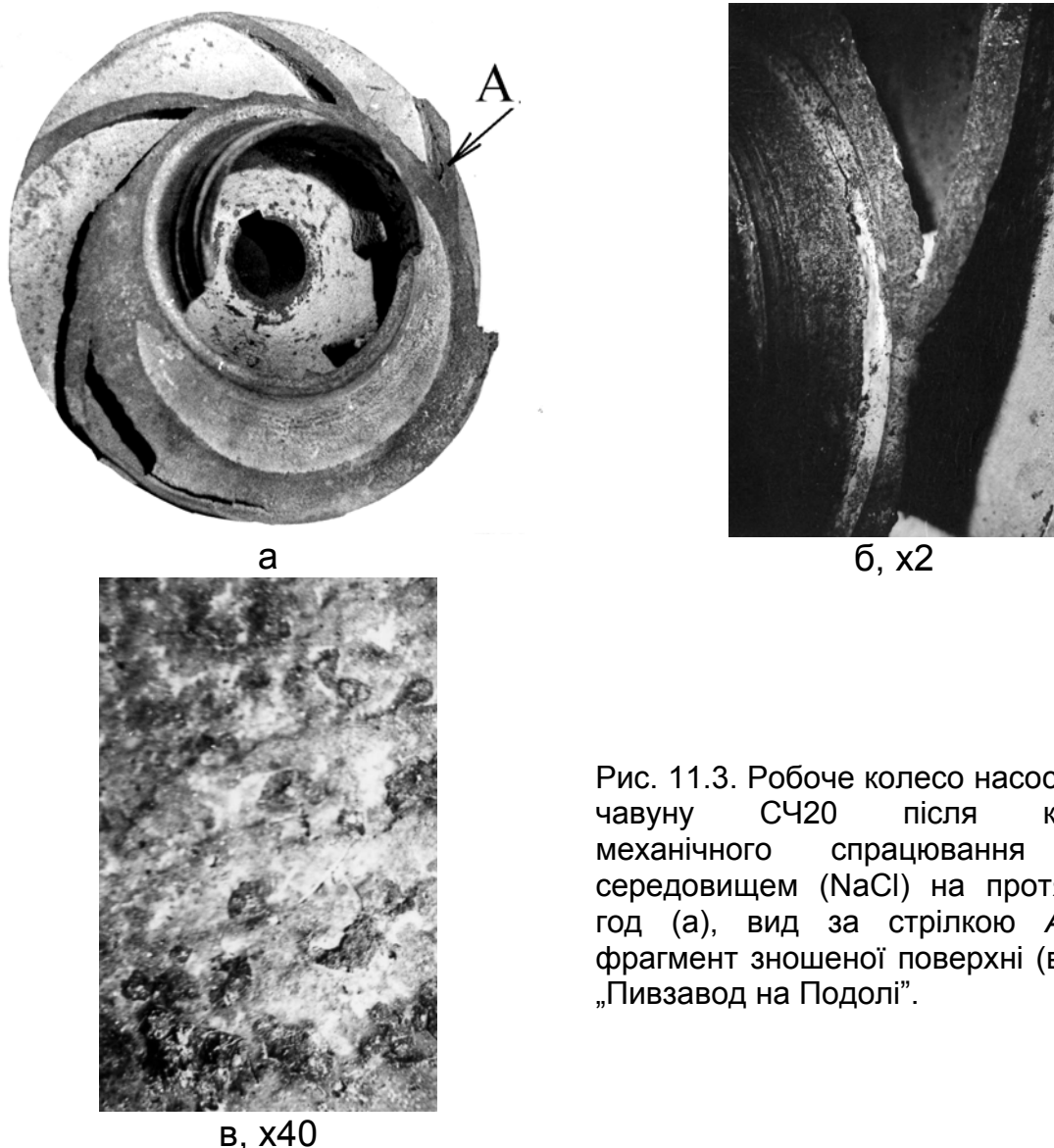


Рис. 11.3. Робоче колесо насоса ЧК-12 з чавуну СЧ20 після корозійно-механічного спрацювання ропним середовищем (NaCl) на протягом 900 год (а), вид за стрілкою А (б) та фрагмент зношеної поверхні (в) на ВАТ „Пивзавод на Подолі”.

Разом з тим сталі Ст3, Ст4, а також сталі 10 і 20 є основними конструкційними матеріалами для виготовлення випарників і батарей ропних систем. Застосування нержавіючих сталей типу 12Х18Н9Т не дає бажаних результатів, тому що вони піддаються корозійному розтріскуванню (рис. 11.4).

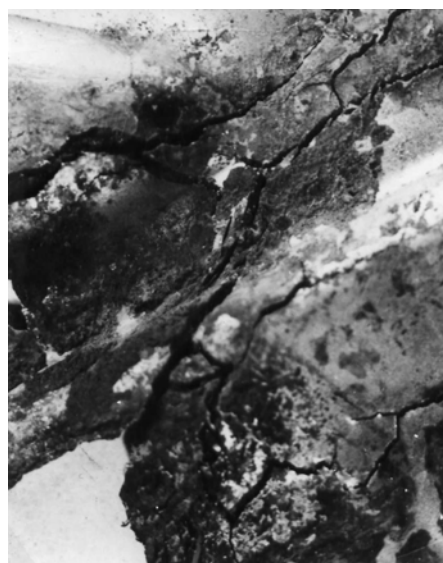
Сталі марок Х17Н13М3Т і Х17Н13М2Т хоча і є більш стійкими у ропі, але вони дорогі і дефіцитні.

Зменшити агресивність ропи можна за рахунок домішування до неї хромату натрію (Na_2CrO_4) з їдким натром (NaOH) до рН 8,5. Але хромат натрію негативно діє на шкіру. Інгібують ропні середовища також за допомогою фосфатів і поліфосфатів, карбонату і нітриту натрію, оксиду кальцію. Найбільш ефективними інгібіторами для ропних середовищ є хромати, які ще з 40-х років минулого століття застосовували для захисту ропних систем м'ясопереробних підприємств, але вони токсичні і екологічно небезпечні. Крім того недостатня кількість інгібітора, збільшення кислотності або

температури середовища може призвести до інтенсифікації корозійного руйнування металів. Фосфати ж менш ефективні.



а



б, $\times 2$



в, $\times 4$



г, $\times 4$

Рис. 11.4. Фрагменти вражених корозією пластин П-2 зі сталі 12Х18Н9Т пастеризаційно-охолоджувальної установки ОПУ-15 (2000 год. експлуатації на міському молочному заводі №2 у м. Києві) під дією ропи: а- загальний вигляд; б- фрагмент поверхні біля гумового ущільнення; в,г- втомне міжкристалічне руйнування та фретинг-корозія.

Вивчено захисну дію цукрату кальцію при корозії сталі Ст3 у 10-30%-вих розчинах холодоносіїв з хлористим кальцієм. При введенні 1% інгібітору в 30%-вий розчин CaCl_2 швидкість корозії деталей промислової установки зменшується майже в 5 разів.

Більшість холодильних машин середньої продуктивності і всі великі охолоджуються водою з артезіанських свердловин, річок, ставків, озер та міської водопровідної мережі. Для відведення 1 кВт енергії холодильного агента потрібно близько $0,1 \text{ м}^3/\text{год}$ води. Таким чином, витрати води для великих холодильників становлять десятки

кубометрів за годину. А тому доцільно застосовувати системи зворотнього водопостачання, які для охолодження води включають форсуночні басейни, бризкальні, плівкові, крапельні та вентиляторні градирні, деталі яких потребують захисту від корозії за допомогою інгібіторів.

Інгібітори корозії істотно впливають на окремі види корозійного і корозійно-механічного зношування насосів і компресорів. Загальний є результатом сукупного впливу тертя, вібрації, хімічної і електрохімічної корозії, втоми тощо. Інгібітори впливають на всі складові процесу.

Інгібітори першого покоління (АКОР і КП) мають високу зольність, застосовуються у великих концентраціях, підсилюють корозію в кислих середовищах. Вони збільшують також фреттинг-корозію і корозійне розтріскування. Інгібітори другого покоління НГ-107М і ІГ-110М активні при більш низькій концентрації (3-5%), що зменшує корозійно-механічний знос, але вони мало впливають на корозійну втому, розтріскування, фреттинг-корозію, водневий знос. Інгібітори третього покоління захищають від корозії в нейтральних і кислих середовищах та знижують усі види корозійно-механічного зносу. Нова інгібіторна композиція на молібденовій основі Perfor Max 401 фірми «Drew Ameroid U.K., Ltd» ефективно запобігає корозії і утворенню відкладень у відкритих рециркуляційних водоохолоджувальних системах. Вона не містить фосфатів, хроматів і цинку, що робить її екологічно безпечною. Наявний у композиції ароматичний азол забезпечує протикорозійний захист сталі і мідних сплавів, а розпушуючі реагенти виключають утворення шламів і накопичення солей жорсткості.

Досліджено захисну дію оксиетилендифосфонової кислоти (ОЕДФ) і її композицій із $ZnSO_4$ при корозії сталі 10 в оборотних водах. Встановлено можливість використання композиції ОЕДФ із сульфатом цинку при низьких концентраціях компонентів для захисту від корозії устаткування з вуглецевих сталей. Найбільш ефективна композиція: 5 мг/л ОЕДФ + 7,5 мг/л Zn^{2+} (ступінь захисту близько 90%). Оптимальні умови застосування інгібітору такі: рН оборотної води 6,5-8, а температура ≤ 333 К.

Вивчено фізико-хімічні і захисні властивості інгібіторів комплексної дії КППГ. Визначено оптимальне відсоткове співвідношення компонентів КППГ (1-10 катапіну, 20-60 поліпропиленгліколю, інше - вода). Встановлено, що КППГ ефективний для запобігання корозії та гідратуутворенню і солевідкладенню в агресивних середовищах при нормальній і підвищеній температурах.

Оброблення охолоджувальної води поліфосфатом натрію (1-3 мг/л по PO_4^{3-}) призводить до здрібнювання, аморфізації оксидів заліза з утворенням шару гідрогелю $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$. Формування покриття такого типу вирівнює швидкість корозії по поверхні, збільшує термін служби водоводів, підвищує їхні експлуатаційні характеристики.

Як інгібітори корозії для охолоджуючих роп інколи правлять фосфати, особливо в тих випадках, коли використання хроматів виключається. Силікати також застосовуються для інгібування охолоджуючих роп хлориду натрію, але вони можуть виявитися неефективними в ропах хлориду кальцію.

Для захисту сталей від корозії в ропних системах випробувані комбіновані інгібітори на основі окислювача (типу MoO_4^{2-}), етаноламіну і Na - солі гудрону нафтенної кислоти з загальною формулою R-COONa. Для інгібування сталей в ропі з рН 12,5-13,5 застосовують також суміш на основі літію молібденовокислого (Li_2MoO_2) і натрію молібденовокислого (Na_2MoO_4).

11.3.7. Інгібування технологічних середовищ харчових виробництв

Принципи використання кожного інгібітора розробляються для конкретного технологічного процесу. Питання інгібування багатьох технологічних середовищ харчових виробництв мало вивчені. Інгібітори застосовують, в основному, для оброблення допоміжних середовищ, проте відомі випадки їх застосування для технологічних середовищ. У США пентанову кислоту ($\leq 1\%$) використовують при захисті металевої тари для зберігання оцту. Інгібування питної води відповідно до санітарних норм проводять мікродозами гексаметафосфату натрію - 4-5 мг/л у перерахунку на фосфорний ангідрид.

Для захисту сталевих трубопроводів питної води рекомендується силікатне оброблення (попереднє дозування SiO_2 20-30 мг/л, а потім, протягом декількох місяців – по 5 мас. ч). Після утворення захисного шару на внутрішніх стінках оброблення припиняють. Періодично доцільно забезпечувати регенерацію захисного шару.

У якості інгібітора кислотної корозії застосовують мелясу, яка містить 9-10% забарвлюючих речовин до маси сухих речовин. Передбачається, що дія натрієвих інгібованих з'єднань забарвлюючих речовин має характер хімічної адсорбції. Відоме також застосування спиртової мелясної барди і тютюнового порошку для захисту від кислотної корозії.

Гравіметричним методом вивчена захисна дія рослинних продуктів (1%-вого соку або сухої речовини) на корозію низьковуглецевих сталей і алюмінію в 3%-вому розчині хлориду натрію, розчинах сірчаної і соляної кислот. Ступінь захисту сталі більшу за 60% у хлориді натрію забезпечують часник, морква, картопля, а у кислих середовищах - часник, чорний перець, соєві боби. Корозію алюмінію в розчині соляної кислоти гальмує чорний перець.

Досліджено властивості нетоксичних інгібуючих відходів перероблення чорноморської червоної водорості *Phyllophora nervosa*, отримані при виробництві желеподібних продуктів, на зразках зі сталі Ст3 у розчинах H_3PO_4 і HCl різноманітних концентрацій при 303-368 К.

Інгібітор, виготовлений із відходів *Phillophora nervosa*, за ефективністю захисту низьковуглецевих сталей у травильних розчинах із температурою до 373 К не поступається промисловим інгібіторам С-5, ПКУ, ХОСП-10.

Вивчено також захисну дію відходів перероблення чорноморської червоної водорості *Phillophora nervosa* при корозії вуглецевих сталей в розчинах сірчаної і азотної кислот, водопровідній і морській воді. Встановлено, що ці відходи у концентрації 1% знижують швидкість корозії сталей Ст3, 40 і 60 у широкому інтервалі температур і концентрацій сірчаної кислоти та забезпечують ступінь захисту на рівні 94-99,5%.

Створено інгібітори корозії металів на основі воску цукрового очерету і його фракцій, які ефективні при захисті сталі Ст3 і латуні у водяних середовищах. Великотонажність відкритого сировинного джерела дозволяє освоїти промисловий випуск інгібіторів.

Для консервації парових камер випарних апаратів в харчовій промисловості застосовують леткі інгібітори, зокрема, уротропін із нітритом натрію, фосфатом амонію і кальцинованою содою (мас. ч.): 7,7 нітриту натрію + 5,5 двохзаміщеного фосфату амонію + 1 кальцинованої соди.

Як малотоксичні інгібітори корозії алюмінію і його сплавів використовують водяні розчини з'єднань ванадію. Ванадати амонію і натрію (концентрації яких у перерахунку на ванадій складають відповідно 1 і 10 мг/л), захищають алюміній і його сплави від корозії при будь-яких забрудненнях корозійного середовища.

Перспективні нетоксичні інгібітори на основі натрієвих солей винної і глюконової кислот. Глюконати спроможні гальмувати корозію сталей у воді при високих температурах. Інгібітор Антикор 2 - комплексне з'єднання борної кислоти з глюконатом кальцію - використовують у концентраціях 0,01-0,05% для захисту технологічних систем і лабораторних інструментів при обробленні їх у водних розчинах та при стерилізації.

Вивчення захисних властивостей закордонних інгібіторів корозії (CS - 438, ASW -18, D-4512, C2004A, SR-120T) для систем господарсько-питного водопостачання показало, що найбільш ефективним є інгібітор D-4512 фірми «Nalko». Разом з тим, вітчизняний цинкфосфатний інгібітор на основі гексаметафосфату і сірчаноокислого цинку за ефективністю практично йому не поступається.

У Великобританії для антикорозійного оброблення металів і сплавів запропоновано використовувати аскорбінову кислоту (вітамін С). Встановлено, що після покриття очищеної металевої поверхні розчином аскорбінової кислоти у поєднанні з молібденовим порошком покриття швидко і міцно зв'язується з металом і утворює захисний шар, на який можна наносити інші захисні покриття. Спроможність

запобігати корозії металу, притаманна вітаміну С, знайшла застосування на багатьох англійських фірмах.

Ефективність захисної дії інгібіторів істотно залежить від природи металу чи сплаву, особливостей його електронної будови. Захисний ефект залежить також від складу і виду інгібітора, гідродинамічних умов інгібування середовищ, фізико-хімічних властивостей компонентів інгібіторної суміші і характеру взаємодії цих компонентів - синергізму (посилення), або антогонізму (зниження) захисних властивостей. Синергізм окремих компонентів у суміші обумовлений їхньою хімічною взаємодією, а також підвищенням адсорбційних властивостей за рахунок взаємного впливу. На ефективність анодних інгібіторів впливає наявність у технологічному середовищі абразивних часток, які оновлюють поверхні сплавів та знижують захисний ефект. З досліджених інгібіторів найбільш ефективним при корозійно-ерозійному зношуванні сталі Ст3 виявився гідроксид натрію, а найменш ефективним - нітрит натрію (хоча за відсутності абразиву в розчині обидва інгібітори захищають сталь від корозії практично повністю). Посилення інгібіторного ефекту гідроксиду натрію пояснюється його здатністю гальмувати катодний процес на поверхні сталі при постійному її оновленні абразивом.

Допоміжними технологічними середовищами харчових і переробних виробництв є неорганічні і органічні мийні та очищувальні засоби для санітарної обробки обладнання. До неорганічних відносяться їдкі луги, кальцинована сода, фосфати, силікати (метасилікат натрію, рідке скло та ін.), азотна, сірчана, соляна та фосфорні кислоти. Органічні обмежуються натрієвими і калієвими солями вищих жирних кислот та різними органічними кислотами. Санітарній обробці підлягає широка номенклатура апаратів в фармацевтичній, мікробіологічній, молочній, бродильній, хлібопекарській, кондитерській та інших галузях харчової і переробної промисловості. Завдяки дії зазначених мийних та очищувальних речовин деталі машин та апаратів інтенсивно руйнуються. На рис. 11.5. показна касета пляшкомильної машини ОМГ-3, пошкоджена мийними розчинами, до яких не додавали інгібіторів.

На Московському винокомбінаті в розчини, які подавались в пляшкомильні машини, спочатку додавали соляну кислоту (20 г/л) та інгібітор уротропін (2 г/л). При цьому корозія пошкоджувала металоконструкції та повітропроводи витяжної вентиляції. Потім замінили соляну кислоту на сірчану тієї ж нормальності (0,5 N). За інгібітори взяли відходи пивного виробництва – пивні дріжджі і пивну шротину, які попередньо обробили сірчаною кислотою. Для підсилення інгібіторного ефекту в розчин вводили 10 г/л хлориду натрію. Корозія металоконструкцій пляшкомильних машин була зменшена у 2,5 рази.

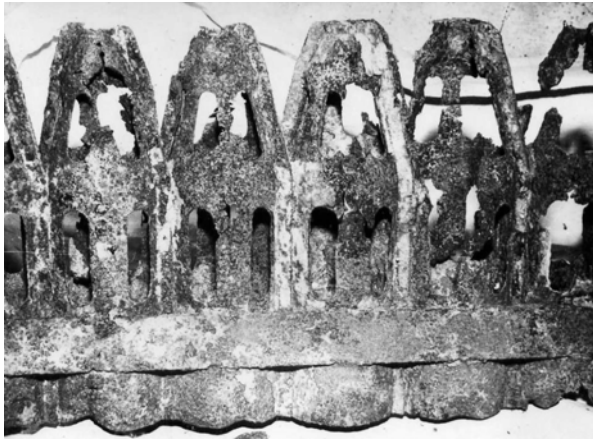


Рис. 11.5. Касета пляшко-мийної машини з сталі Ст 5 після 2500 годин експлуатації з виконанням санітарних обробок без застосування інгібіторів (ТОВ „Імона”, м. Київ)

Інгібітори корозії, які застосовують для зниження агресивності технологічних середовищ, повинні відповідати

таким вимогам: зберігати ефективність при зміні умов проведення технологічних процесів, бути легкорозчинними, не впливати негативною на органолептичні, хімічні і фізичні властивості продукції; не утворювати відкладень на стінках апаратів і трубопроводів; діяти тривалий час і не втрачати властивостей при зберіганні; мати стійкість до окислювання і відновлення, стабільність в усьому діапазоні робочих температур і тисків; діяти через можливо найбільш короткий час після введення; створювати високий захисний ефект при низьких концентраціях; знижувати швидкість загальної корозії і швидкість локальних корозійних руйнувань (наприклад, піттингу); не викликати і не підтримувати емульгацію води; не містити токсичних компонентів; не стимулювати розвиток мікроорганізмів.

11.3.8. Інгібування модифікаторів іржі і полімерних покриттів

Застосування пасивуючих інгібіторів для захисту обладнання від корозії ґрунтоване на утворенні нерозчинних оксидів і гідроксидів у процесі корозії металу. Той же результат може бути досягнутий за рахунок введення в середовище речовин, що не мають окисних властивостей, але утворюють на поверхні металу нерозчинні з'єднання. Наприклад, фосфати широко використовуються для запобігання корозії сталевих трубопроводів охолоджувальних систем. Силікати аналогічно впливають на корозію алюмінієвих сплавів. Сульфат двохвалентного заліза використовується для захисту від корозії виготовлених із мідних сплавів теплообмінників, які працюють на природній воді. Інгібітори-перетворювачі вводять, як правило, разом із двохвалентними катіонами, зокрема Zn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , які знижують розчинність з'єднань заліза та інгібують деполяризацію кисню на поверхні металу. В нейтральних розчинах, які містять іони Ca^{2+} і Mg^{2+} , швидкість корозії знижується також за рахунок утворення карбонатних відкладень, блокуючих катодні ділянки поверхні. У цілому, інгібітори-перетворювачі менш ефективні, ніж пасиватори, але, завдяки нетоксичності, їх застосування може виявитися більш доцільним.

Інгібовані розчини холодного фосфатування (ІРХФ), у порівнянні з звичайними модифікаторами іржі, складаються з раціонально

підібраних сумішей інгібіторів корозії, у яких максимально проявляється ефект синергізму. Вибирати інгібітори корозії, додають вводитимуться до складу модифікаторів іржі, потрібно з урахуванням стану металевої поверхні, природи іржі, сорбційних характеристик самого інгібітора. ІРХФ насичують іржу, зупиняючи процес корозії на межі поділу метал-іржа.

Особливу групу хімічних засобів, які застосовують для запобігання корозії обладнання, складають ґрунтовки на основі лігніну. Природний полімер, лігнін є складним багатофункціональним з'єднанням, компоненти якого мають властивості сорбентів із високою селективністю до багатозарядних іонів.

Однокомпонентний лігніновий модифікатор іржі ПРЛ-2 (автоперетворювач АПРЛ-2), розроблений у Донецькому національному університеті торгівлі, випускається Запорізьким та Миколаївським гідролізно-дріжджовими заводами. Це масляниста маса темно-коричневого кольору, нетоксична, не горить, добре утримується на вертикальних і стельових поверхнях. Цей модифікатор можна застосувати для оброблення поверхонь, покритих пухким або твердим шаром іржі товщиною до 120 мкм при високих і низьких температурах.

Розроблений також нетоксичний інгібований модифікатор іржі (НІМІ), до складу якого входить ортофосфорна кислота, жовта кров'яна сіль, винна кислота, етиловий спирт, білковий відстій (відходи пивоварного виробництва). НІМІ містить танини і тому більш міцно зв'язує частки іржі не тільки між собою, але і з металом, завдяки утворенню органічних комплексів за рахунок взаємодії танинових гідроксильних і карбоксильних груп з оксидами заліза. Перевагою НІМІ, що містить танини, є здатність взаємодіяти з окалиною.

Інгібовані модифікатори іржі при науково-обґрунтованому застосуванні істотно підвищують надійність протикорозійних систем.

Підвищувати захисні властивості покриттів на обладнанні можна за рахунок використання інгібованих ґрунтовок або застосуванням попереднього оброблення металевої поверхні інгібітором корозії з подальшим нанесенням полімерного покриття за умови збереження задовільної адгезійної міцності захисної системи.

Перспективним напрямком підвищення захисних властивостей антикорозійних покриттів на деталях харчового і переробного обладнання є внесення до їх складу інгібіторів корозії. Захисна дія таких покриттів обумовлена розчиненням інгібуючих домішок, які знаходяться в плівці, при контакті з водою чи технологічним середовищем з наступною їх адсорбцією на активних поверхнях металу. Впливаючи на відновлювальну спроможність оксидів на межі метал-покриття, антикорозійні пігменти можуть підвищувати стійкість покриттів до розшаровування при взаємодії з середовищем-

електролітом у місцях з дефектами полімерної плівки. Захисна дія таких покриттів називається дифузійно-інгібуючою.

Деякі інгібітори атмосферної корозії вводять до ґрунтовок, лакофарбових матеріалів, полімерних плівок (поліетиленових, хлорвінілових), мастик та спеціальних полімерних композицій для підсилення їхніх захисних властивостей.

Запровадження 5% мас. розчинних інгібіторів корозії Акор-1 або НГ-203А підвищує захисну здатність покриття не тільки за рахунок механічної ізоляції металу і високого омичного опору, але і гальмуванням корозійного процесу адсорбційно-хемосорбційною плівкою, яка утворюється на межі сталь-покриття. Такий захисний прошарок підвищує водовідштовхуючу здатність і ефект післядії інгібованих мастик. Інгібітор корозії Акор-1 входить також до складу антикорозійної протишумної мастики АПМ на основі бітуму. Фізико-механічні, гідроізоляційні і захисні властивості інгібованих мастик вищі, ніж у немодифікованих.

Інгібітором корозії в композиції на основі епоксидних, вінілових і алкідних смол є 50%-ва порошкоподібна (діаметром менше 30 мкм) аніонообмінна смола, яка містить до 17% іонів NO_2^- . У агресивному середовищі покриття віддає до розчину інгібітор (NO_2^-) і поглинає корозійноактивні аніони.

Для інгібування полімерних композицій також застосовують порошкоподібні метали, поверхня яких піддається попередньому фосфатуванню або оксидуванню. При захисті технологічного устаткування у виробництві агароїду, яке експлуатується у вологій атмосфері що містить йод, до складу ґрунтовки ВЛ-С2 вводили інгібітор N-3, який включає молібдат, вольфрамат, хромат і ванадат аміну каніфолі, що істотно підвищувало захисні властивості покриття емаллю ЕП-755.

Досліджені недефіцитні і нетоксичні неорганічні інгібітори NaNO_2 , CdO , V_2O_5 , TiO_2 , MnO_2 , Fe_2O_3 . Встановлено, що вони знижують інтенсивність окислення і термодеструкцію поліетиленових покриттів, покращують їх декоративний вигляд.

Якщо ненаповнені лакофарбові покриття здійснюють пасивний захист металів від корозії (ізолюють метал від середовища), то інгібовані покриття забезпечують активний захист (анодний або катодний). Запровадження плівкоутворюючих інгібіторів зменшує витрати матеріалів, завдяки нанесенню покриття меншої товщини і зменшує вартість захисних робіт. Поєднання у полімерних плівках функцій бар'єрного та інгібіторного захисту дозволяє одночасно проводити консервацію і пакування металевих деталей.

Розроблені композиційні матеріали на основі поліолефінів та інгібіторів корозії, які знаходяться у рідкому стані. Протикорозійні властивості таких матеріалів визначаються швидкістю переміщення інгібіторів корозії з плівки до поверхні виробу і проникністю у плівку

корозійних реагентів. Ці характеристики визначаються механізмом зв'язування інгібіторів в полімерній матриці та їхніми фізико-хімічними характеристиками.

Жирові гудрони (багатотонажні відходи масложирових комбінатів) - це кубові залишки дистиляції жирних кислот, виділених із тваринних жирів, гідратованих рослинних олій і соапстоків. Застосування гудронів-відходів масложирового виробництва в якості інгібіторів атмосферної корозії не випадкове, тому що вони є сумішшю насичених і ненасичених кислот, які мають поверхнево-активні властивості і є інгібіторами екрануючої дії. Електрохімічні дослідження показали високі захисні властивості бітумних мастик, інгібованих гудронами.

Таким чином, розроблення композицій адгезійно-інгібуючої дії є одним із перспективних напрямків підвищення ефективності протикорозійних полімерних покриттів.

11.3.9. Застосування біологічного інгібітора корозії

Авторами запропонований, запатентований і досліджений біологічний інгібітор корозії (БІГК), до складу якого входять мікроорганізми *Saccharomyces Caresbergensis* Hansen. Це одноклітинні організми різноманітної форми (яйцеподібної, еліпсоїдної, витягнутої). Розмір клітин коливаються від 9 до 11 Å (ангстрем) у довжину і від 6 до 8 Å у ширину. Мікроорганізми містять у середньому сухих речовин СР і води 25 і 75%, відповідно. До складу (СР) мікроорганізмів входять (у %): азотовмісні речовини 35-65, у середньому 45; безазотні екстрактивні речовини 20-63, у середньому 50; жири 2-5; мінеральні речовини 5-11, у середньому 8. Ці мікроорганізми використовують у харчовій технології для зброджування пива. При цьому утворюється 0,15-0,2 л відходів на 1 дкл готової продукції.

Для підвищення активності БІГК запропонована активувальна добавка (АД) на основі витяжки із солодових паростків. Солодові паростки, які використовуються для приготування АД (витяжки із солодових паростків), є відходом солодового виробництва. Одержують солодові паростки по відомій технології на ростковідбійній машині. Вихід паростків 2,5-4% до виходу солоду. Паростки містять, у %: азотовмісних речовин - 24; жиру - 2; безазотистих речовин - 42; клітковини - 14; золи - 8; вологи - 10. Витяжку із солодових паростків одержують настоюванням протягом 2 годин розрахункової кількості здрібнених паростків у воді. Після настоювання суміш фільтрують. Раніше для інгібування корозійноактивних середовищ витяжка не використовувалася.

Синергетичний (підсилюючий) нетоксичний компонент, який є живильним середовищем для мікроорганізмів, використовували при такому співвідношенні компонентів (у мас. %): мікроорганізми 0,1-0,3; активувальна добавка 3,0-5,0; вода - інше. БІГК готували послідовним

розведенням у воді розрахункової кількості мікроорганізмів і активувальної добавки: 0,2 кг мікроорганізмів, 3 кг витяжки із солодових паростків розводили у воді до загальної маси 100 кг.

Результати мікробіологічних досліджень співвідношення кількості мікроорганізмів і активувальної добавки (АД) приведені в табл. 11.1. Очевидно, що оптимальною концентрацією АД є 4% мас. Менша кількість АД (< 4%, мас.) не забезпечує достатнє живлення мікроорганізмів, а більша (> 4%, мас.) – пригнічує діяльність мікроорганізмів, що в обох випадках призводить до збільшення кількості їх мертвих клітин.

Таблиця 11.1

Вплив АД на життєдіяльність мікроорганізмів

Мікроорганізми + АД, %	0,2+0	0,2+2	0,2+4	0,2+6	0,2+8	0,2+10
Живі клітини, %	87,4	91,3	95,7	90,1	92,7	91,6
Мертві клітини, %	12,6	8,7	4,3	9,9	7,3	8,4

Досліджено залежність захисного ефекту БІГК від концентрації його компонентів при захисті трубопроводів із сталі Ст3 від корозії у технологічній льодяній воді, що застосовується на „Пивзаводі на Подолі” у м. Києві для охолодження сусла, а також виявлена синергетична роль активувальної добавки на основі солодових паростків.

Найбільш ефективним виявився БІГК з оптимальною рецептурою 0,23% мас. мікроорганізмів, 3,86% активуючої добавки, інше – вода, що забезпечив ступінь захисту сталі на рівні 98,3%.

Засобом досягнення високого захисного ефекту в синергетичній композиції очевидно є фермент α - амілаза, який міститься в солодових паростках і розщеплює вуглеводні полімери (крохмаль, целюлозу), що потрапляють у середовище з відходів пивоварного виробництва, до моноцукрів, які є живильним середовищем для розвитку дріжджових грибків. При цьому кисень, що знаходиться в середовищі, витрачається на живлення мікроорганізмів і, в такий спосіб, система постачання льодяної води для охолодження пивного сусла деаерується. По мірі використання розчиненого кисню мікроорганізми починають переробляти етиловий спирт, який існує у середовищі цукру, що і пригнічує їхнє подальше розмноження.

Використовуючи біохімічний механізм захисних процесів у біологічних системах, можна розробляти методи захисту устаткування від корозії за допомогою інших аналогічних живих систем.

БІГК перспективний і з екологічної точки зору, тому що мікроорганізми, які містяться в інгібіторі, для живлення використовують азот і фосфор. Попадаючи у водойми і поглинаючи ці елементи,

мікроорганізми гальмують процес евтрофікації, яка викликає надмірний ріст водоростей, що перешкоджають проходженню світла і поглинають значну кількість кисню, що шкодить фауні.

11.3.10. Покращення захисних функцій інгібіторів

Незважаючи на розмаїття вимог до інгібіторів корозії при їх використанні для захисту обладнання харчових і переробних виробництв, можна виділити основні властивості, які повинен мати ефективний інгібітор незалежно від його призначення:

- забезпечення необхідного ступеня захисту металу від корозії або необхідного значення коефіцієнта гальмування корозії при такій концентрації інгібітора, при якій його застосування буде економічно виправданим і доцільним;

- відсутність шкідливого впливу на хід технологічного процесу і на основні властивості металу, який захищається;

- технологічність застосування, тобто простота та легкість дозування, введення інгібітора і контролю за його концентрацією; використання рідких і порошкоподібних інгібіторів дозволяє застосовувати автоматичні дозувальні пристрої; температура застигання інгібітора повинна бути низькою (не вище 293 K), а в'язкість рідини не дуже відрізнятися від в'язкості води;

- відповідність санітарно-гігієнічним нормам і правилам охорони праці, техніки безпеки; не можна використовувати інгібітори, що не пройшли токсикологічних випробувань і застосування яких може призвести до забруднення навколишнього середовища;

- стабільність промислового виробництва інгібіторів, тобто забезпечення сировиною, сталість властивостей інгібіторів;

- явно виражений ефект післядії, тобто збереження захисної дії протягом певного часу після його застосування.

Існує декілька шляхів підвищення ефективності захисної дії інгібіторів корозії, які повинні відповідати вищенаведеним вимогам: сполучення інгібітора з захисними матеріалами (покриттями, протикорозійними і мастильними композиціями), використання поверхнево-активних речовин (ПАР); застосування інгібіторів і добавок або декількох інгібіторів, яким притаманний ефект синергізму, використання добавок до інгібіторів, здатних збільшувати температурний діапазон їх застосування у виробництвах; відходів різноманітних виробництв для розроблення нових інгібіторів..

Підвищення ефективності слід очікувати від застосування ПАР, що проявляють одночасно захисний і блокувальний ефект. Одночасне проявлення обох ефектів проявляється, зокрема, коли катіоноактивний інгібітор має у своєму складі адсорбуючі аніони, які підсилюють адсорбцію органічних катіонів. Цю властивість застосовують при виборі компонентів складних інгібіторів.

Аналіз поширених методів антикорозійного захисту показав, що інгібування - один із найпростіших, найефективніших і, у багатьох випадках, економічно найдоцільніший метод боротьби з корозією обладнання харчових і переробних виробництв та металоконструкцій цехів підприємств. Застосування інгібіторів корозії не потребує складного технічного забезпечення, великих трудозатрат і доступне для захисту практично будь-якого обладнання від дії різноманітних середовищ в широкому діапазоні температур. Останнім часом велика увага приділяється розробленню інгібіторів із відходів харчових та інших виробництв і це, безсумнівно, веде до ще більшого здешевлення їх виробництва, а також до покращення екологічного стану навколишнього середовища.

11.4. Комплексний інгібіторний захист устаткування променерговузлів харчових підприємств

Широке застосування в промисловості знаходить оброблення води оборотних циклів комплексонами і композиціями на їхній основі. Варто відзначити досліджені нами комплекси, які включають фосфор - 1-оксиетилендифосфонову кислоту (ОЕДФ), нітрлотриметилфосфонову кислоту (НТФ). Ці речовини здатні впливати на кристалізацію карбонату кальцію при концентраціях, значно менших ніж стехіометричні. Вони допущені до використання санітарними службами.

При аналізі роботи обладнання променерговузла Дніпропетровського пивоб'єднання були виявлені значні експлуатаційні відкладення на внутрішньотрубний частині котлів (більше 1500 г/м²) такого складу (%): 20-25 Fe₂O₃, 25-30 Ca, 9-10 Mg, 10-15 фосфатів і 10-12 силікатів. По тракту систем опалення відкладення в основному містять оксиди заліза.

Для підвищення технічних характеристик парових котлів ДКВР-20/13 авторами розроблені і впроваджені методи хімічного очищення від відкладень і очищення "в процесі експлуатації".

Хімічне очищення котлів, на відміну від традиційних засобів, проводили в дві стадії: I - оброблення 1-2 %-вим розчином соляної кислоти, яка містить 1 г/л ОЕДФ з диспергатором НФ. Температура розчину складала 333-353К, тривалість оброблення 6-8 год; II - циркулювання 2%-ного розчину, який містить 5-6 г/л ОЕДФ або НТФ при 403-443К протягом 3 діб. Введення у мийний розчин фосфорорганічних комплексонів, які утворюють міцні комплекси з катіонами металів у широкому діапазоні рН, сприяло більш повному видаленню складних відкладень на стадіях кислотного промивання і луження котлоагрегатів. В результаті 2-х стадійного відмивання було видалено більше 80% відкладень.

Для хімічного очищення парових котлів “в процесі експлуатації” і захисту від корозії їх внутрішніх поверхонь нагрівання до складу живильної води автоматичною дозуючою установкою безперервно вводився розчин комплексонату цинку. Збалансовані кількості ОЕДФ і її цинкового комплексу у воді запобігають випаданню важкорозчинних з'єднань і поступове видалення відкладень у процесі роботи котлоагрегату, що обумовлюють гальмування розвитку підшламової корозії.

Необхідну кількість реагенту визначили з урахуванням коефіцієнтів упарювання котлової води на першій і другій стадіях випару котлів ДКВР-20/13 і підтримували в межах 0,1-0,5 мг/л.

Авторами розроблена схема протикорозійного захисту променерговузла пивоб'єднання (рис. 11.6), яка захищає фільтри механічного очищення води (ФМО), натрій-катионові фільтри (НКФ), деаератори (ДАЕ), насоси (Н), економайзери (ЕКМ), теплообмінники (АТ, ТО), парові котли (ПК), баки гарячої води з внутрішнім підігріванням, пляшкомиїні машини (АММ), батареї трубчасті (БТ), трубопроводи. Обладнання відділення водопідготовки (ФМО, НКФ) захищено хімічно-стійкими інгібованими полімерними покриттями (ХП), видаленням із води O_2 і CO_2 деаерацією, протинакипним обробленням живильної води інгібітором ОЕДФ.

Барботажна деаерація забезпечує достатньо повне видалення кисню з води в широкому діапазоні гідравлічних навантажень. Розчин ОЕДФ подається плунжерним насосом-дозатором з дозатора D_1 безпосередньо в деаераторний бак (ДАЕ), звідки, разом з живильною водою, поступає через економайзери (ЕКМ) у працюючі котли з живильною водою, а потім у тепломережу. Для запобігання і утворенню накипу та інших відкладень на поверхнях нагрівання котлів і пляшкомиїних машин встановлюється протинакипне устаткування (ПНУ).

Трубопроводи зовні покривають захисним інгібованим покриттям (ЗПП), а потім хімічно стійким теплопровідним покриттям (ХТП). Баки гарячої води всередині також покривають ХТП.

Електрохімічний захист мереж газо-, водо-, тепло- і паропостачання забезпечує станція катодного захисту (СКЗ) і комбінована система протекторно-дренажного захисту.

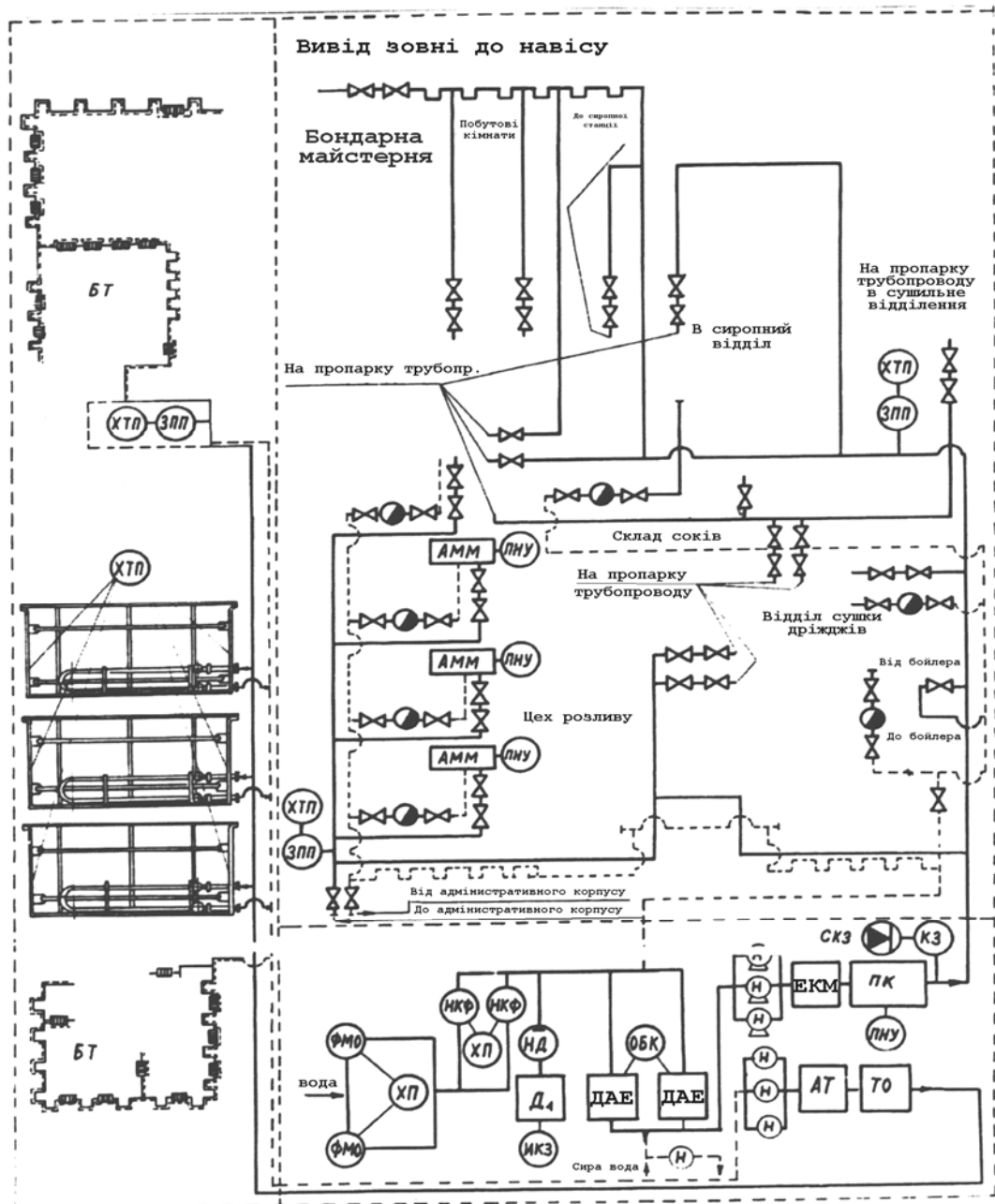


Рис. 11.6. Схема протикорозійного комплексу променерговузла пивоб'єднання

В результаті впровадження захисних заходів к.к.д. кожного з восьми парових котлів був збільшений до 92%. Швидкість корозії обладнання знизилась на 30-50%. При постійному автоматичному дозуванні у живильну воду композиції на основі комплексонів забезпечений безнакипний режим роботи всіх котлів ДКВР-20/13 (протягом 2-х років).

11.5. Забезпечення ефективної роботи теплообмінних апаратів цукрової промисловості

Надійність і довговічність випарних апаратів цукрових заводів залежить від умов їх експлуатації. Утворення накипу на

теплопередаючих поверхнях призводить до порушення теплового режиму експлуатації випарних установок, зменшує кількість випареної вологи за одиницю часу та збільшує енергозатрати на проведення процесу. Використовуючи інгібовані мийні розчини, можна забезпечити безнакипний режим роботи випарних установок, забезпечити їх працездатність протягом усього сезону цукроваріння та заощадити матеріальні ресурси. Покажемо ефективність застосування інгібіторів на конкретному прикладі.

Теплова схема ВАТ „Смілянський цукровий комбінат” відноситься до схем з комбінованими тепловими споживачами низького потенціалу. Теплоносієм є насичена водяна пара – суміш відпрацьованого пару турбін і редукованого, зволоженого гарячою водою, гострого пару ТЕЦ. Основною ланкою в тепловій схемі цукрового заводу є чотирьохкорпусна випарна установка з концентратором під зрідженням. Виробнича потужність заводу складає 1680 т. цукрового буряку на добу. Він укомплектований дифузійним апаратом ДС-8, продуктивністю 2000 т/добу.

Випарна установка включає апарати ЛУ-ПВВ-816-91 (Iк, S=1500 м²), ЛУ-3000-4-Е (IIк, S=1800 м²), Е2-ППВ-1250 (IIIк, S=1250 м²), ЦИНС (IVк, S=1000 м²), А2-ПВВ-400 (Vк- конденсатор, S=400 м²).

Відомо, що для забезпечення надійного нормативного нагрівання продуктів соковими парами важливо витримати температурний режим на випарній установці. Але це забезпечити протягом усього сезону цукроваріння на заводі не вдається через утворення накипу на поверхнях нагрівання корпусів випарної станції, який традиційно видалявся кислотно-содовим методом. Термографічний аналіз відкладень в трубах випарної установки показав, що накип складається з кристалів карбонату кальцію і магнію та солей кальцію сірчаної, сірчистої, щавлевої та інших кислот. Карбонат кальцію присутній у вигляді кальциніту, що є наслідком впливу пектинових речовин. На кип'ятильних трубах I корпусу в осад випадають переважно вуглекислі солі кальцію і магнію, інколи сірчистий магній. В накипу II корпусу є сульфіти і сульфати. В наступних корпусах відкладаються, в основному, щавлевокислий кальцій і оксалати. Інші речовини, які входять до складу накипу (оксиди заліза і алюмінію, кремнієва кислота тощо) розсереджуватись рівномірно по всіх корпусах випарної установки. Солі кальцію у вигляді вуглекислого, щавлевокислого і сірчаноокислого кальцію складають основну частину накипу.

Відкладення накипу товщиною 1 мм на поверхнях теплообмінників призводить не лише до порушення технологічного режиму цукроваріння, але й до збільшення витрат палива в середньому на 10%. Це обумовлено низьким коефіцієнтом теплопровідності накипу ($\lambda = 0,4 \div 0,6$ Вт/м·К) у порівнянні зі сталями ($\lambda = 40 \div 60$ Вт/м·К) та кольоровими сплавами ($\lambda = 30 \div 200$ Вт/м·К). Матеріали

з теплопровідністю, меншою за $\lambda = 0,2$ Вт/м·К є теплоізоляторами. Наявність у I корпусі випарної установки шару накипу завтовшки 0,2 мм майже вдвічі зменшує кількість випареної води за одиницю часу. Тому очищення випарної станції на ВАТ „Смілянський цукровий завод” для усунення відмов проводять навіть під час цукроваріння содово-кислотним способом шляхом кип'ятіння протягом 10-12 год содового розчину, а потім 2,5 % -вої соляної кислоти протягом 50 хв.

За наявності у накипу понад 50% карбонатів кальцію і магнію попередня содова обробка недоцільна, тому що його потрібно видаляти 5-10 %-вою соляною кислотою, що призводить до інтенсивного корозійного руйнування труб. Тому для захисту труб потрібно застосовувати інгібітори.

Для промивання, очищення і захисту поверхонь нагрівання випарних апаратів від накипу авторами у сезоні цукроваріння 2004-2005 р.р. був застосований 5 %-вій розчин соляної кислоти з додаванням інгібітора KI-1 (25%- катапіну, 25% уротропіну, залишок – вода) у кількості 2 кг на тонну мийного розчину, і додаванням піноутворювача ОП-10 в кількості 0,1 % на тонну розчину. При експериментальній перевірці в лабораторії НУХТ цей інгібітор виявився найбільш ефективним для захисту вуглецевих сталей від корозійного руйнування у 5 %-вій соляній кислоті. В табл. 11.2 приведені види реагентів і тривалість видалення накипу з поверхонь нагрівання випарної установки заводу, а на рис. 11.7 подана технологічна сема очищення.

У відповідності з запропонованим авторами технологічним регламентом, процес очищення за безсодовим методом включає змішування води з соляною кислотою, інгібітором та піноутворювачем, подачу розчину у корпуса випарної установки, нагрівання розчину, витримку для руйнування відкладень, повторення циклу очищення та двохкратне промивання корпусів випарної установки.

Зміна кількісного і якісного складу реактивів для очищення випарних апаратів дозволила знизити затрати на матеріали, зменшити швидкість корозії і втрати металу під час промивання в корозійному середовищі. Запропонована технологія видалення накипу не спричиняє додаткових капітальних вкладень і сприяє скороченню часу на технічне обслуговування і ремонт обладнання.

Реагенти і режим очищення випарної установки на
ВАТ „Смілянський цукровий комбінат”

№ корпусу випарної установки	Тип апарата	Поверхня нагрівання, м ²	Об'єм корпусу, м ³	Концентрація HCl, %	Об'єм мийного розчину, м ³	Кількість інгібітору, кг	ОП-10, %/т	Кількість концентрованої соляної кислоти, кг	Об'єм соляної кислоти, л	Маса соляної кислоти, т	Час обробки, год
I	ЛУ-ПВВ-816-91	1500	17,0	5,0	17,0	27,4	0,05	680	1820	2,13	2,5
II	ЛУ-300-4-Е	1800	23,5	5,0	23,5	37,0	0,05	940	2520	2,94	2,5
III	Е2-ППВ-1250	1250	14,4	5,0	14,4	22,7	0,05	546	1470	1,71	2,5
IV	ЦИНС	1000	13,3	5,0	13,3	21,0	0,05	533	1430	1,67	2,5
V	А2-ПВВ-400	400	7,3	5,0	7,3	11,5	0,05	292	780	0,91	2,5



Рис. 11.7. Схема очищення випарної установки ВАТ „Смілянський цукровий комбінат”: 1,2,3,4 – пари (I-IV) корпусів установки; В-подача води; Г- зливна комунікація; К- конденсатна комунікація; С- комунікація подачі мийного розчину; К1- комунікація подачі кислоти; і - комунікація подачі інгібітора KI-1

Застосування інгібітора KI-1 (ТУ 6-01-83-76) дало не лише значну економію ресурсів і коштів, але також попередило наводнювання сталей при обробці кислотою, зберегло їх пластичні та міцносні властивості і забезпечило достатній захист при малоцикловому навантаженні та корозійному розтріскуванні, таким чином, підвищило показники надійності і довговічності випарних технологічних апаратів.

11.6. Термін служби обладнання при інгібіторному захисті

Термін служби обладнання, що контактує з агресивними технологічними середовищами харчових і переробних виробництв, як правило, обмежується швидкістю його корозії в цих середовищах:

$$T = \delta_{\max} / \xi, \quad (11.1)$$

де T - термін служби обладнання, років; δ_{\max} - максимальна глибина проникнення корозії, при якій обладнання залишається працездатним (межа працездатності), мм; ξ - глибинний показник швидкості корозії конкретного матеріалу в даному технологічному середовищі, мм/рік.

При використанні захисних заходів, наприклад, біологічного інгібітора корозії (див. підрозділ 11.3.9), швидкість корозії знижується і захисний ефект інгібування визначається за формулою:

$$z = \frac{\xi_0 - \xi}{\xi_0} \cdot 100\%, \quad (11.2)$$

де z - захисний ефект від інгібування, %; ξ_0 - швидкість корозії в неінгібованих середовищах (в даному випадку, глибинний показник), мм/рік; ξ - швидкість корозії при дії інгібітора, мм/рік.

Тоді з урахуванням формул (11.1) і (11.2) можна записати:

$$T = \frac{\delta_{\max}}{\xi_0 \cdot \left(1 - \frac{z}{100}\right)}. \quad (11.3)$$

Відносна тимчасова ефективність оптимізації рецептур БІГК залежить лише від захисних ефектів інгібування з застосуванням нового і старого складу інгібітора, відповідно, $Z_{\text{нов}}$, $Z_{\text{ст}}$:

$$ef = \frac{T_{\text{нов}}}{T_{\text{ст}}} = \frac{\frac{\delta_{\max}}{\xi_0 \cdot \left(1 - \frac{Z_{\text{нов}}}{100}\right)}}{\frac{\delta_{\max}}{\xi_0 \cdot \left(1 - \frac{Z_{\text{ст}}}{100}\right)}} = \frac{1 - \frac{Z_{\text{ст}}}{100}}{1 - \frac{Z_{\text{нов}}}{100}} = \frac{100 - Z_{\text{ст}}}{100 - Z_{\text{нов}}} \quad (11.4)$$

З формули (11.4) виходить, що при наближенні до повного захисту ефективність оптимізації підвищується.

Найбільша ступінь захисту за допомогою БІГК, виявлена традиційними експериментальними методами, складала 94,3%. При цьому ступені захисту була рекомендована рецептура біологічного інгібітора корозії для використання в антикорозійному захисті системи охолодження пивного суслу льодяною водою (див. підрозділ 11.3.9).

Методом математичного моделювання була знайдена оптимальна рецептура, застосування якої дає захисний ефект інгібування 98,3%. Тоді ефективність від збільшення терміну служби системи охолодження складає:

$$ef = \frac{100 - z_{cm}}{100 - z_{нов}} = \frac{100 - 94,3}{100 - 98,3} = \frac{5,7}{1,7} = 3,35 \quad (11.5)$$

При використанні дослідженого агресивного технологічного середовища максимальна швидкість корозії дорівнює 1 мм/рік, критична товщина безаварійної роботи системи охолодження обладнання складає 0,5 мм при товщині стінок 1 мм. Тоді $\sigma_{max}=0,5$ мм; $\xi_0=1$ мм/рік.

Термін служби обладнання при використанні старої рецептури:

$$T_{cm} = \frac{\delta_{max}}{\xi_0 \left(1 - \frac{z_{cm}}{100}\right)} = \frac{0,5}{1 \left(1 - \frac{94,3}{100}\right)} = \frac{0,5}{0,057} = 8 \text{ років} \quad (11.6)$$

Термін служби при використанні оптимізованої рецептури інгібітора:

$$T_{cm} = \frac{\delta_{max}}{\xi_0 \left(1 - \frac{z_{нов}}{100}\right)} = \frac{0,5}{1 \left(1 - \frac{98,3}{100}\right)} = \frac{0,5}{0,017} = 29 \text{ років} \quad (11.7)$$

Таким чином, застосування оптимізованих рецептур інгібіторів забезпечує майже чотирьохкратне підвищення строку служби обладнання.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте переваги і недоліки гальванічних і хімічних методів захисту від корозії.
2. Які лакофарбові покриття застосовують для захисту обладнання харчових виробництв від корозії?
3. Назвіть основні способи нанесення пластмасових покриттів на деталі технологічного обладнання для захисту від корозії.
4. У яких технологічних розчинах емалеві покриття мають високу стійкість?
5. Назвіть основні напрямки застосування інгібіторів корозії.
6. Поясніть механізм захисної дії анодних і катодних інгібіторів корозії.
7. Як захистити машини і апарати харчових виробництв інгібіторами від атмосферної корозії?
8. Які інгібітори можна застосовувати для захисту трубопроводів питної води?
9. Назвіть інгібітори, які застосовують під час очищення теплоенергетичного устаткування від накипу кислотним способом.
10. Якими інгібіторами можна забезпечити захист комунікацій ропних систем холодильного устаткування?
11. Як впливає цукат кальцію на корозійну агресивність холодоносіїв?

12. Назвіть інгібітори, які доцільно застосовувати для попередження корозії відкритих рециркуляційних водо охолоджувальних систем харчових виробництв.
13. Охарактеризуйте захисну дію оксиетилендифосфонової кислоти.
14. Чому для охолоджувальних роп на основі хлориду натрію частіше застосовують силікати і фосфати як інгібітори, а не хромати?
15. Які нетоксичні відходи харчових виробництв і де можна застосовувати у якості інгібіторів?
16. Які природні харчові продукти і рослини можна використовувати для захисту сталей і алюмінію від корозії?
17. Назвіть випадки застосування натрієвих солей винної і глюконової кислот у якості інгібіторів.
18. Чи можна застосовувати аскорбінову кислоту у якості інгібітора корозії металів?
19. Поясніть поняття «синергізму» компонентів інгібітора.
20. Чи можуть пивна шротина і пивні дріжджі бути повноцінними інгібіторами корозії?
21. Навіщо проводять інгібування модифікаторів іржі і полімерних покриттів перед застосуванням для протикорозійного захисту обладнання?
22. Докажіть можливість застосування живих мікроорганізмів для інгібування технологічних середовищ харчових виробництв.
23. Назвіть основні шляхи покращення захисних функцій інгібіторів корозії.
24. Чому інгібування інколи є найпростішим і найефективнішим методом підвищення надійності і довговічності технологічного обладнання?
25. Охарактеризуйте порядок здійснення комплексного інгібіторного захисту устаткування променерговузлів теплообмінних апаратів харчових підприємств.
26. Як оцінити вплив інігібіторного захисту на термін служби обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв?

[перейти до змісту](#)

12. Тертя в рухомих з'єднаннях машин і апаратів

12.1. 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 ефективно 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 порошоків 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 в позаминулому столітті, коли в 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. Амонтон 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 1839р. 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. Деагюльє 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 зварювання 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 холодного 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.

12.2. 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. *Найбільша сила тертя спокою* - 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. 12.1). 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 під дією сили F_c , яка менша за F_n .

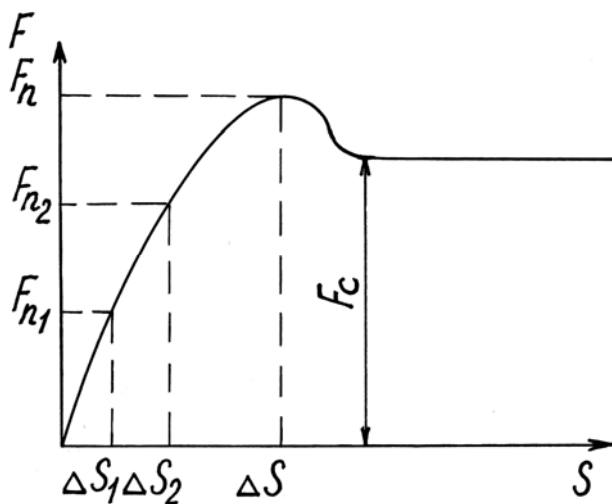


Рис. 12.1. Залежність величини зсуву S від сили тертя F : F_{ni} - неповна сила тертя спокою; ΔS_i - величина попереднього зсуву; F_n - найбільша сила тертя спокою; F_c - сила, необхідна для взаємного переміщення твердих тіл

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. 12.2).

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. 12.3).

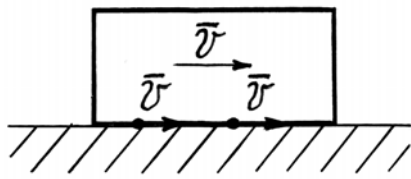


Рис. 12.2. До пояснення поняття «тертя ковзання»

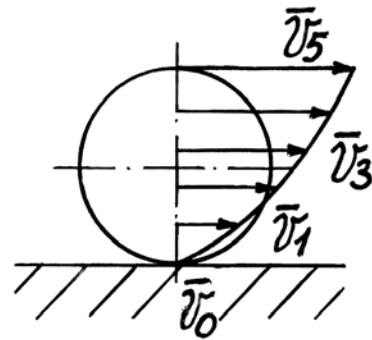


Рис. 12.3. До пояснення поняття «тертя кочення»

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 зовсім 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.

12.3. 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".

12.4. 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. 12.4, а). Необхідну швидкість V можна надати оливі (мастилу) її нагнітанням в зазор або безперервним односпрямованим рухом тіла A у напрямку \bar{V} . На рис. 12.4 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. 12.4, б).

Якщо тілу A надати безперервний рух в один бік, граничний шар рідини, зв'язаний з тілом A силою зчеплення, захоплює за собою поверхневі шари, внаслідок чого в зазорі утворюється безперервний потік рідини, що також використовується для створення рідинного режиму тертя (рис. 12.4, в).

12.5. 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.

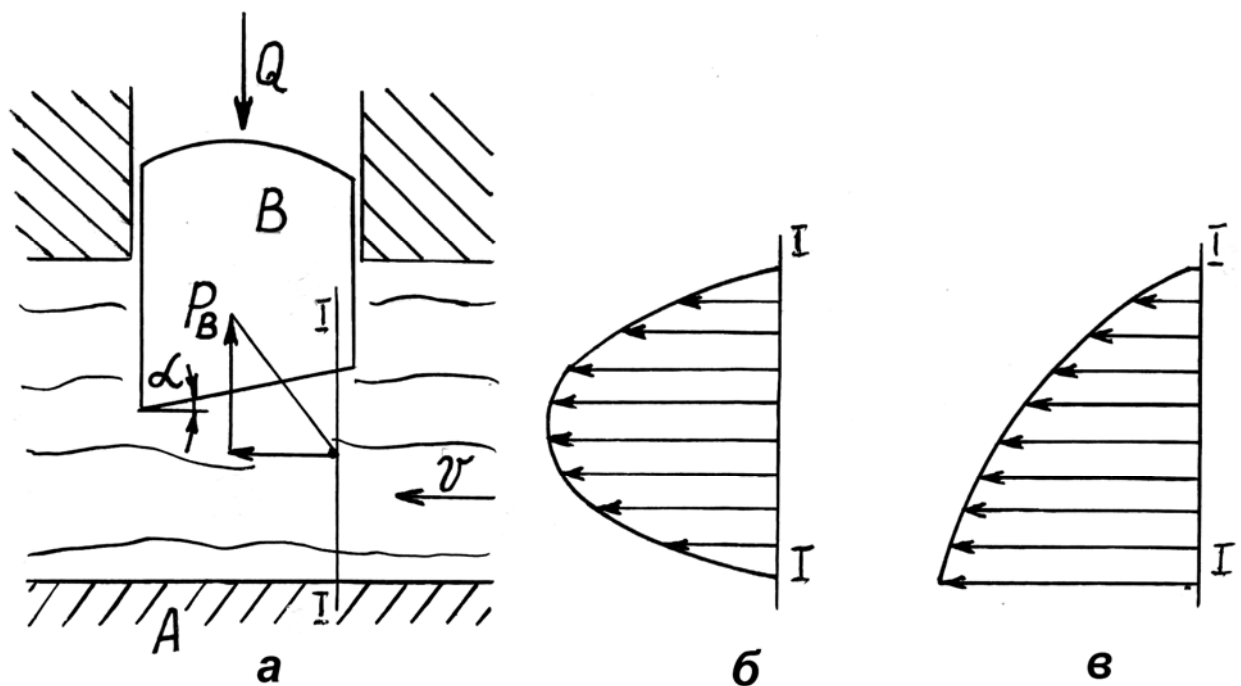


Рис. 12.4. До пояснення виникнення рідинного тертя

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.

Опорна довжина профілю – сума довжин відрізків у межах базової довжини, які обмежують на заданому рівні в оброблюваному матеріалі виступи поверхні профілем, еквідистантним середній лінії. Відносна опорна довжина 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.

12.6. Формування шорсткості поверхонь

Велика кількість причин, що визначають певну шорсткість обробленої поверхні, можна об'єднати в три основні групи: геометричні умови процесу різання; пластична і пружна деформація оброблюваного матеріалу; виникнення вібрації.

Отже, шорсткість поверхні суттєво визначається технологією оброблення, геометричними параметрами різального інструмента і його станом, твердістю оброблюваного матеріалу тощо.

Значний вплив на шорсткість поверхні виробів здійснюють режими різання, які суттєво впливають на пластичне деформування поверхневого шару, наростоутворення на різальному інструменті. Так, при повздовжньому точінні, зі зміною швидкості різання залежність параметрів шорсткості має вигляд, наведений на рис. 12.5 і максимум на графіку відповідає величині максимального наросту.

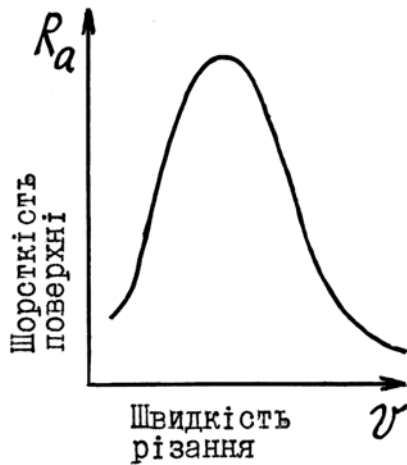


Рис. 12.5. Вплив швидкості різання на шорсткість поверхні деталі

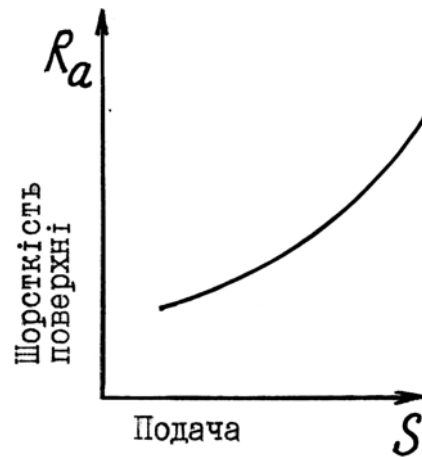


Рис. 12.6. Вплив подачі на шорсткість поверхні деталі

Зі зміною подачі S висота мікронерівностей (шорсткості) збільшується не тільки під дією геометричних факторів, але і через підвищення пластичного деформування поверхневого шару (рис. 12.6).

12.7. Структура поверхневого шару

В результаті механічного оброблення поверхневі шари металів набувають структури, відмінної від початкової. Ці шари, товщиною від десятків ангстрем ($\text{\AA} = 10^{-10}\text{м}$) до десятих долей і навіть цілих міліметрів мають інші властивості. Ця відмінність у будові і властивостях обумовлена такими основними причинами: одночасним впливом механічних, теплових і фізико-хімічних чинників на поверхню металу при механічному обробленні; особливим станом атомів поверхні, наслідком чого є наявність вільної поверхневої енергії і велика адсорбційна активність.

При обробленні різанням у поверхневому шарі відбуваються інтенсивна пластична деформація, локальний нагрів до високих температур, фізико-хімічна взаємодія з навколишніми середовищами (мастильно-охолоджувальні рідини (МОР), кисень, повітря). При різанні пластичних металів відбувається текстурування поверхневого шару. При обробленні металів, які зазнають, нагрівання і швидкого охолодження, можуть відбутись фазові і структурні зміни (загартування, відпускання, відпал).

Поверхневий шар за своєю будовою неоднорідний. На рис. 12.7 показано будову поверхні вуглецевої сталі після тонкого шліфування:

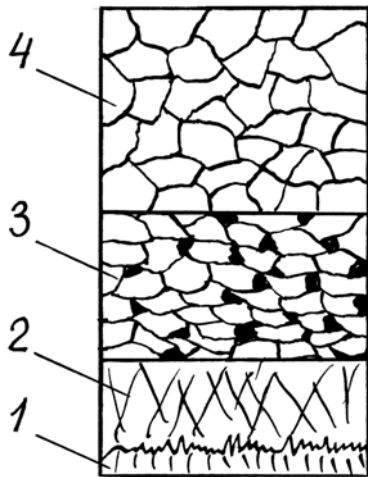


Рис. 12.7. Будова поверхневого шару сталі після шліфування (пояснення в тексті)

1 – граничний шар адсорбованої плівки газів і МОР, який можна зняти лише нагріванням у вакуумі;

2 – деформований, сильно роздроблений метал зі спотвореними кристалічними ґратками, зі знеуглецьованими ділянками, які виникли від дії високих температур при шліфуванні, пронизаний окислами і нітридами, який має порожнини, надриви, тріщини;

3 – шар сильно деформованих при шліфуванні зерен, між якими розташований структурно вільний цементит, що виник під дією високих температур;

4 – метал у початковому стані (вихідний).

При різанні металу в його поверхневому шарі відбуваються два протилежних процеси: зміцнення внаслідок наклепування та знеміцнення внаслідок нагрівання. Зміцнення поверхневого шару при обробленні можна оцінити за зміною мікротвердості, що різко зменшується в шарі з роздробленою структурою (рис. 12.8).

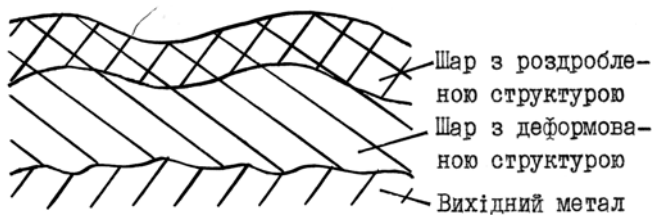


Рис. 12.8. Будова поверхневого шару після механічного оброблення вуглецевої сталі

Середні значення товщини зміненого різними видами механічної обробки поверхневого шару: точіння – 0,25...2,0 мм, шліфування – 12...75 мкм, тонке шліфування – 2...25 мкм, надтонке оброблення - до 0,2 мкм.

Мікроскопічна та ультрамікроскопічна неоднорідність структури, дефекти, які характерні для будь-якого твердого тіла, їхня кількість у поверхневому шарі зростають внаслідок механічної і теплової дії при механічному обробленні. Це спричиняє суттєву неоднорідність поверхневого шару за хімічною активністю і фізико-механічними властивостями.

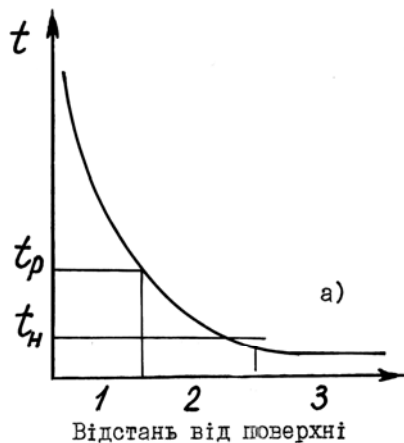
12.8. Залишкові напруги у поверхневому шарі

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.

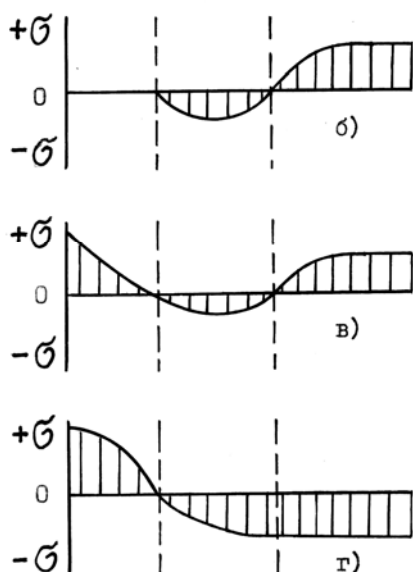
Розрізняють три типи власних напружень: напруження першого типу (макронапруження), зрівноважені у великих об'ємах, порівняних з розмірами деталі; напруження другого типу (мікронапруження), зрівноважені в межах одного чи декількох кристалічних зерен; напруження третього типу (субмікронапруження), що діють 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°C , для легованих – близько 550°C . При шліфуванні і швидкісному різанні температура приповерхневого шару може досягти $800\text{...}900^{\circ}\text{C}$. 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. 12.9). В ньому внутрішні напруження не виникають, а якщо були залишкові напруження, то вони знімаються.

Рис. 12.9. 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. 12.9 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. 12.9, 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. 12. 9, 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.

12.9. 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 газозового 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, а саме:

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

2. Хемосорбція необоротна. 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.

12.10. 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, Fe₂O₃, Fe₃O₄.

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 в 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 Al₂O₃ 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. Причому, зі збільшенням 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.

12.11. 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. 12.10).

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_ϕ та контурну площу дотикання A_k , що являє собою суму площадок, обмежених контурами, у які вписані області з прилеглими площадками (обведено) фактичного контакту (рис. 12.10, 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.

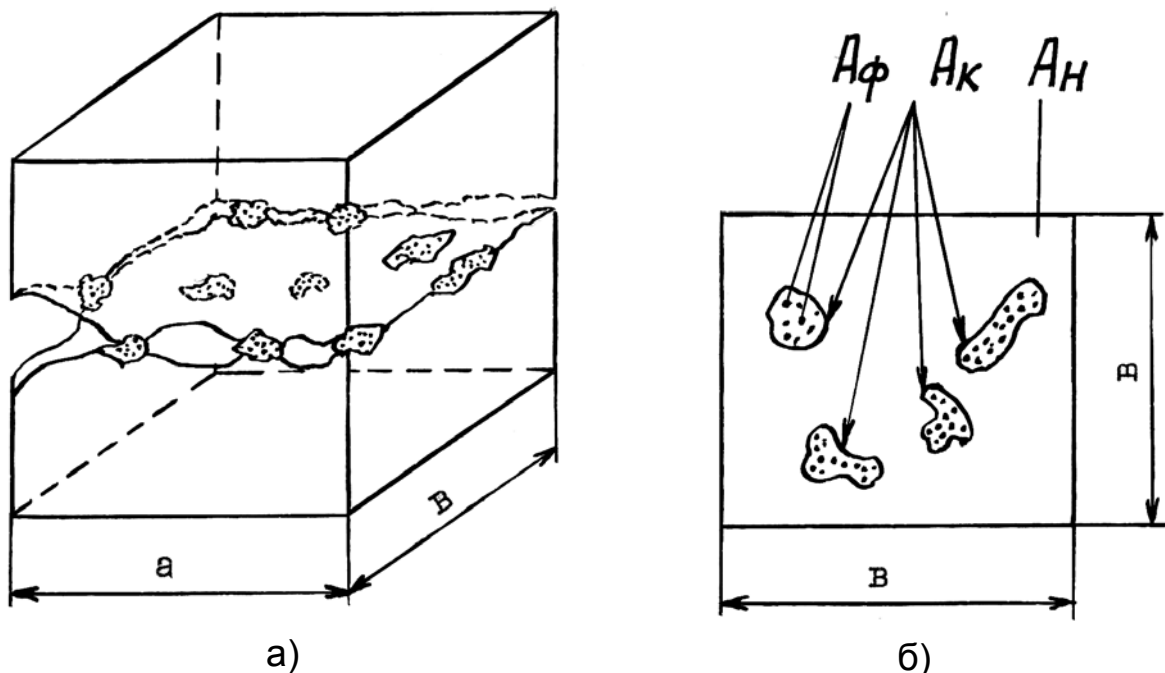


Рис. 12.10. Утворення площі контакту шорстких поверхонь: а – схема контактування тіл; б – утворення номінальної A_n , фактичної A_f та контурної A_k площ

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 десятки 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.

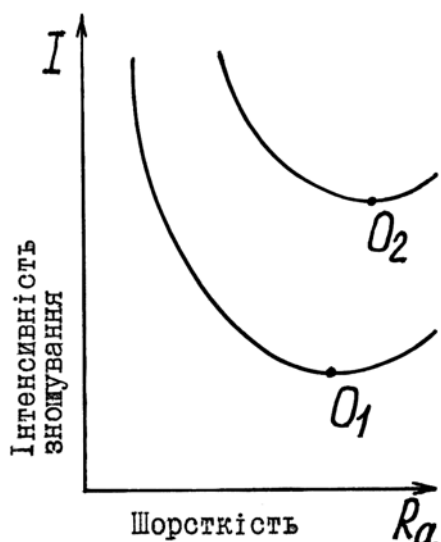
Отже, коли поверхня з гетерогенною структурою була б навіть ідеально гладкою, вона, як і сполучена з нею буває під дією навантаження певної шорсткості. Внаслідок неоднорідності різних структурних складових конструкційного матеріалу за твердістю, а також різного орієнтування кристалічних зерен (на поверхні),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

12.12. Вихідний і експлуатаційний стан поверхні

Вихідний стан поверхонь деталей, що утворились внаслідок їхнього механічного оброблення, піддається суттєвим змінам у процесі експлуатації при взаємодії поверхонь деталей, що знаходяться в контакті з іншими.

У початковому періоді роботи на площадках фактичного контакту виникають тиски, що можуть перевищити границю текучості і навіть границю міцності матеріалів пар тертя. У точках контакту під дією цих тисків в нерухомих поверхнях відбувається пружне стиснення і пластичне деформування (зминання) нерівностей, а при взаємному переміщенні поверхонь – зрізування, відламування і пластичний зсув вершин нерівностей, що приводить до інтенсивного початкового зношування.

Під час початкового зношування, що відбувається в період припрацювання, змінюється форма і розміри нерівностей. Висота нерівностей зменшується або збільшується до певного “оптимального” значення, різного для різних умов тертя. Якщо оптимальну для даних умов тертя висоту нерівностей вдається створити при механічному обробленні, то в процесі зношування вона мало змінюється і тривалість припрацювання за початкового зношування виявляються мінімальними.



На рис. 12.11 наведено графік П. Диченко, який показує, що при оптимальній висоті мікронерівностей (O_1 , O_2) початкова інтенсивність зношування мінімальна.

Рис. 12.11. Загальна залежність інтенсивності зношування I від шорсткості поверхонь Ra (O_1 , O_2 – оптимальна висота мікро нерівностей)

За більш важких умовах роботи крива зношування зміщується вище і праворуч, а точка оптимальної шорсткості праворуч. Збільшення висоти мікронерівностей понад

оптимальну призводить до інтенсифікації зношування внаслідок зчеплювання, чому сприяє видавлювання змащувального матеріалу із зони тертя і недостатня змочуваність змащувальним матеріалом дзеркально чистих поверхонь.

Істотних змін при експлуатації, особливо за важких режимів тертя, може зазнавати і мікроструктура поверхневих шарів. В результаті інтенсивних теплових і механічних впливів, а також дії зовнішнього середовища утворюються нові структури тертя, які називаються вторинними, та мають інші властивості порівняно з вихідними (початковими), отриманими при виготовленні деталей.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте роль тертя в житті людини.
2. Які вчені заклали фундамент науки про тертя?
3. Як визначити силу тертя аналітично і дослідним шляхом?
4. Дайте класифікацію видів тертя.
5. Охарактеризуйте граничне тертя.
6. Дайте характеристику рідинному тертю.
7. Як впливає якість поверхонь тертя деталей і залишкові напруження на зносостійкість деталей машин?
8. Як впливають фізико-хімічні властивості поверхонь деталей вузла тертя на його спрацювання?
9. За рахунок чого змінюється стан поверхонь деталей в процесі тертя і зношування?

[перейти до змісту](#)

13. Механізм і класифікація видів зношування деталей робочих вузлів машин і обладнання

13.1. Фрикційні зв'язки та їх руйнування

Взаємодія контактуючих поверхонь проявляється в 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* (див. гл. 3). 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. 13.1, а); пластичне відтиснення матеріалу (рис. 13.1, б); зріз впровадженого матеріалу (рис. 13.1, в); схоплювання плівок, які покривають поверхні твердих тіл та їхнє подальше руйнування (рис. 13.1, г); схоплювання поверхонь, яке супроводжується глибинним вириванням матеріалу (рис. 13.1, 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.

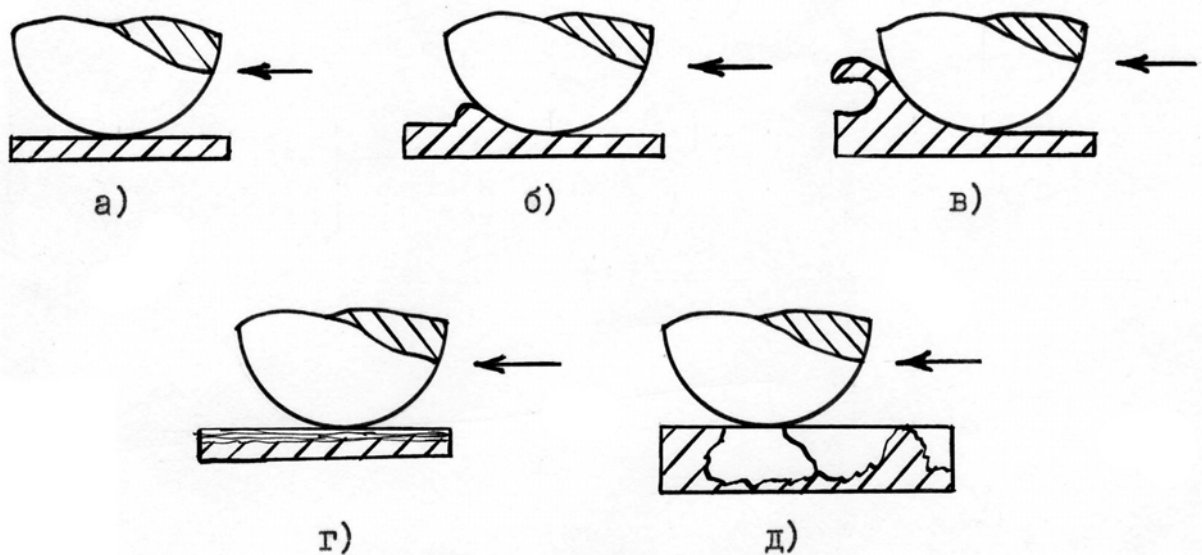


Рис. 13.1. Види руйнувань фрикційних зв'язків (пояснення в тексті)

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

13.2. 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.

13.3. Зміни в 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.

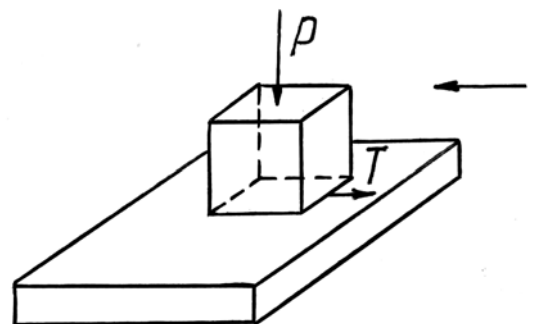
- Пластична деформація при температурі поверхні нижче температури рекристалізації приводить до наклепування і подальшого зміцнення поверхневого шару. Однак, безпосередньо біля самої поверхні структура матеріалу дещо ослаблена, її мікротвердість знижена.

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 знаходитись 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. 13.2).

Рис. 13.2. 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 такий 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 (науглецьовуванню, 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 таким 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 схоплювання. 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.

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

- Агресивні рідини і гази інтенсифікують процес зношування.

13.4. Вторинні структури на поверхні тертя

Вторинні структури на поверхні тертя є фазами, що утворюються при терті внаслідок механічної і теплової дії, адсорбційної і хімічної взаємодії твердого тіла з мастилом, технологічним і газовим середовищем. Як правило, поверхні тертя покриті плівками. Найбільш характерним видом таких вторинних структур є оксидні плівки.

Окремим видом вторинних структур є структури, що утворюються при значному ушкодженні. Це можуть бути «білі шари» або зони, товщиною в десятки і сотні мікрометрів. Утворення цих структур, як правило, пов'язано зі значним підвищенням температури в зоні тертя, схоплюванням, зминанням. Істотну роль в утворенні цих структур грає середовище, яке взаємодіє з парою тертя.

Утворення “білих шарів” було відзначено багатьма дослідженнями, однак на природу їх виникнення немає єдиної точки зору. Більшість дослідників вважає, що вони є наслідком вторинного загартування з одночасною дифузією кисню й азоту. Виникнення цієї

зони пояснюється утворенням в структурі сталі аустеніту зі збільшеним параметром ґратки або утворенням мартенситу вторинного загартування, дифузією вуглецю (наприклад, з мастила), утворенням карбідної структури тощо.

Ряд дослідників вважає, що термін “білий шар” не має конкретного фізичного змісту, а є лише наслідком металографічної подібності різних за своєю природою фаз. Основними причинами, що обумовлюють зазначене утворення вторинних структур є:

- підвищення температури в зоні тертя вище критичних точок фазових перетворень під дією високих тисків або швидкостей ковзання;

- розвиток процесів схоплювання, які обумовлюють деформування значних об'ємів металу та їхнє термоактивоване дифузійне насичення різними компонентами з рідкого або газового середовища (наприклад, киснем, азотом, воднем, вуглецем з утворенням карбідів тощо).

13.5. Втомлювальна теорія зношування

Ця теорія запропонована І. Крагельським і полягає в тому, що при терті метал в точках контакту зазнає багаторазових пружних і пластичних деформацій, які приводять до його руйнування на окремих ділянках і відділення частинок зносу. Такий процес розглядається як фрикційна втома або втомлювальне зношування. Кількість впливів (циклів) n , при яких відбувається руйнування металу поверхні, залежить від напруженого стану і міцності поверхні матеріалу та змінюється в широкому діапазоні. Зносостійкість матеріалу визначається, в основному, кількістю циклів, яке може витримати поверхневий шар без руйнування.

У першому наближенні було запропоновано визначати інтенсивність зношування за формулою:

$$J = (0,1/n) \cdot \sqrt{h/R} \cdot (P_a/P_r)$$

де J – інтенсивність зношування (безрозмірна величина) - відношення товщини зношеного шару до шляху тертя; n – число циклів, які приводять до руйнування; h/R – глибина відносного впровадження виступів шорстких поверхонь, які взаємно пересуваються; P_a і P_r – номінальний і фактичний тиски в зоні контакту.

13.6. 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.

I. 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 такі види: 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 сполученні 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 схоплювання, 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 такі 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 такі 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.

13.7. 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. 13.3).

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.

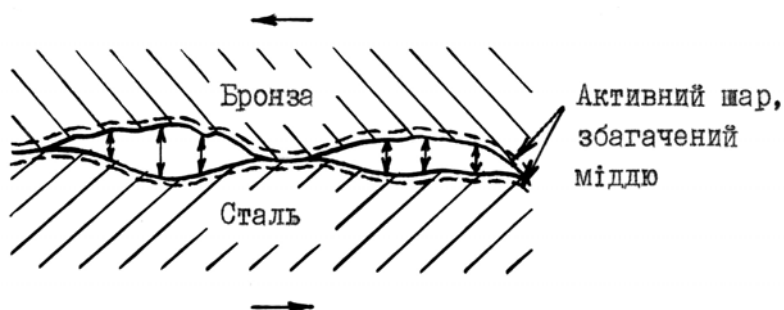


Рис. 13.3. Утворення захисного сервовитного шару міді на поверхнях тертя

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 сталеву, 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: вибіркоче 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, схоплюється 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. 13.4). 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 гліцерінове мастило додати порошок міді. При цьому працездатність вузла підвищується в 3...4 рази. В даний час встановлені такі гіпотетичні уявлення про вибірковий 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.

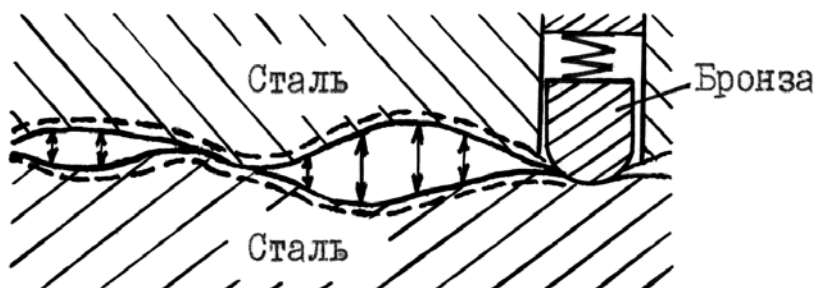


Рис. 13.4. Атомарний перенос міді на сталеві деталі пари тертя при використанні натирання бронзою

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.

13.8. Застосування вибіркового переносу у вузлах тертя

Застосування ефекту вибіркового переносу досить різноманітне, що дає можливість використання його не тільки у вузлах тертя бронза – сталь, але і пластмаса - сталь та сталь - сталь.

У вузлах тертя можливі такі способи використання ефекту вибіркового переносу:

1. Застосування рідких і пластичних мастил, які викликають вибіркового перенос у вузлах тертя бронза-сталь і бронза-хромове покриття.

2. Застосування покриття латунню одного з елементів у вузлах тертя сталь-сталь і використання його зі змащуванням, тому що вибіркового перенос забезпечується латунним шаром.

3. Застосування металоплакуючих мастил у вузлах тертя сталь-сталь, що утворюють сервоцитний мідний шар на поверхнях тертя.

4. Застосування композиційних (з латунню) матеріалів у вузлах тертя (композиційний матеріал-сталь).

5. Застосування пластмас з наповнювачем Cu_2O у вузлах тертя пластмаса-сталь.

За першим способом пари тертя працюють у гліцерині, у гліцерині - спиртовій суміші, при змащуванні ЦІАТИМ-201, ЦІАТИМ-203, ФМГ-10, а також при застосуванні сталевих деталей з латунню чи бронзовою вставкою, коли відбувається подвійний перенос у сервоцитній мідній плівці.

За другим способом на одну з деталей наноситься тонкий шар латуні фрикційним латунюванням на токарному верстаті, а потім збуджується вибіркового перенос. На підставі досвіду застосування фрикційного латунювання, Д. Гаркунов і А. Поляков прийшли до висновку, що воно може бути використане у таких випадках:

- для реалізації вибіркового переносу в контактуючих сталевих деталях у режимі тертя, сприятливому для його проведення;
- як покриття, що знижує схильність до заїдання у важконавантажених шарнірно-болтових вузлах, де сталеві деталі працюють недостатньо надійно;
- у нерухомих з'єднаннях сталь-сталь для усунення схоплювання і забезпечення легкого демонтажу у період ремонту.

Третій спосіб, що полягає у застосуванні маталоплакуючих пластичних мастил у вузлах тертя сталь по сталі, що утворюють сервовитний шар на дотичних поверхнях, доцільно використовувати на деталях, які з тих чи інших причин важко латунювати, наприклад, через невідповідність габаритів.

Порошок бронзи чи міді, насипаний у мастило, піддається вибіркового розчиненню (диспергуванню у мастилі). Досліди показали, що після розчинення в ЦИАТИМ-201 чи гліцерині порошоків міді, або бронзи чи латуні поверхня сталевих деталей при терті покривається сервовитною плівкою. Сервовитний шар за час експлуатації пар тертя не допускає зниження маси сталевих деталей і їх знос практично не спостерігається.

Кількість порошку приблизно повинна бути на рівні 10% від кількості мастила. Металізовані мастила доцільно застосовувати у парах сталь-сталь при низьких температурах і високих навантаженнях, наприклад, у шарнірно-болтових з'єднаннях механізмів.

Четвертий спосіб - застосування композиційних матеріалів із пластмаси, армованої латунню, також досить перспективний. Такі композиційні матеріали застосовують, як правило, у вузлах без змащування, де воно не бажане з тих чи інших причин. У трибо вузлі пластмаса виконує роль змащувального матеріалу, тому що відбувається деструкція її молекул з утворенням вільних радикалів, виконуючих роль мастила.

П'ятий спосіб - застосування пластмас з наповнювачем Cu_2O у вузлах пластмаса - сталь дозволяє суттєво підвищити довговічність вузлів тертя.

В. Білий запропонував увести у фторопластове покриття, що наноситься на поверхню підшипника, 40 % оксиду міді. При змащуванні гліцерином виникає вибіркового перенос, інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя знижуються, вантажопідйомність вузла зростає. Відновлювана гліцерином мідь знижує знос трибоз'єднання.

13.9. Водневий знос

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 сталеві 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.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Як відбувається руйнування зв'язків на поверхнях тертя?
2. Опишіть сучасні уявлення про природу зношування твердих тіл.
3. У чому сутність втомлю вальної теорії зношування деталей машин?

4. Назвіть і охарактеризуйте види зношування деталей машин і обладнання, які стандартизовані.
5. Дайте характеристику явища вибіркового переносу і назвіть способи забезпечення його реалізації.
6. Як можна використати вибіркового перенос для підвищення надійності і довговічності харчового обладнання?
7. Яка роль міді у реалізації явища вибіркового переносу?
8. Де в холодильному обладнанні можливий прояв вибіркового переносу?
9. У яких випадках у машинах і апаратах проявляється водневий знос?
10. Де береться водень для наводнювання поверхонь тертя при водневому зношуванні?
11. Чому вплив водню на тертьові деталі є негативним?

[перейти до змісту](#)

14. Вплив зовнішніх середовищ на процеси тертя та зношування

14.1. Вплив газового середовища на процеси тертя і зношування

Газове середовище суттєво впливає на тертя і зношування, на процеси, що відбуваються у поверхневих шарах металів при терті. Поверхневі шари металів, які утворюють пару тертя, взаємодіють з газовим середовищем більш активно через те, що за таких умов швидкість протікання процесів дифузії підвищується. Більш активній взаємодії газового середовища з поверхнею металу при терті сприяє пластична деформація, яка виникає в мікроскопічних об'ємах поверхневого шару, а також підвищення його температури.

А.Фінк досліджував дію газового середовища на коефіцієнт тертя і показав, що окислювання, яке виникає при терті, впливає на властивості поверхонь тертя, внаслідок чого різко змінюється коефіцієнт тертя. Він першим висунув гіпотезу про окисне тертя.

Л. Коффін для вивчення природи схоплювання металів досліджував тертя металів у вакуумі, в різних газових середовищах і прийшов до висновку, що характер тертя значною мірою залежить від властивостей навколишнього газового середовища.

Зараз існує загальна думка, що кисень повітря перешкоджає зчепленню і переносу металів.

Дослідження Д. Барвела і багатьох інших вчених показали, що найбільш високий коефіцієнт тертя спостерігається при терті у вакуумі, а присутність активних газів або пари різко його зменшує.

Газове середовище суттєво впливає на процеси тертя і зношування не тільки при сухому терті, але і при терті зі змащуванням. Результати досліджень сталі 45 при терті з граничним змащуванням у повітрі та в аргоні, проведені Б. Костецьким, показали, що в початковий період тертя первинна плівка хімічно абсорбованого кисню, яка є на поверхнях тертя, поступово зношується. У середовищі повітря завдяки наявному в ньому кисню, ця плівка відновлюється і забезпечується її рівноважне існування.

У середовищі аргону умов для відновлення абсорбованої плівки немає. Через певний проміжок часу, достатній для зношення цієї плівки, інтенсивність зношування стрибкоподібно зростає в 25...30 разів, в декілька разів збільшується сила тертя і підвищується температура поверхневих шарів. Отже, за цих умов, при граничному мащенні в повітрі відбувається окисне зношування, а в середовищі аргону – зчеплення поверхонь тертя. Роль кисню при сухому терті і граничному мащенні виявилась однаковою.

Дослідженнями Г. Віноградова і його співробітників показано, що при граничному терті сталей вуглецеві мастильні середовища при відсутності кисню і кисневмісних органічних сполук не виявляють мастильної дії.

Фундаментальні дослідження впливу газового середовища на тертя і зношування були проведені І. Носовським. Дослідження

проводили в атмосфері повітря, хімічно чистого аргону, кисню, вуглекислоти (CO_2) і очищеного азоту. Діапазон швидкостей становив 1,5...10,5 м/с, тиск – 10 кгс/см². При дослідженнях в повітрі (при швидкості 1,5...4,5 м/с) відтворювалось окисне зношування. При сухому терті в газових середовищах, які не містять кисню (аргон, азот), спостерігали зношування внаслідок зчеплення першого і другого роду. Руйнування в цьому випадку є наслідком контактного зчеплення, розм'якшення поверхневих шарів, зминання, налипання та оплавлення металу.

При терті у вуглекислоті зі швидкостями понад 4,5 м/с відбувалось теплове зношування внаслідок того, що при великих швидкостях ковзання дисоціація CO_2 на площинах ковзання не відбувалась і вільний кисень не виділявся.

У повітрі в діапазоні швидкостей 4,5...7,5 м/с спостерігали теплове зношування, супроводжуване окисним. У середовищі кисню в усьому діапазоні швидкостей відбувалось окисне зношування, інтенсивність якого було невисокою.

Властивості поверхневого шару зразків, які випробовувались в різних середовищах виявились не однаковими. Мікротвердість поверхні тертя зразків, які випробовували в повітрі та кисні, достатньо висока і незначно змінюється зі зміною швидкості, оскільки у всьому діапазоні швидкостей утворюються суцільні шари сполук заліза з киснем.

У вуглекислоті при швидкостях 1,5...3 м/с мікротвердість поверхонь зразків також була достатньо високою, оскільки на площинах ковзання відбувалось утворення сполук заліза з киснем.

В аргоні, азоті, а також у CO_2 при швидкостях, які відповідають тепловому зношуванню, мікротвердість поверхонь невисока і залежить від ступеня пластичної деформації та рекристалізації.

І. Носовським був виявлений суттєвий вплив зовнішнього газового середовища на закономірності розвитку та інтенсивність основних видів зношування. При великих швидкостях ковзання зношування у середовищі аргону виявилось майже в 85 разів інтенсивнішим, ніж у кисні. Встановлено, коли процес дифузії кисню всередину пластично деформованого металу достатньо інтенсивний, абсорбція відбувається активно і на поверхні металу утворюються шари різних типів сполук кисню з металом.

При окисному зношуванні спостерігається руйнування не поверхневих шарів чистого металу, а шарів, що утворились внаслідок взаємодії металу з киснем. При відсутності або недостатній інтенсивності дифузії кисню руйнується сам метал.

Виявилось, що наявність на поверхнях тертя плівок окислів і твердих розчинів кисню в металі значною мірою впливає і на температуру поверхонь тертя, а отже, – і на інтенсивність зношування.

При терті в кисні і повітрі температура не перевищувала 350...400 °С, в аргоні – 1200...1300 °С, в азоті – 500...600 °С.

Газове середовище спричиняє суттєвий вплив і на коефіцієнт тертя, особливо при великих швидкостях ковзання. Так, при швидкості 10,5 м/с коефіцієнт тертя в аргоні в 50 разів, у CO₂ – у 40 разів, в азоті – у 20 разів, у повітрі – у 3 рази більший, ніж у кисні.

14.2. Вплив рідких середовищ на процеси тертя і зношування

Багато деталей, які утворюють пари тертя, зокрема, в обладнанні харчової і переробної промисловості, знаходяться в контакті з рідкими середовищами.

За характером взаємодії з металами рідкі середовища можна розділити на хімічно - активні і поверхово - активні. До хімічно-активних середовищ відносять розчини електролітів - кислот, лугів, солей. Молекули розчинених у цих середовищах речовин здатні дисоціювати і забезпечувати здійснення електрохімічних корозійних процесів. Поверхнево – активні (ПА) середовища містять речовини з полярними (асиметричними) молекулами, що адсорбуються на поверхнях твердих тіл, утворюючи структурну плівку.

Вплив електрохімічних корозійних процесів на механічні властивості металів і їх втомлювальну міцність добре вивчений. Проведені дослідження показали, що ці процеси проявляються значною мірою і при терті, і при зношуванні. Як приклади, що підтверджують вплив складу середовища на процеси зношування, можна привести результати досліджень абразивного зношування конструкційних матеріалів, проведені М. Хрущовим.

Випробуванням піддавали зразки з сталі 35 (НВ 188 кгс/мм²) і термічно обробленої сталі 12Х18Н9 (НВ 387...412 кгс/мм²).

За базові середовища було вибрано водопровідну, річкову і дистильовану воду. В усіх випадках температуру середовища підтримували 30 °С. Встановлено, що знос сталі 35 у водопровідній, річковій, дистильованій воді відносяться як 1:1,2:34,2. Річкова і водопровідна вода при зберіганні змінюють свої властивості. Так, у річковій воді, що зберігалась 240 год, зношення сталі 35 збільшилось в 18,5 рази порівняно зі зношенням у свіжій воді. Однакова вода при терті по-різному взаємодіє з вибраним сталями: зношення сталі 12Х18Н9 у свіжій водопровідній воді виявилось майже в 5 разів більшим за зношення сталі 35, а в дистильованій – майже у 46 разів меншим. Очевидно, розходження в інтенсивності зношування у водах різної природи пов'язано з тим, що в них розчинені різні речовини.

Також була досліджена зносостійкість тих же сталей у водяних розчинах з різною концентрацією водневих іонів, яка характеризується величиною рН. Розчини готували з НСl, NaOH, K₂CrO₄ на дистильованій воді і воді з міського водопроводу. Виявилось, що рН і природа води, вибраної для приготування розчину, суттєво впливають на інтенсивність зношування (рис. 14.1).

Зношування, при якому проявляються властивості середовища, називають *корозійно-механічним*.

При дослідженні дії рідких лужних і кислих середовищ на зношування різних металів встановлено, що лужне середовище перешкоджає схоплюванню металів, зменшуючи ступінь пластичного деформування поверхневого шару.

Наприклад, при виборі металів для торцевих пар тертя, що працюють у 25%-ному розчині H_2SO_4 визначено, що в цьому випадку варто виходити, головним чином, з корозійної стійкості матеріалів, тому що в таких умовах механічні властивості матеріалів здійснюють менший вплив на інтенсивність зношування.

При корозійно-механічному зношуванні внаслідок дії середовища на поверхнях тертя послідовно утворюються і стираються захисні плівки, властивості яких за інших рівних умов досліджень залежать від корозійної активності середовища. Причому, плівки, що утворюються на поверхнях контакту при терті, мають інші властивості, ніж плівки, що утворились в статичних умовах.

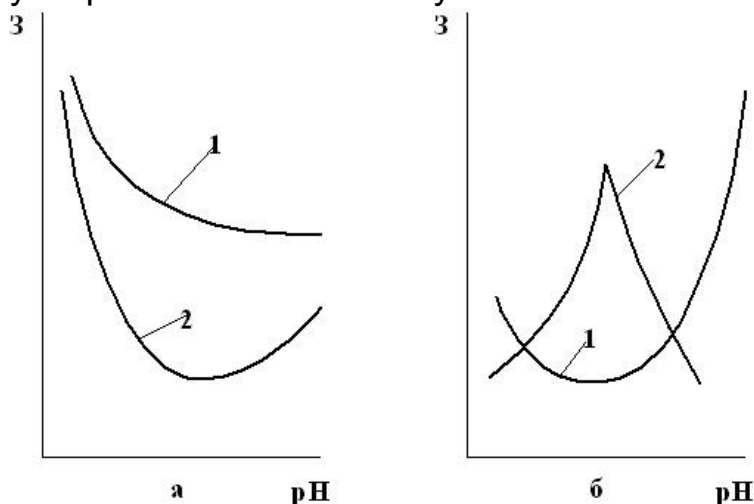


Рис. 14.1. Загальна залежність зношування сталі 35 (1) і 12X18H10T (2) від водневого показника середовища: а - в дистильованій воді; б - у водопровідній воді

Поведінка плівок при терті та їхні захисні властивості частково можна характеризувати зміною величини електродних потенціалів зразків. Величина електродного потенціалу, яка тісно пов'язана зі зношуванням плівок, що утворюються на поверхнях тертя, залежить від швидкості ковзання, нормального тиску, температури в зоні контакту, температури середовища. Зі збільшенням нормального тиску електродний потенціал змінюється, поступово наближуючись до величини електродного потенціалу звільненого від плівки металу.

Такий потенціал звільненого від плівки металу називають *критичним*. При досягненні електродним потенціалом критичного значення відбувається схоплювання, оскільки в контакт вступають звільнені від плівок поверхні. Таким чином, корозійно-механічне зношування без схоплювання здійснюється тоді, коли значення електродного потенціалу нижче критичного.

По мірі наближення електродного потенціалу до критичного значення інтенсивність зношування зростає. Тому критичне значення

електродного потенціалу металу, звільненого від плівки і залежного від середовища, при корозійно-механічному зношуванні є найважливішою характеристикою.

У лужному середовищі зміни електродного потенціалу, як і об'ємного зношення, пропорційні тривалості досліду.

При корозійно-механічному зношуванні електрохімічні потенціали відіграють найважливішу роль.

Роль поверхнево – активних речовин (ПАР) в процесі тертя і зношування досліджена в роботах П. Ребіндера і його співробітників.

14.3. Ефект адсорбційного зниження міцності поверхонь тертя

У великому комплексі досліджень міцності конструкційних матеріалів особливе місце займають роботи, присвячені адсорбційному зниженню міцності твердих тіл. У науково – технічній літературі це явище називають “ефектом Ребіндера”, який його відкрив і вперше науково обґрунтував.

Поверхнева енергія. Розглянемо приклад. Коли в ємність налита рідина, з часом над нею утворюється пара і встановлюється динамічна рівновага: швидкість випаровування дорівнює швидкості конденсації. Середні відстані між молекулами рідини в повітрі в багато разів більші від самих молекул і взаємодії між молекулами тут практично немає.

Зовсім інакше взаємодіють молекули в рідині. Густина рідини набагато більша густини її пари. Наприклад, при кімнатній температурі густина води в $6 \cdot 10^5$ разів більша густини насиченої пари. Тому в рідині сили взаємодії між молекулами співставні з їхніми розмірами. Молекула в рідині з усіх боків оточена “сусідами” і сила f_1 , з якою молекула А притягується молекулою A_1 , врівноважується силою, спрямованою в діаметрально протилежному напрямку – до молекули A_2 (рис. 14.2). Аналогічно будуть урівноважені сили притягіння, що діють в будь-яких інших напрямках.



Рис. 14.2. Сили взаємодії молекул у рідині та на повітрі

В іншому стані виявляються молекули на поверхні. Через те, що молекули пари розташовані набагато далі одна від одної, ніж молекули рідини, то сила притягування f_2 у багато разів менша за силу f_1 , що діє в протилежному напрямку. Отже, молекули поверхні рідини

мають надлишкову енергію порівняно з молекулами в об'ємі. Її називають надлишковою вільною енергією. Найчастіше її відносять до 1 см^2 поверхні рідини і тоді називають *вільною енергією* (σ).

Існування поверхневого шару з надлишковою енергією в рідині (у воді і розплавленому свинці) уперше обґрунтував Р. Гук на початку XVIII століття. Майже через 100 років це явище було пояснено Е. Юнгом (у 1804 р.) і П. Лапласом (у 1806 р.).

Особливість цього шару полягає в тому, що на нього діють спрямовані нормально до поверхні неврівноважені сили, а результуюча сила направлена всередину рідини. Отже, на весь поверхневий шар діють сили, спрямовані нормально до поверхні.

Нескомпенсованість молекулярних сил у поверхневому шарі рідин і твердих тіл має важливе значення. Встановлено, що міцність твердого тіла залежить від його поверхневої енергії. З її підвищенням збільшується поверхневий натяг твердого тіла і його міцність.

Адсорбція поверхнево активних речовин (ПАР).

Поверхневий шар металу має велику активність, що обумовлює виникнення адсорбції, особливо ПАР (органічні кислоти, їхні сполуки, спирти, смоли тощо). Характерною особливістю ПАР є полярність їх молекул, тобто розбіжність їхніх позитивних і негативних зарядів.

Такі ПАР, як жирні одноосновні кислоти (олеїнова, стеаринова, пальмітинова тощо) мають молекули, довжина яких у 5...10 разів перевищує поперечний переріз. Ці молекули прикріплюються до поверхні металу своєю карбоксильною групою. Насичений адсорбційний моношар утвориться з щільно розташованих паралельних одна одній молекул (рис.14.3). Кінець молекули, що приєднується до металу і подібний маленькому магніту, називають полярним (або активним). Інша частина молекули складає так званий "хвіст".

Оскільки атоми на поверхні твердого тіла мають нескомпенсовані молекулярні сили, то чим більша ця нескомпенсованість, тим вища поверхнева енергія, поверхневий натяг твердого тіла і більша його міцність.

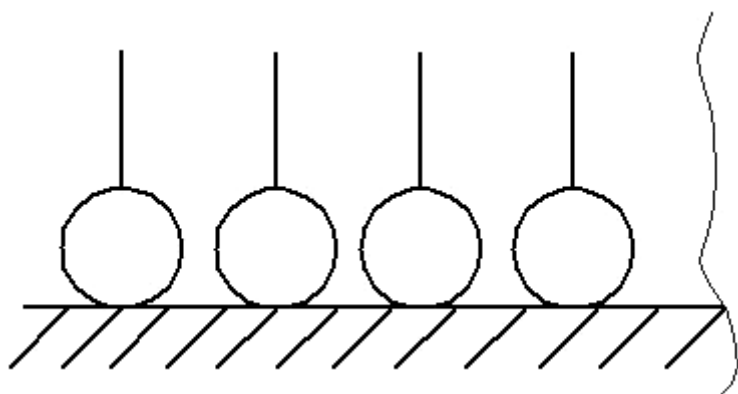


Рис. 14.3. Схема утворення адсорбційного моношару молекул

Як тільки внаслідок адсорбції, ПАР покриє поверхню твердого тіла шаром хоча-б в одну молекулу, відбудеться

певна компенсація поверхневих молекулярних сил, зменшиться поверхневий натяг і знизиться міцність. Це явище, відкрите П. Ребіндером, називають *адсорбційним зниженням міцності*.

Адсорбований шар, знижуючи поверхневий натяг металу, полегшує пластичну деформацію зерен його зовнішнього шару. Це так званий *ефект адсорбційної пластифікації*, що є першим проявом “ефекту Ребіндера”.

Адсорбовані молекули ПАР, намагаючись покрити всю поверхню тіла в зоні його контакту з активним середовищем, проникають в ультрамікроскопічні щілини, тріщини, мігруючи по їхніх стінках зі швидкостями, що значно перевищують швидкість засмокування рідини в зазор. Коли активні молекули досягають місць, де ширина зазору дорівнює розміру однієї - двох молекул, адсорбційний шар своїм тиском прагне розклинити тріщини для свого подальшого просування. Цей *адсорбційно-розклинюючий ефект* відомий як другий прояв “ефекту Ребіндера” (рис. 14.4).

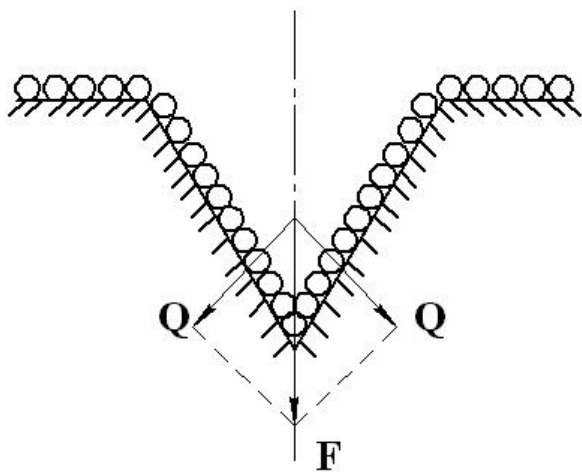


Рис. 14.4. Розклинююча дія ПАР в тріщині матеріалу

Тиск на стінки у вершині тріщини може досягати 1000 кгс/мм^2 .

Розтягуючі напруження (власні або від зовнішнього навантаження) розкривають ультрамікротріщини і сприяють прояву “ефекту Ребіндера”. При стискаючих напруженнях тріщини змикаються, може відбутися навіть їхнє “самозаліковування” і ефект може не розвинути. При пружній, а особливо при пластичній деформації, виникають тріщини (щілини) з незабрудненими стінками. Адсорбуючись на цих стінках, активні молекули спричиняють розклинюючу дію і посилюють деформацію. Таким чином деформація створює передумови для прояву розклинюючої дії, яка потім інтенсифікує саму деформацію.

Причому, поверхово - активне середовище може здійснювати подвійну дію. Первинною дією завжди виявляється зниження опору деформуванню, знеміцнення. Однак, кінцевим результатом може виявитись підвищення міцності – значне зміцнення внаслідок сильних спотворень ґраток поверхневих зерен у результаті значно більшої, ніж при відсутності ПАР, попередньої пластичної деформації.

Таким чином, великий вплив на процес тертя і зношування, його характер і інтенсивність здійснює наявність в оточуючому поверхню середовищі ПАР. Наявність ПАР характерна для переважної більшості середовищ харчової і переробної промисловості. У визначених умовах, що відповідають виникненню у поверхневому шарі напруженого стану, при якому утворюються достатньо високі розтягуючі напруження, інтенсивність зношування під впливом ПАР може різко підвищитись.

Відомо, що стабільна робота машини неможлива без достатнього мащення, що зменшує роботу, яка витрачається на тертя, і відводить утворюване тепло. Але головне призначення мащення – запобігти зчепленню сполучених деталей і їхньому інтенсивному зношуванню, що приводить до зупинки або руйнування машини.

До останнього часу вважалось, що дія такого пограничного шару мастила полягає лише в тому, що він роз'єднує дотичні поверхні навіть при високих тисках. Але дослідження показали, що активні мастила завжди полегшують пластичну течію тонкого поверхневого шару при терті в умовах досить високих тисків. Це полегшує припрацювання деталей у початковий період роботи машини і виключає можливі задири при перевантаженнях вузлів тертя. Коли припрацювання закінчується, контактні тиски різко падають, оскільки навантаження розподіляється на велику несучу поверхню (несучу площу контакту) згладжених поверхонь.

Після припрацювання мащення забезпечує меншу пластифікуючу дію і відіграє, головним чином, екрануючу (роз'єднувальну) роль.

14.4. Характеристика деяких середовищ харчової і переробної промисловості

Склад середовищ харчових виробництв надзвичайно різноманітний. Їх умовно можна розділити на мінеральні та органічні (або речовини, які їх містять). До першої групи належать водяні розчини мінеральних кислот, іони металів, водяні середовища, що включають різні абразивні домішки.

До другої групи відносять дуже численні і різноманітні вуглецевмісні сполуки рослинного і тваринного походження.

Крім того, виробництво харчових продуктів зв'язано з гідравлічним транспортуванням і мийкою сировини, процесами гідролізу, екстрагування, фільтрації тощо. Для здійснення останніх використовується велика кількість допоміжних речовин: мінеральні кислоти (HCl , H_2SO_4 , H_2SO_3), луги, хлориди, водяні розчини аміаку, спирту. Розглянемо склад деяких середовищ.

14.4.1. Середовища бурякоцукрових виробництв

З технологічних середовищ харчових виробництв найбільш різноманітними за складом і властивостями є технологічні середовища

бурякоцукрового виробництва – цукропереробного, сокоочищувального і продуктового.

Середовища *цукропереробного* відділення є нейтральними чи слабокислими (рН 6–7), а їх робоча температура близька до 15...45 °С. До них відносяться: ставкова або річкова, барометрична, транспортерно – мийна води. Вони містять різну кількість сухих речовин у твердому і солей у розчиненому стані. До середовищ цього відділення відноситься і дифузійний сік, що являє собою 15%-вий водяний розчин цукру і нецукрів. Дифузійний сік містить майже всі нецукри, що знаходяться в буряку в нерозчиненому стані, а також ті, які переходять у розчин в процесі дифузії. До нецукрів дифузійного соку належить цілий ряд азотистих і безазотистих сполук, у тому числі ПАР, наприклад, пектин. Температура соку становить 40...45 °С, рН 6,0 – 6,5.

Середовища *сокоочищувального* відділення за своїм складом більш різноманітні, мають підвищену лужність (рН 8 – 14), їхня температура досягає 65...95 °С. Усі вони, за винятком вапняного молока і фільтрпресового броду, містять 15...17 % цукрози і велику кількість нецукрів. Вапняне молоко, дефекований і сатурований соки містять у різних кількостях тверду фазу (зважені частинки гідроокису кальцію, окису кремнію, алюмінію тощо), яка має різні абразивні властивості. Дефекований сік містить також значну кількість нецукрів, що концентруються в осаді.

Середовища *продуктового* відділення є слаболужними (рН 8–9), містять велику кількість розчиненого цукру (25...65%), їх температура становить 40...85 °С. Умовно вони можуть бути розділені на дві групи: 1 – утфелі й афінаційна маса, що містять до 40...70% цукру в кристалах; 2 – патоки, що містять 50...60% розчиненої цукрози і до 30% нецукрів.

Наявність середовищ зі складним комплексом розчинних і нерозчинних сухих речовин обумовлює розвиток в обладнанні бурякоцукрового виробництва електрохімічних корозійних процесів, явища адсорбційного пластифікування контактуючих поверхонь тертя, а, отже, сприяє інтенсивному зношуванню. Ці середовища значно впливають на корозійне, ерозійне і гідроабразивне зношення поверхонь робочих вузлів.

14.4.2. Середовища олієжирових підприємств

В устаткуванні підприємств харчової промисловості деталі робочих органів часто зношуються внаслідок контакту не з іншими деталями, а з продуктами переробки, причому інтенсивність зношування в деяких випадках дуже велика.

Так, в зеєрній камері шнекпреса, що переробляє насіння соняшника на олію, деталі (скребки, зеєрні пластини і ножі, конуса, шнеки) під великим тиском стикаються з мезгою й олією і зношуються продуктами переробки достатньо інтенсивно.

Відомо, що в соняшнику міститься 24...30% жиру, причому, в насінні його 23,5...30,8%, а в ядрах – 38,8...52,2%. За своєю хімічною будовою жири є поєднанням складних ефірів (гліцеридів), триатомних спиртів, гліцерину і високомолекулярних ефірних кислот. Найбільш поширеними жирними кислотами, які входять до складу рослинних жирів, є стеаринова, пальметинова, олеїнова, лінолева. Загалом у рослинних оліях нараховується до 40 видів різних жирних кислот. Причому, їх вміст в соняшниковій олії досягає (у % до загального їхнього змісту) лінолевої – 62, олеїнової – 40, пальметинової – 6,4, стеаринової – 4,6.

Кількість вільних жирних кислот залежить від тривалості та умов зберігання олії або насіння, ступеня їх дозрілості і свіжості. Традиційно, більше вільних жирних кислот містять олії з недозрілого, пророслого або зіпсованого насіння. Встановлено, що в тригліцеридах соняшникової олії вміст кислот такий (відносно загальної їхньої кількості): стеаринової – 9%, олеїнової – 39%, лінолевої – 46% .

Очевидно, що до складу соняшникової олії входять такі ефективні ПАР, як стеаринова та олеїнова кислоти, що обумовлюють адсорбуючий вплив і беруть безпосередню участь у зношуванні.

14.4.3. Середовища м'ясопереробних підприємств

З практики відомо, що значному зношуванню піддаються деталі робочих органів обладнання м'ясокомбінатів (машини для різання, подрібнення, розмелювання, перемішування сировини і продукції), наприклад, вовчкові емульсатори, машини для розрубання голів, дробарки, шпигорізки, змішувачі тощо. У ряді випадків деталі цих пристроїв не мають безпосереднього контакту між собою і контактують лише з продуктами, які переробляються. Очевидно, що в цьому випадку істотний вплив на інтенсивність зношування здійснює середовище.

Найважливішою складовою частиною м'ясних продуктів, що знаходяться в контакті з робочими органами м'ясопереробних машин, є досить складна за хімічною будовою м'язова тканина. В її склад входять білки, різні екстрактивні і мінеральні речовини, вуглеводні, вітаміни, ферменти. Основними в ній є білки і ліпіди. Так, на частку білків припадає близько 80% сухого залишку м'язової тканини. Ліпіди – жироподібні сполуки, які містять у великій кількості жирні кислоти, в тому числі певну кількість вільних жирних кислот. Найбільшу частину з них складають: олеїнова (35...45%), пальметинова (24...29%), стеаринова (11...23%), лінолева (1...10%). В значній кількості ці жирні кислоти входять і до складу жирової тканини.

З часом у м'язовій тканині також утворюється молочна кислота, водневий показник рН м'яса знижується і досягає 5,6 – 5,4 після 2...3 діб його зберігання.

Таким чином, технологічні середовища на м'ясопереробних підприємствах є агресивними і містять значну кількість поверхнево-

активних кислот, частина з яких знаходиться у вільному стані. Тваринні жири містять до 50% амінової і до 30% стеаринової кислот, а також ліцетинову, пальметинову і лінолеву кислоти. Отже, при переробленні тваринних жирів, деталі робочих органів обладнання знаходяться під дією ПАР.

При переробці м'язів і інших органів вплив цих речовин також суттєвий. Так, наприклад, м'язи різних тварин містять 0,8...2% жиру, печінка – 1,5...5% жиру.

14.4.4. Середовища молокопереробних виробництв

За складом і властивостями ці середовища дуже різноманітні. Умовно їх можна розділити на органічні і неорганічні. До першої групи відноситься більшість органічних кислот (щавлева, оцтова, молочна, лимонна тощо) і органічні сполуки, характерні лише для молочних продуктів. До другої групи відносяться мінеральні речовини, що входять до складу солей неорганічних і органічних кислот. Молочні продукти містять також мікроелементи і мікроорганізми.

За призначенням в технологічному процесі галузі робочі середовища можна розділити на три класи:

- молоко і молочні продукти (пастеризоване і стерилізоване молоко, вершки, масло, сметана, кисломолочні продукти, сири, молочний цукор, казеїн, альбумін тощо);

- технологічні водяні розчини (ропи, холодна і гаряча вода, пара);

- неорганічні та органічні мийні та очищувальні засоби для санітарної обробки устаткування, до яких відносяться: їдкі луги, кальцинована сода, фосфати, силікати, неорганічні кислоти (азотна, сірчана, соляна, фосфорна) тощо.

Важливу роль у процесі зношування обладнання молокопереробних підприємств визначають такі фактори: склад і природа головного компонента розчинів - води, яку застосовують при виконанні основних процесів і для допоміжних потреб виробництва; температура середовища; концентрація водневих іонів (рН); наявність у середовищі газів; швидкість взаємного переміщення деталей, що зношуються, і середовища; наявність мікроорганізмів, що викликають біокорозію; електрофізичні властивості металів пар тертя і середовища.

Встановлено, що з підвищенням температури агресивність більшості середовищ істотно змінюється. Наприклад, рН середовищ зменшується на 1-2 одиниці, а електропровідність при 80°C понад вдвічі перевищує її значення при 20°C. Сукупний вплив складу агресивного середовища, температури і механічного фактора (переміщення середовища) не може не впливати на процес зношування. Варто це враховувати при вивченні і підборі матеріалів для деталей, що працюють у контакті з нагрітими рідкими корозійно-активними середовищами галузі.

14.4.5. Середовища хлібопекарських заводів

В хлібопекарському виробництві як напівпродукт використовуються рідкі дріжджі і затори для їхнього приготування, заквашені термофільними молочнокислими бактеріями, житні закваски, житнє тісто, опара і тісто з пшеничного борошна, добавки тощо. При життєдіяльності дріжджів і деяких бактерій утворюються і накопичуються в значних кількостях продукти бродіння: етиловий спирт і складні ефіри, а також органічні кислоти - молочна, оцтова, пропіонова, яблучна, винна, лимонна, мурашина, щавлева та інші. З усіх цих кислот основну роль у зношуванні відіграють молочна та оцтова, які забезпечують до 90% кислотності хлібних напівфабрикатів. Найбільш агресивне тісто з житнього борошна.

Тістові напівфабрикати містять також до 2,5% солі, до 2,5% рослинної олії, а також цукор, патоку, солод тощо. Їх рН 6,0 – 4,2. Наявність рослинних олій впливає на поверхневу активність напівпродуктів.

Отже, тістові середовища є електролітами і розсолами, що містять ПАР. Вони сприяють протіканню хімічних, електрохімічних, а також адсорбційних процесів на поверхнях і в поверхневих шарах контактуючих з ними металів.

14.4.6. Середовища крохмально-патокових виробництв

Виробництво патоки, крохмалів, глюкози зв'язане з гідролізом полісахаридів, який здійснюється з використанням сірчаної та соляної кислот, що виконують роль каталізаторів. Їх концентрація знаходиться в межах 0,15...1,5%.

У виробництві крохмалю з кукурудзи у воду для замочування зерна додається 0,25...0,3% сірчаної кислоти. Температура води становить 46...56⁰С, величина рН після замочування складає 4.

Замочене зерно двічі послідовно проходить подрібнення, перетворюючись в кашку з відділенням зародку. Після промивання зародків виділяється крохмальне молоко, що містить близько 37% сухих речовин, яке має температуру 45⁰С і рН 3,8 – 4,3. Крім того, сама гідротранспортерна і промивна вода містять значну кількість абразивних часток.

Через з агресивність технологічних середовищ обладнання крохмально-патокового виробництва піддається інтенсивному зношуванню.

14.5. Вплив технологічних середовищ харчової промисловості на зносостійкість деталей обладнання галузі

Вплив технологічних середовищ харчових виробництв на зносостійкість деталей з різних матеріалів до останнього часу систематично не вивчався. Враховуючи їх розмаїтість, різну хімічну і поверхневу активність, загальні рекомендації з підвищення

зносостійкості контактуючих з ними деталей обладнання дати неможливо. Достатньо обґрунтовані рекомендації для кожного конкретного випадку можуть бути розроблені лише на базі досконалого вивчення дії різних середовищ харчових виробництв на процес та інтенсивність зношування різних матеріалів, з яких виготовлені деталі технологічного обладнання.

14.5.1. Спрацювання обладнання цукробурякових заводів

На основі результатів спостережень за роботою цукрових заводів України впродовж двох сезонів цукроваріння, О. Слинком встановлені причини відмов обладнання, які призвели до зупинки заводів, виявлений розподіл вимушених зупинок заводів у часі під час кожного виробничого сезону.

По мірі зменшення кількості відмов, що викликали вимушені зупинки, основне обладнання бурякоцукрових заводів можна розташувати у наступному порядку: дифузійні апарати, транспортери і шнеки, бурякоелеватори, мийне обладнання, випарні установки, вакуум-апарати, ошпарювачі, насоси, шибєрні пристрої, інше обладнання.

Аналіз відмов показав, що найбільш ненадійними у технологічній лінії бурякоцукрового виробництва являються дифузійні апарати. Їх середній наробіток на відмову у період спостережень коливався від 72 до 800 год. Найбільш слабкими вузлами в усіх типах дифузійних апаратів є привод, транспортна система і вузли вивантаження жому.

Вимушені простої заводів у більшості випадків відбуваються через відмову обладнання. Середня тривалість простою заводу на одну вимушену зупинку складає приблизно 5 годин. Більшість вимушених зупинок заводів відбувається внаслідок виходу з ладу обладнання, що працює в умовах дії слабких та кислих технологічних середовищ, а також обладнання, яке знаходиться у технологічній лінії до ділянки очистки соку, де технологічні середовища бурякоцукрового виробництва розділяються на кислі і лужні. Кількість зупинок цього обладнання перевищила в $2,2 \div 4,0$ рази кількість вимушених зупинок через відмови іншого обладнання. Тобто, найбільш вагомий вплив на працездатність обладнання мають кислі технологічні середовища бурякоцукрового виробництва, які сприяють протіканню процесів корозії і зношування металів і зумовлюють низький рівень його надійності та довговічності.

Деталі технологічного обладнання, що працює в транспортерно – мийних водах (соломолушек, каменелушек, бурякомийок, бурякоелеваторів тощо), піддаються інтенсивному зношуванню.

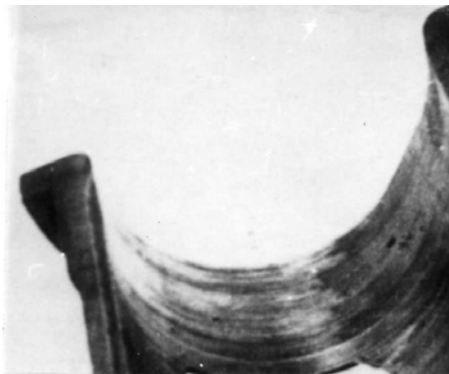
Транспортерно-мийні води містять різні розчинні і нерозчинні речовини. Склад вод різноманітний і нестабільний протягом року. Крім того, вони містять також домішки, наприклад, окисли алюмінію, заліза, кремнію, частки кварцевого піску, кварцитів тощо величиною від

декількох мікрометрів до декількох міліметрів.

Основні деталі пар тертя бурякомийки – вали і підшипники – працюють в надзвичайно важких умовах експлуатації, що обумовлено значною динамічністю прикладення навантаження, попаданням абразивних часток з ванни на деталі тертя, відсутністю, як правило, мащення і значною тривалістю безперервної роботи. Внаслідок наявності великої кількості абразивних часток, що заносяться разом з буряком (пісок, дрібні камінці, частинки ґрунту), які попадають і на поверхні тертя, відбувається інтенсивне абразивне зношування - в першу чергу шийок валів і підшипників. На рис. 14.5 показані захисна втулка і чавунна укладка підшипника бурякомийки, що пропрацював 130 діб на Яготинському цукрозаводі. Це приклад того, наскільки інтенсивне в цьому випадку абразивне зношення, якщо деталь з товщиною стінки 12 мм виявилась протертою наскрізь. На рис. 14.6 показаний чавунний підшипник підп'ятника каменевловлювача, що пропрацював на Миронівському цукровому заводі 6 місяців. Внаслідок інтенсивного абразивного зношування стінка підшипника протерта наскрізь.



а



б

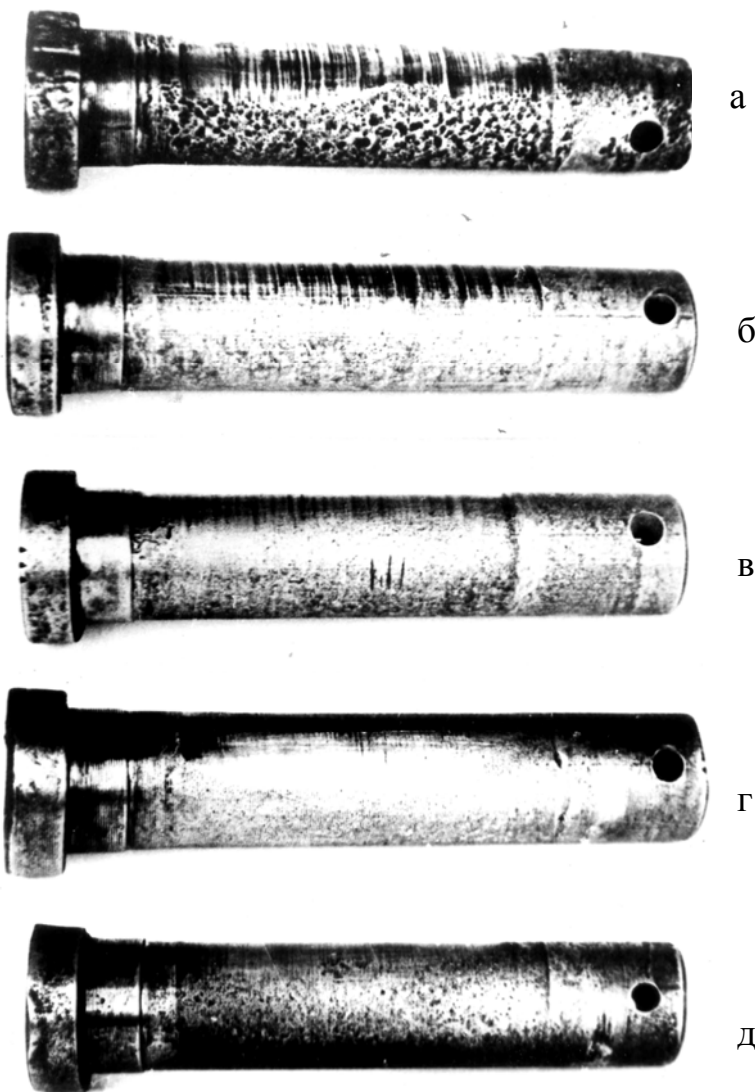
Рис. 14.5. Зношена поверхня захисної втулки (а) і укладки підшипника (б) бурякомийки



Рис. 14.6. Зношена поверхня підшипника підп'ятника каменевловлювача

При подачі буряка елеватором разом з буряком в потік попадає значна кількість води та абразивних домішок. Найбільш відповідальними деталями, зносостійкість яких визначає надійність роботи бурякоелеватора, є деталі тягового втулково-роликового ланцюга. Ланцюги на цукро заводах складають з окремих ланок, що містять пластини, з'єднані за допомогою втулок і пальців. Пальці виготовляють зі сталі Ст2 або Ст3, цементують і гартують до НВ 240 – 250, а інколи азотують, втулки - зі сталі Ст5, пластини – зі сталі Ст3. Втулки і пластини термічно не оброблюють. При монтажі бурякоелеватора секції ланцюга з'єднують з ковшами за допомогою причіпних пальців. Ці пальці в комплекті не поставляються і їх виготовляють безпосередньо на цукрових заводах. Причіпні пальці, метал для яких вибраний менш вдало і не зміцнений, зношуються дуже інтенсивно (рис. 14.7).

Рис. 14.7. Незміцнений (а) і азотований (б-д) сталеві причіпні пальці втулково-роликового ланцюга бурякоелеватора після одного сезону експлуатації: а – сталь Ст3; б – 20; в – 45; г – 45Х; д – 38Х2МЮА



На рис. 14.8 (а,б) наведені чавунна укладка підшипника і сталеві захисна втулка вала жомозмішувача, які пропрацювали 180 діб на Гніваньському цукро заводі. Стінка захисної втулки вала дефектатора виявилась протертою наскрізь.

Інтенсивному абразивному зношуванню в багатьох випадках піддаються деталі насосів, в яких абразивне зношення посилюється агресивним впливом середовища.

На рис. 14.8 (в) показані поверхні тертя захисних сталевих втулок валів насосів СОТ-100, якими протягом 120 діб перекачували сік і сатурації на

Григорівському цукровому заводі.

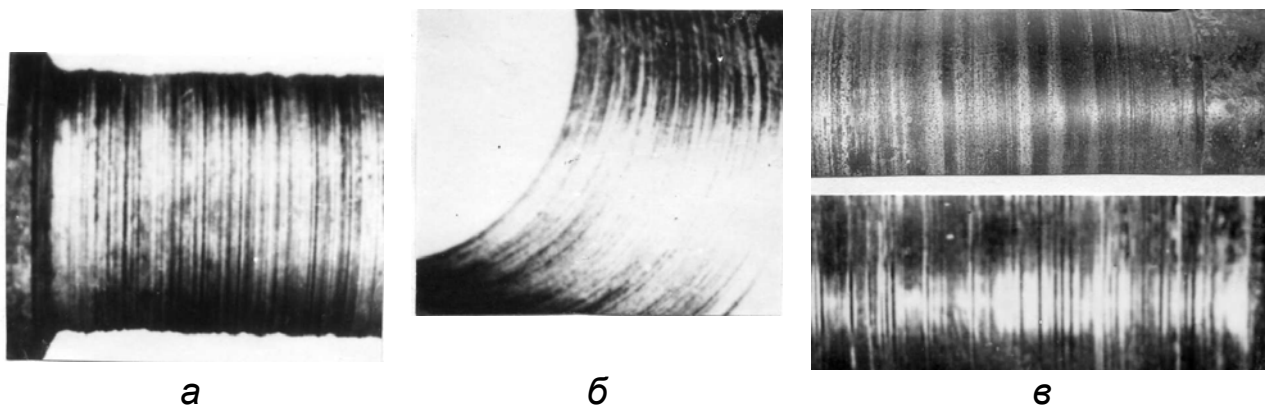


Рис. 14.8. Зношені поверхні захисної втулки вала (а), укладки підшипника жомозмішувача (б) і захисних втулок насосів типу СОР (в)

Дуже інтенсивному зношуванню піддаються деталі насосів, що перекачують у цукровому виробництві вапняне молоко.

14.5.2. Зношування устаткування олійних виробництв

Авторами вивчалось зношування деталей шнекових пресів, що перероблюють насіння соняшника на олію. Проаналізуємо умови роботи деталей зєрного тракту при переробленні насіння соняшника.

Напружений стан у поверхневому шарі цих деталей виникає внаслідок дії напружень, створюваних дією нормальної сили на поверхню деталей зєра і також тангенційних розтягувальних напружень, які обумовлені силою тертя шроту по цих деталях при його переміщенні шнековим механізмом.

Розрахунки показали, що тиск біля вихідного конуса камери досягає 180 кгс/см^2 , внаслідок чого поверхневі шари деталей зєрного тракту знаходяться в напруженому стані.

Раніше відмічалось, що до складу соняшникової олії входять у значній кількості такі сильні ПАР, як олеїнова та стеаринова кислоти, в тому числі у вільному стані. Зовсім природно припустити, що вони беруть активну участь в процесі зношування деталей зєрного тракту, руйнують і прослабляють їхній поверхневий шар, сприяючи його пластифікуванню і перетіканню. Під дією поверхнево-активних жирних кислот напружений поверхневий шар деталей зєрного тракту набуває такого стану, що порівняно легко диспергується, а відокремлені частинки металу виносяться масою шроту. Інтенсивне пластичне деформування найтоншого поверхневого шару робочої частини зношених ножів було встановлено при вивченні їхніх поверхонь тертя за допомогою електронного мікроскопа.

Вільні жирні кислоти можуть і хімічно взаємодіяти з металом поверхонь деталей зєрного тракту. Крім того, абразивна дія мінеральних домішок, які потрапили у шрот, або твердих часток шроту інтенсифікується завдяки наявності ПАР.

14.5.3. Спрацювання обладнання м'ясопереробних підприємств

В устаткуванні м'ясопереробних заводів найважливішими типом обладнання є м'ясоподрібнювальні машини (вовчки, куттери, емульсітатори). Найбільш інтенсивно зношуються деталі різальних комплектів, наприклад ножі і решітки вовчків.

Авторами встановлено, що за 7 годин безперервної роботи ножі вовчків зношуються на 3-4 мм, а решітки – на 0,14 – 0,18 мм.

Руйнування поверхонь при терті в м'ясному середовищі має складний характер. Деталі різальних комплектів витримують при перерізанні м'яса значні навантаження. Крім того, в зону різання іноді можуть попадати частки кісток, що додатково збільшує навантаження. Всі ці фактори не можуть не викликати істотного зношування, яке суттєво інтенсифікуються впливом ПАР, що містяться в м'ясному середовищі. Роль ПАР виконують вільні жирні кислоти.

Високий ступінь пластифікування поверхневих шарів під дією ПАР і значна концентрація ПАР в середовищі викликає інтенсифікацію також електрохімічних і корозійних процесів на поверхнях тертя, тобто зміну швидкості і характеру утворення плівок вторинних структур і їхнього подальшого руйнування.

При аналізі механізму зношування деталей робочих органів технологічного обладнання м'ясокомбінатів була встановлена аналогія з механізмом зношування деталей робочих органів олійних виробництв. І в цьому випадку також визначальний вплив на механізм зношування має зниження міцності поверхневого шару під дією поверхнево – активного середовища.

Таким чином, основою для розкриття механізму хіміко-механічного зношування деталей обладнання, що переробляє харчові продукти, які містять ПАР, є теорія адсорбційного полегшення деформацій або адсорбційного зниження міцності, яка покладена в основу сучасної фізико-хімічної механіки матеріалів.

14.5.4. Зношування обладнання молокопереробних заводів

Для обладнання, яке контактує з продуктами, зокрема в молочній промисловості, традиційно використовують корозійностійкі леговані сталі 20X13, 30X13, 08X17T, 12X18H9, 12X18H10, 12X18H10T тощо. При відносно високій стійкості до загальної корозії вони з часом піддаються місцевим корозійним руйнуванням, особливо в місцях локалізації високошвидкісних потоків. Крім того, корозійні процеси інтенсифікуються при постійному використанні мийних засобів.

Характерною рисою молокопереробного обладнання є наявність рухомих робочих органів, які механічно діють на продукт, або контактують з технологічними агресивними середовищами, які впливають на плин складного і багатофакторного процесу зношування. Традиційний підбір матеріалів для виготовлення деталей, без врахування цього впливу, часто приводить до швидкої втрати

працездатності обладнання. Технічне переозброєння молочної промисловості в даний час визначається підвищенням ефективності, безвідмовною роботою і довговічністю обладнання, через що найважливішого значення набуває підвищення корозіє- і зносостійкості деталей обладнання галузі.

Дослідження понад двохсот зношених деталей молочного обладнання показало, що основним видом зношування є корозійно-механічне, але в багатьох випадках його супроводжує окисне, втомне, гідроабразивне. Найбільш інтенсивному зношуванню піддаються деталі, що контактують із рідкими технологічними середовищами промисловості.

Аналіз зношених деталей робочих органів обладнання підтвердив, що зношування деталей може здійснюватись внаслідок спільної корозійної і механічної дії середовища при відсутності контакту з іншою деталлю, тобто в системі метал - середовище. До таких деталей відносяться деталі різальних органів подрібнювачів сиру і сирної маси, деталі мішалок, сопла м'яких пристроїв та інші деталі технологічного і допоміжного обладнання.

Оскільки технологічний процес, режими переробки молочних продуктів і склад середовищ не можуть бути змінені, то шляхи боротьби зі зношуванням обмежені. Дослідження у цьому напрямку спрямовані на вибір корозійно- і зносостійких матеріалів та конструктивних удосконалень вузлів тертя, підвищення їхньої зносостійкості. Інтенсивність зношування деталей технологічного обладнання залежить від умов експлуатації і робочих середовищ. При цьому корозійний фактор у ряді випадків відіграє переважну роль.

У молочної промисловості використовуються різні води, вплив складу яких на процес зношування вивчався О.Новицьким. Встановлено, що корозійне руйнування істотно залежить від їхніх характеристик. Так, при перемінному зануренні у середовище зразків зі сталі 45 швидкість корозії в технологічних водах була такою: в дистильованій – 0,27, питній – 0,30, жорсткій – 0,35, артезіанській – 0,44, річкової – 0,64 мм/рік. Очевидно, воду перед використанням у виробництві доцільно попередньо готувати.

На Пирятинському сирзаводі на сирних пресах повзуни із силуміну, що виходять з ладу раніше регламентованого терміну внаслідок інтенсивного корозійно-механічного зношування, були замінені повзунами з антифрикційного полімерного матеріалу, який у цих умовах виявився значно більш зносостійким. Термін служби таких повзунів був вдвічі більшим.

Для подрібнювання сирної маси у виробництві плавлених сирків і сиру застосовуються подрібнювачі типу МП-1. Зносостійкість деталей різальних органів подрібнювача внаслідок інтенсивного корозійно-механічного зношування низька. Застосування різальних органів

зміненої конструкції і заміна матеріалів ножів і решіток дозволила підвищити термін служби різальних елементів майже в 10 разів.

Аналіз зношених деталей і умов експлуатації обладнання молочної промисловості показав, що поверхні деталей вузлів тертя, які контактують із технологічними середовищами, найчастіше піддаються корозійно-механічному зношуванню. Встановлено, що воно виникає не тільки при терті двох металевих деталей, у зону контакту яких проникає агресивне рідке середовище, що інтенсифікує процес механічного зношування, але і при механічній і корозійній дії середовища при відсутності контакту з іншою деталлю.

Встановлено, що з підвищенням температури від 20 до 80 °С при перемішуванні електропровідність рідких технологічних середовищ молочної промисловості значно підвищується, що визначає зростання швидкості корозії при зношуванні.

При виборі металів деталей пар тертя, що контактують із технологічними середовищами, необхідно враховувати їхню електрохімічну сумісність в умовах впливу сильних електролітів. При швидкостях ковзання менших 1 м/с і нормальному тиску до 0,1 МПа, у вузлах тертя доцільно використовувати полімерні матеріали (наприклад, фторопласт, капрон) у парі з економнолегованою нержавіючою сталлю (наприклад, 20X13, 20X17H2). При більш високих навантаженнях кращої виявилась пара сталь 45 – сплав 130X15M2 (термоброблені до HRC 50-55). При періодичному механічному впливі і за відсутності мастильного середовища (наприклад вузол притискання носіїв автомата розливу молока в пакети) доцільно застосувати композиційний матеріал (наприклад, металофторопласт) у парі зі сталлю 40X13 (HRC 52-56).

14.5.5. 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. 14.10). Так, наприклад, встановлено, що у 3%-му розчині хлористого натрію кавітаційне руйнування матеріалів на 80% інтенсивніше, ніж у воді.

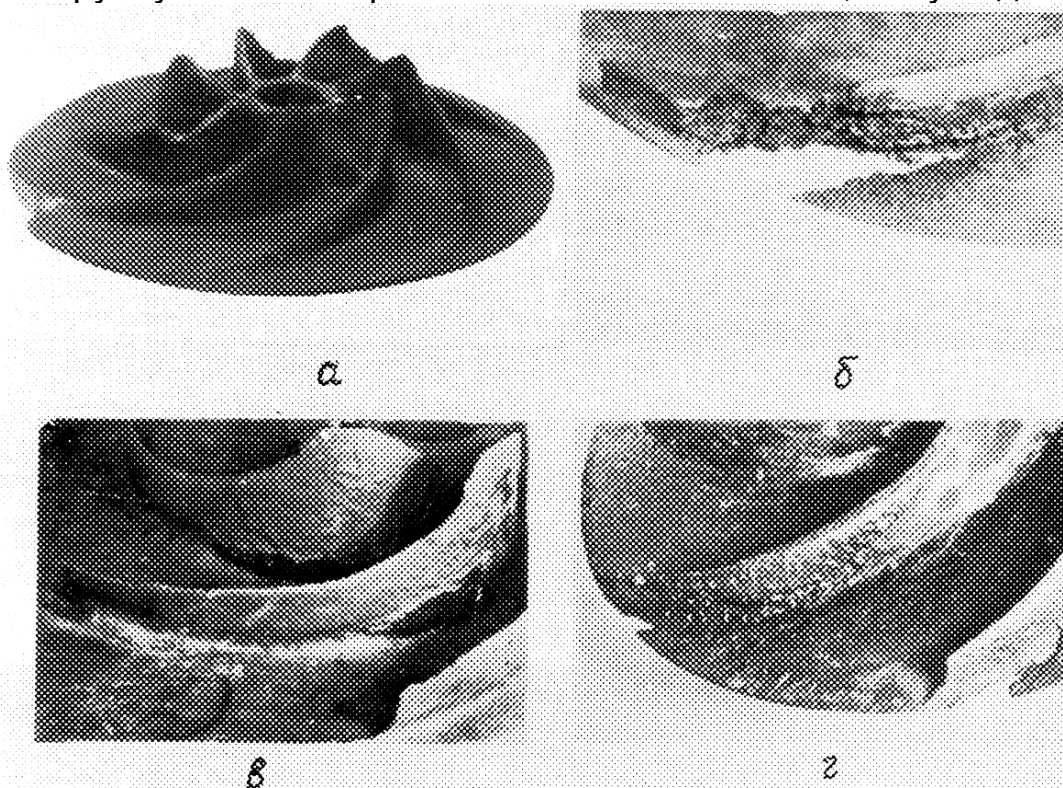


Рис. 14.9. Корозійно-ерозійний знос робочого колеса відцентрового насоса СОР-100 в середовищах сульфатованого (а,б) і дифузійного (в,г) соків бурякоцукрового виробництва

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.

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 інгібруючі 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.

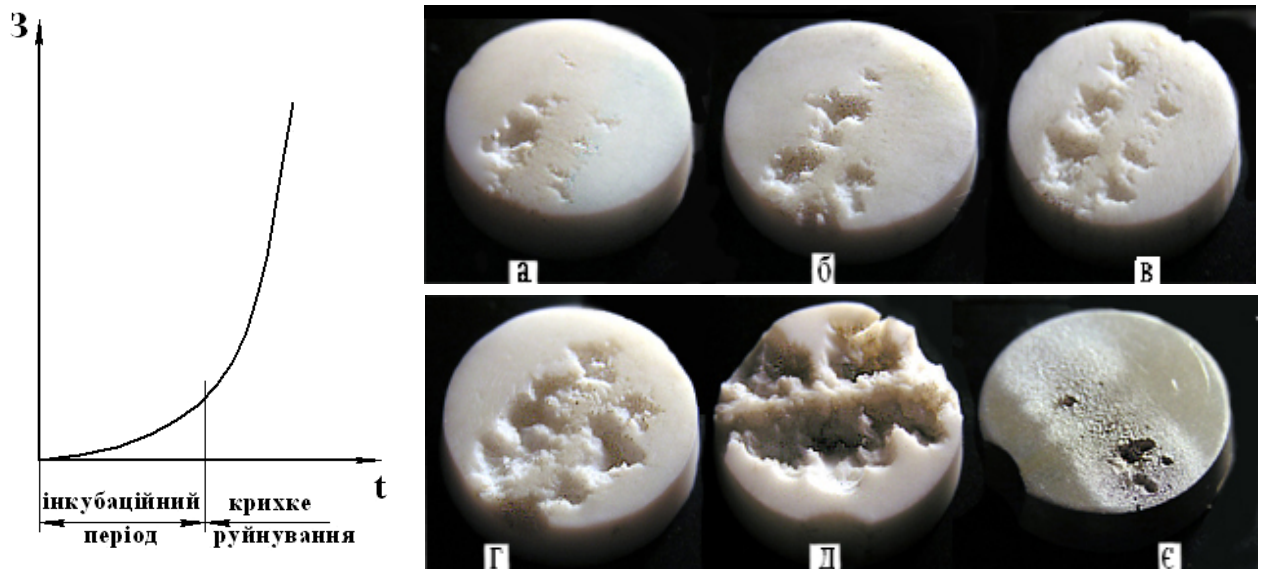


Рис. 14.10. Типова залежність зносу і зміна швидкості руйнування зразків з фторопласта – 4Д (а-д) і дюралюмінію Д16 (е) в умовах гідроерозії на УЕС (див. рис. 14.14) від часу випробувань: а – 10; б – 20; в – 30; г – 40; д, е – 50 хв.

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.

14.5.6. 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 втотою 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. 14.11).

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.

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.

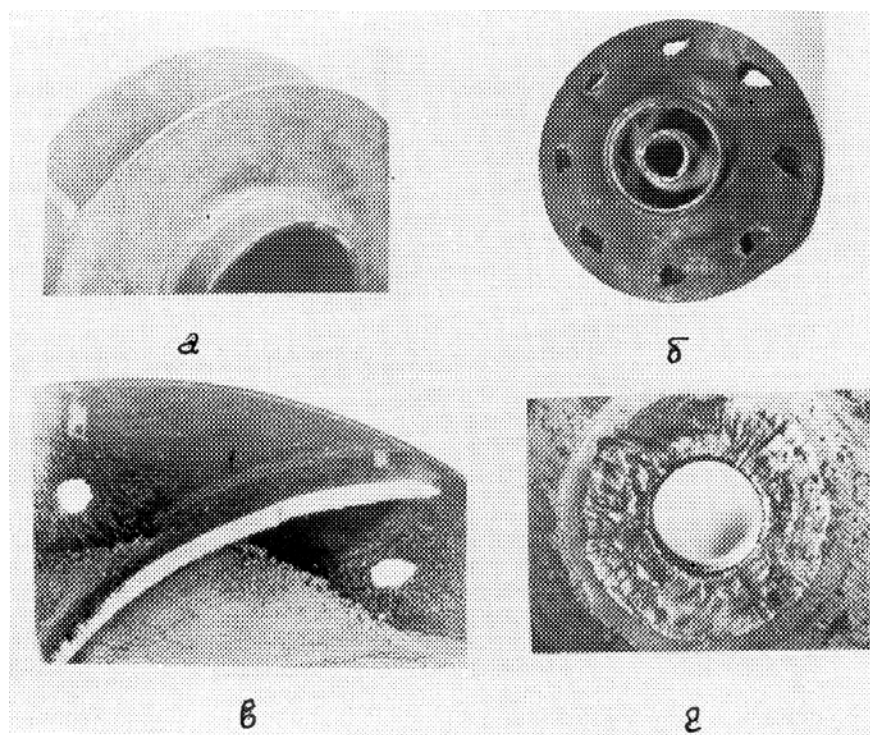


Рис. 14.11. Кавітаційно-ерозійний знос коліс відцентрових насосів НЖВ-150 (а) і 8НДВ (б,в) та сідла клапана гомогенізатора молока (г)

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.

14.5.7. 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-лезно ножа, лезо-обгортка-лезно (рис. 14.12) та ін. Стенди дають можливість проводити дослідження в рідких технологічних середовищах при різноманітних швидкостях тертя і питомих навантаженнях на контакт.

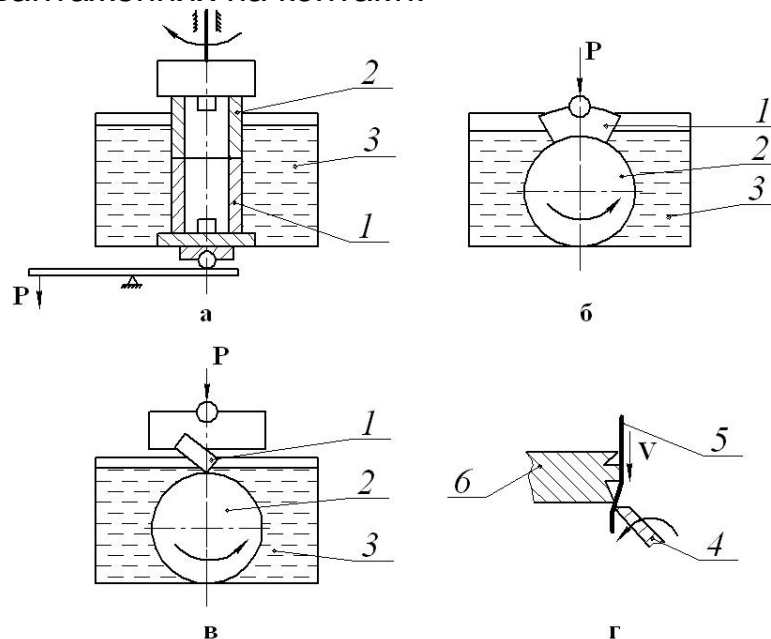


Рис. 14.12. Схеми випробувань на тертя і зношення: а) торцевого тертя; б) вал – укладка підшипника; в) вал – лезно ножа; г) лезо – обгортка – лезо; 1 – зразок;

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. 14.13. 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.

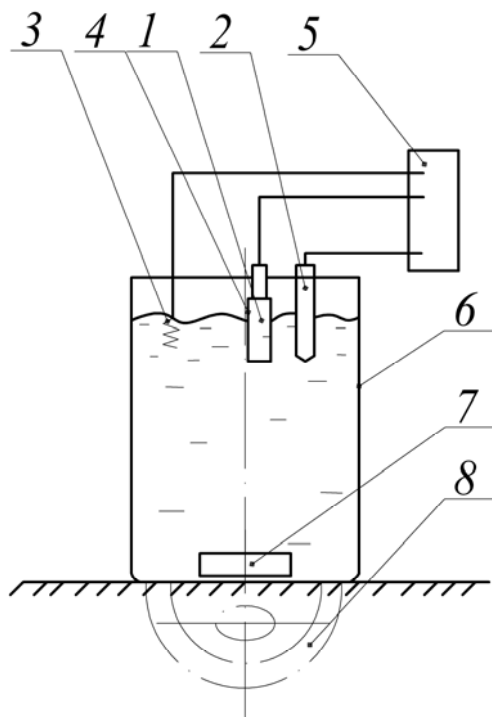


Рис. 14.13. Схема пристрою для вимірювання електродних потенціалів і отримання поляризаційних кривих: 1 – металічний зразок з покриттям (досліджуваний електрод); 2 – електрод порівняння; 3 – допоміжний електрод; 4 – шар захисного лаку; 5 – потенціостат; 6 – скляний стакан для середовища; 7,8 – магнітний 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.

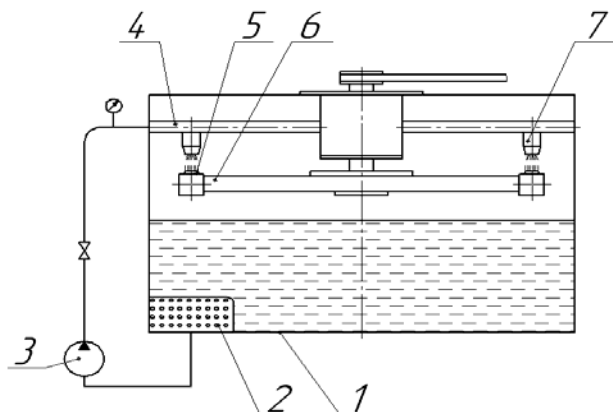
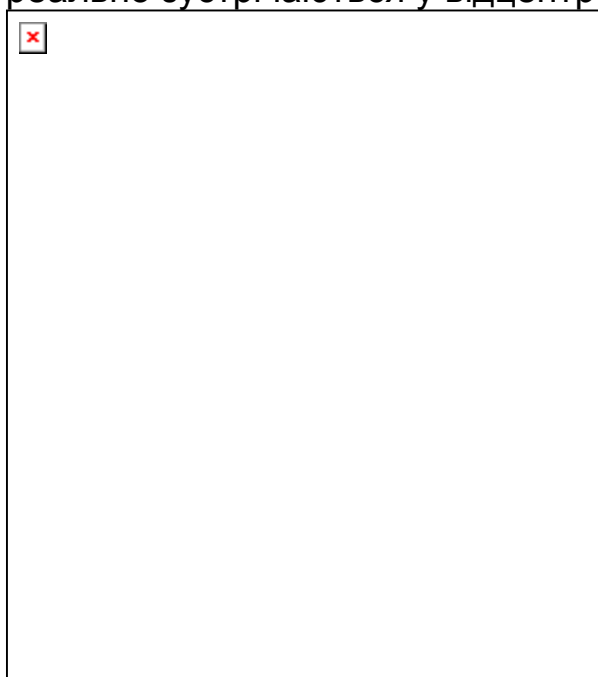


Рис. 14.14. Схема ударно-ерозійного стенда: 1 – герметична ємність, 2 – фільтр; 3 – відцентровий насос; 4 – струменерозподільник; 5 – зразок; 6 – ротор; 7 – сопло

На стендах з магнітострикційними вібраторами (МСВ) (рис. 14.15) 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. 14.16). 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.



а



б

Рис. 14.15. 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

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 визнають по втраті маси досліджуваних зразків за певний час випробувань.



Рис. 14.16. 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

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.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Який вид зношування деталей віднесений до допустимого?
2. Охарактеризуйте вплив газових середовищ на процеси тертя і зношування металів.
3. Як впливають кисень і вуглекислий газ на інтенсивність зношування металів?
4. Як впливають хімічно- і поверхнево-активні рідкі середовища на процес зношування деталей.
5. Який вид зношування називають корозійно-механічним і за яких умов воно проявляється?
6. Як впливає водневий показник технологічного середовища на інтенсивність зношування сталей?

7. Яка роль електродних потенціалів металів в процесі їх зношування?
8. Поясніть роль електродного потенціалу металу у виникненні явища схоплювання третьових поверхонь та інтенсифікації зношування.
9. Опишіть роль адсорбції поверхнево-активних речовин ПАР в реалізації ефекту П. Ребіндера.
10. Опишіть процес тріщино утворення на поверхнях тертя під дією ПАР.
11. Перелічіть технологічні середовища харчових виробництв у яких присутні ПАР.
12. Охарактеризуйте технологічні середовища бурякоцукрових виробництв і їх вплив на процеси спрацювання деталей обладнання.
13. Які особливості спрацювання деталей обладнання оліє жирових підприємств?
14. Чому м'ясопереробні машини швидко зношуються?
15. Як впливають склад і характеристики середовищ молокопереробних виробництв на інтенсивність спрацювання деталей обладнання?
16. Назвіть агресивні компоненти технологічних середовищ молокопереробних заводів.
17. Які агресивні чинники спричиняють інтенсивне зношування обладнання крохмально-патокових виробництв?
18. Як запобігти ерозійному і гідро абразивному зношуванню в середовищах галузі?
19. Охарактеризуйте вплив розчиненої у воді цукрози на гідроерозію металів.
20. Поясніть явище кавітаціо-ерозійного зношування обладнання в технологічних середовищах харчових і переробних виробництв.
21. Яка роль механічного і корозійного чинників в умовах кавітаціо-ерозійного зношування деталей технологічного обладнання?
22. Опишіть області застосування кавітації в технологічних процесах харчових виробництв.
23. Запропонуйте способи захисту харчового обладнання від кавітаційного зношування.
24. Охарактеризуйте методи прискореної оцінки зносостійкості металів в технологічних середовищах харчових і переробних виробництв.

[перейти до змісту](#)

15. Методи забезпечення довговічності і підвищення зносостійкості деталей машин і обладнання

15.1. Способи керування зносостійкістю деталей

Умови контактування деталей у вузлах тертя обладнання і чинники, які визначають їх зносостійкість і довговічність, схематично можна показати так, як на рис. 15.1. Тіло 1 і контртіло 2 зображають пару тертя, тіло 3 — зовнішнє середовище, або шар мастила. Наведені на рис. 15.1 комплекси параметрів визначають:

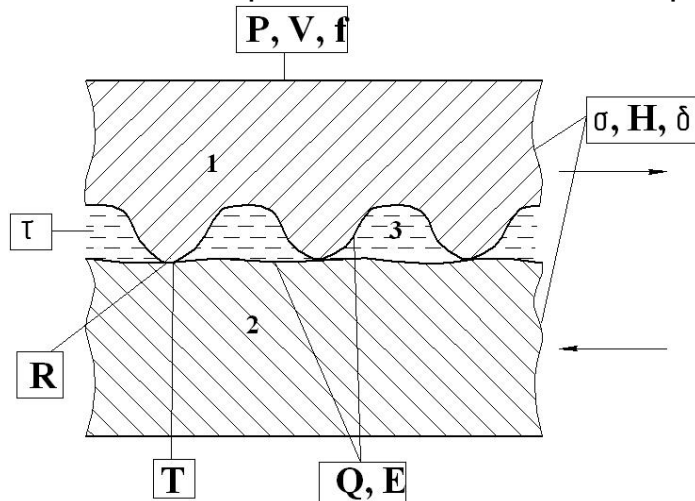


Рис. 15.1. Умовна схема вузла тертя і діючих чинників, які впливають на його зносостійкість

механічні властивості елементів пари тертя; R — характеристики шорсткості контактуючих поверхонь деталей; P, V, f — умови навантаження і вид тертя (ковзання або кочення); τ — реологічні властивості тіла 3 (шару мастила або середовища); Q, E — хімічну і поверхневу взаємодію (енергію активації) тіл 1 і 2 з зовнішнім середовищем 3; T — температуру. В залежності від наявності певних елементів контактної зони, їх

властивостей і параметрів взаємодії визначається вид тертя і зношування і напрямки боротьби з ним. Наприклад, при контакті тіл 1 і 2 без тіла 3 спостерігається випадок сухого тертя, а при відсутності одного з тіл 1 чи 2 можливий прояв кавітаційно-ерозійного зношування. За наявності інтенсивної хімічної взаємодії тіл 1 і 2 з тілом 3 найчастіше відбувається корозійно-механічне зношування.

Розмаїття явищ і факторів, які впливають на процеси тертя і зношування, вимагають системного підходу до вирішення проблеми довговічності деталей обладнання. Стосовно обладнання харчових виробництв, основними напрямками вирішення названої проблеми можуть бути: зменшення інтенсивності корозійної взаємодії поверхонь деталей тертя з технологічними середовищами; зміна умов і параметрів динамічного навантаження зони контакту, яка б забезпечила прояв тільки допустимих видів зношування; підвищення опору зношуванню деталей обладнання.

Реалізація названих напрямків може бути забезпечена конструктивними, технологічними та експлуатаційними заходами.

15.2. Конструктивне забезпечення довговічності вузлів обладнання

Конструктивна розробка деталей і вузлів обладнання для забезпечення довговічності і зносостійкості повинна проводитись з врахуванням:

- раціональної схеми роботи вузлів, їх конфігурації і розмірів;
- доцільного розрахунку і вибору кінематичних і силових параметрів навантаження елементів контактної взаємодії;
- раціонального вибору матеріалів для виготовлення деталей, які взаємодіють з технологічними середовищами;
- вибору ефективних видів мастил і системи мащення вузлів, а також захисту їх від попадання технологічних середовищ і абразивних часток;
- необхідності забезпечення ефективної системи відведення тепла від поверхонь тертя;
- забезпечення технологічності і ремонтпридатності вузлів обладнання.

Питання раціонального вибору матеріалів розглянуті далі, а нижче наведені приклади конструктивного вдосконалення деяких вузлів обладнання харчових виробництв з метою підвищення їх працездатності і довговічності.

15.2.1. Модернізація вузлів пакувальних автоматів кондитерського виробництва

У високопродуктивних загортувальних машинах пакувальних автоматів, які експлуатуються в харчовій, переробній, фармацевтичній, мікробіологічній та інших галузях промисловості застосовуються, наприклад, паперорізальні вузли з одним обертовим, а другим нерухомим ножами.

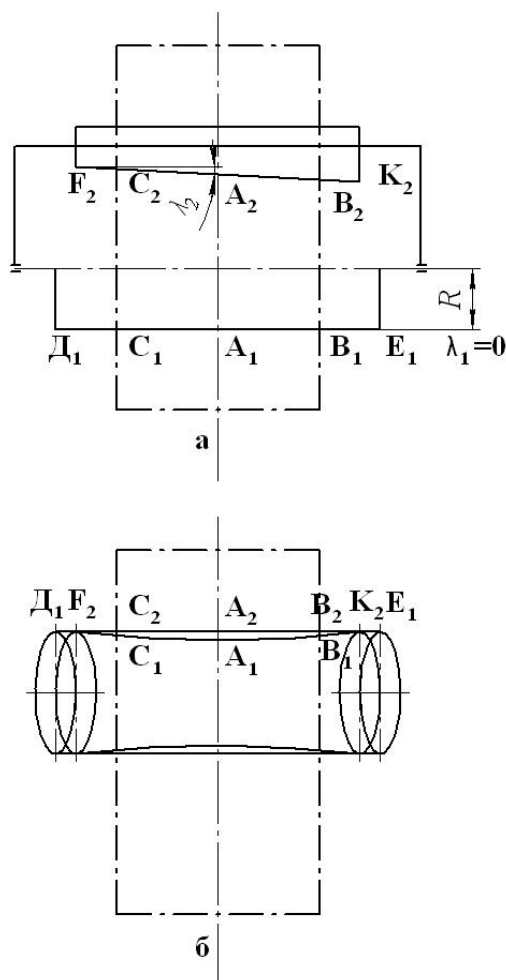


Рис. 15.2. Схема розташування ріжучих лез ножів в статичному (а) і динамічному (б) станах в паперорізальному вузлі циліндрично-гіперболічного типу

Паперорізальні пристрої мають недостатню надійність і довговічність внаслідок низької зносостійкості ножів, що є однією з основних причин частих зупинок загортувальних автоматів, зниження їх продуктивності і збільшення випуску бракованої продукції.

Проведені дослідження показали, що головним недоліком паперорізальних вузлів, які виробляються на вітчизняних підприємствах, а також тих, які імпортуються, є використання переважно нераціональної циліндрично-гіперболічної схеми різання.

За цією схемою (рис. 15.2) лезо рухомого ножа описує при обертанні у просторі циліндричну поверхню, тому що кут нахилу леза до горизонтальної площини $\lambda_1 = 0$, а лезо нерухомого ножа, при інверсії обертання, списує поверхню гіперболоїда обертання, тому що кут його нахилу до горизонтальної площини $\lambda_2 \neq 0$. Ці дві поверхні неможливо сумістити і паперорізальний вузол неможливо налагодити для роботи без обламування ріжучих лез ножів, що зменшує їх довговічність.

Більш перспективною є гіперболічна симетрична схема різання. Загальний вигляд розробленого авторами паперорізального вузла з гіперболічною симетричною схемою різання приведений на рис. 15.3, а його конструкція і схема різання на рис. 15.4. В прямокутні пази (рис. 15.4,а) корпусу 1 встановлена планка 2, до якої гвинтами 11

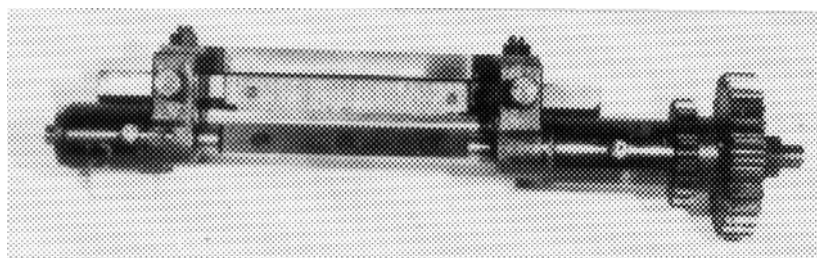


Рис. 15.3. Загальний вигляд паперорізального вузла автомата ІЗМ

прикріплений двохлезовий нерухомий ніж 12. Його різальне лезо нахилене до горизонтальної площини під кутом λ_2 за рахунок виготовлення похилої площини на планці. З одного

боку на планку діють регульовальні гвинти 10, а з другого — пружини 15, які розміщені в кришках 14, прикріплених до корпусу гвинтами 16. Сумарне зусилля пружин складає 150...200 Н, що оберігає ножі від перевантаження. Гвинти 17 не дають планці зміщуватись вбік. Поворотний ніж 8, закріплений на валу 3 гвинтами 9, нахилений під кутом λ_1 до вісі вала. Кути нахилу ріжучих лез до горизонтальної площини $\lambda_1 = \lambda_2$. В налагодженому вузлі ріжучі леза обертового ножа і нерухомого ножа (при інверсії обертання) описують поверхні гіперболоїдів обертання, які зливаються. Розміщення вала без нахилу у вертикальній площині, де встановлено ріжуче лезо нерухомого ножа, покращує роботу зчеплення шестерень 5 і 7. Розроблена конструкція при кутах $\lambda_1 = \lambda_2 = 25 - 35$ хвилин забезпечила збільшення стійкості ножів зі сталі ХВГ вдвічі.

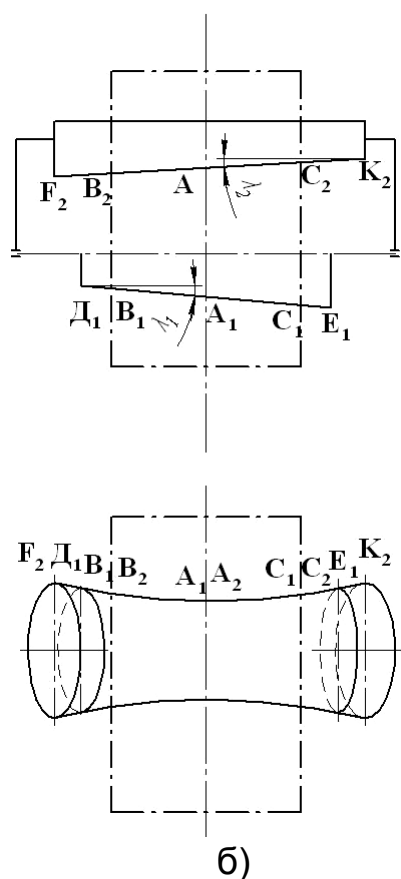
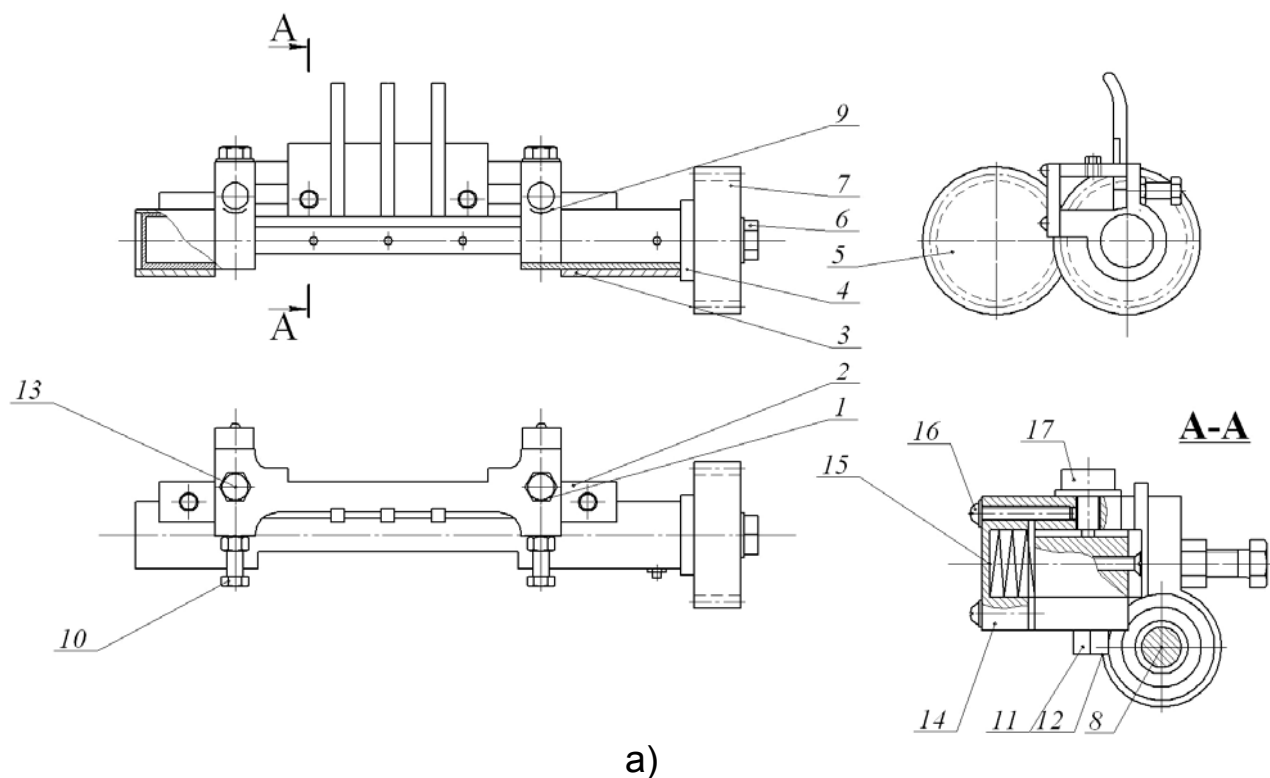


Рис. 15.4. Паперорізальний вузол цукеркозагортувальної машини ІЗМ – 1 з гіперболічною симетричною схемою різання (а) та схема розташування ріжучих лез (б): 1 – корпус; 2 – планка; 3 – вал; 4 – втулка; 5 – шестерня; 6,9,10,11,13,16 – гвинти; 7 – шестерня; 8 – поворотний ніж; 12 – нерухомий ніж; 14 – кришка; 15 – пружина

Дослідження роботи модернізованого вузла показали, що по мірі зношування ножів їх наближають один до одного за рахунок переміщення планки з нерухомим ножем в горизонтальній площині, що супроводжується спотворенням геометрії гіперболічної симетричної схеми різання і зміною місця контакту різальних лез. Це обумовлює їх повторне припрацювання, стрибкоподібне зростання фаски зносу і

радіусу заокруглення леза ножів та їх швидкий вихід з ладу. Ця проблема вирішена авторами за рахунок зміни конструкції паперорізального вузла.

Корпус вдосконаленого вузла 1 має прямокутні отвори (рис. 15.5,а,б), в яких розміщена клиноподібна планка 2 з нерухомим ножем 3, вал 4 з рухомим ножем 5 і регулювальні гвинти 6.

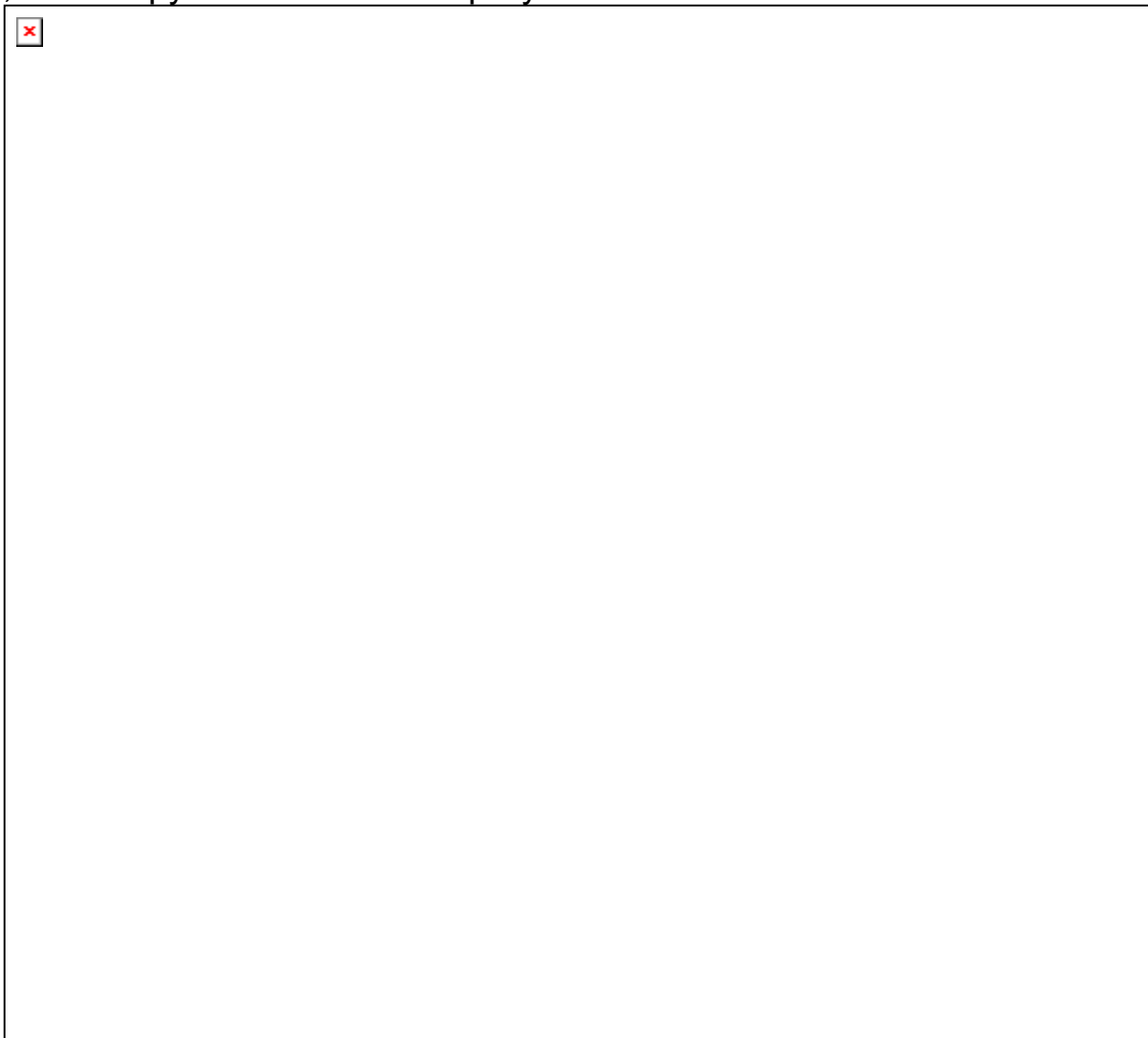


Рис. 15.5. Раціональна конструкція паперорізального вузла: а - загальний вигляд; б – поперечний переріз; в – схема контактування ножів: 1 – корпус; 2 – планка; 3 – нерухомий ніж; 4 – вал; 5 – рухомий ніж; 6 - фіксатор; 7 – пружина; 8 – напрямна гребінка

Планка з нерухомим ножем встановлена в корпусі похило по лінії (рис. 15.5,в), яка перпендикулярна до дотичної. Планка має отвори, в які встановлені спіральні пружини 7. Вона прикріплена до корпусу гвинтами. На ній розміщена напрямна гребінка 8, по якій ковзає обгортувальний папір. Таке розміщення планки з нерухомим ножем максимально зменшує зношування ножів, тому що місце приробки при регулюванні розташування лез ножів залишається незмінним.

Крім того, нерухомий ніж в новому вузлі (рис. 15.6) має чотири різальних леза, а нерухомий — два, що збільшує їх довговічність, порівняно з серійними вузлами, вдвічі.

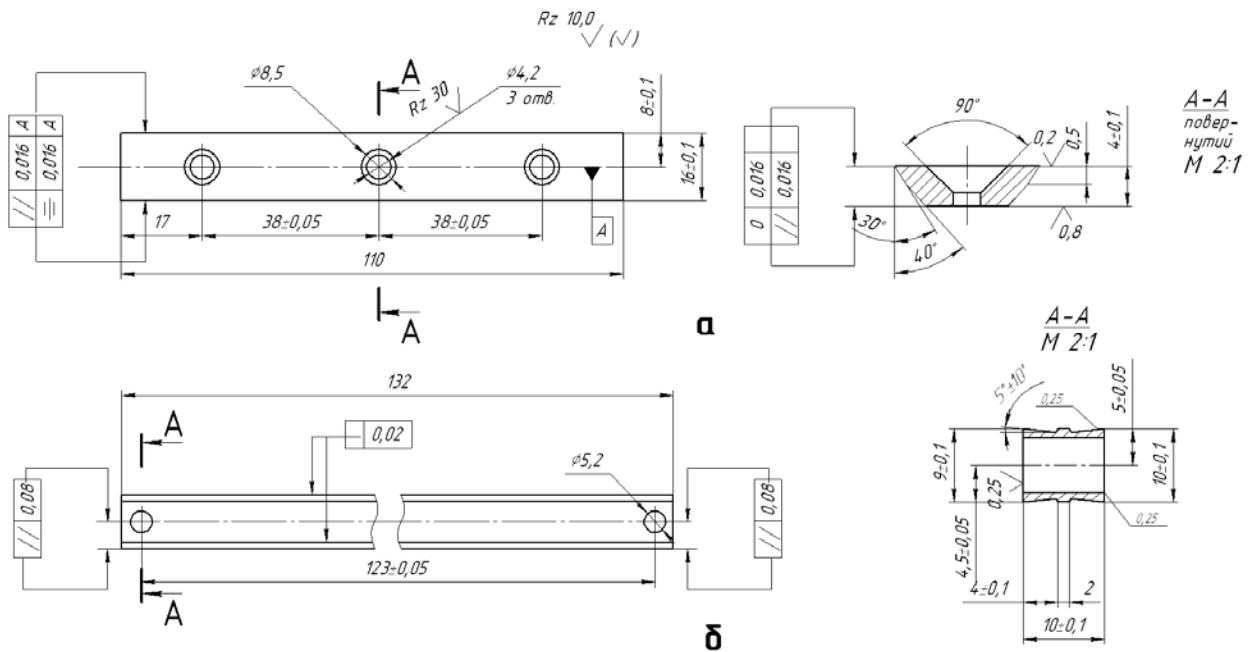


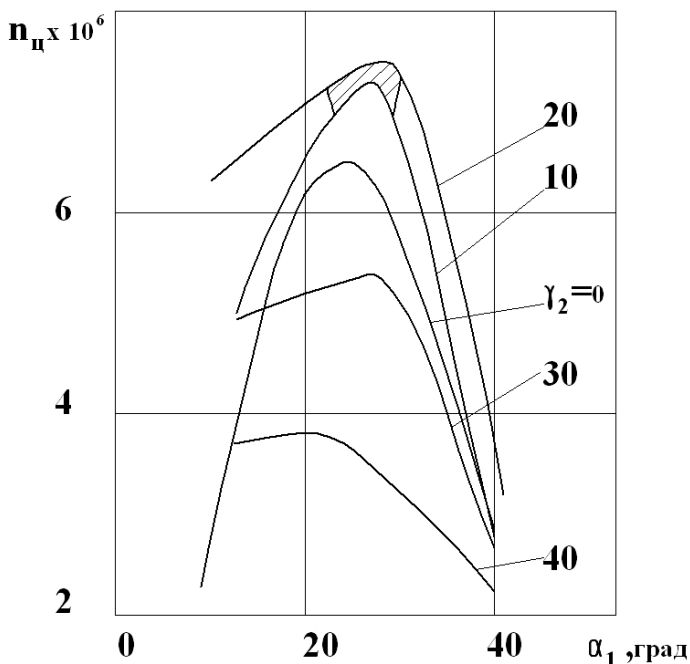
Рис. 15.6. Конструкція рухомого (а) та нерухомого (б) ножів для загортувальних автоматів типу ІЗМ

Таким чином, завдяки використанню нової схеми різання і застосуванню раціональної конструкції ножів, довговічність паперорізальних ножів зросла майже в 5 разів. Модернізація паперорізальних вузлів згідно виконаних розробок на кондитерських фабриках ефективна і не потребує значних матеріальних витрат.

При виготовленні паперорізальних ножів для вузлів загортувальних автоматів важливо правильно забезпечити загострення ріжучих лез, що є основною умовою їх довговічності.

Для визначення впливу геометричних параметрів ножів на їх стійкість були проведені випробування ножів із різних сталей (нерухомі з передніми кутами 0, 10, 20, 30, 40°, а рухомі з аналогічними кутами).

Стойкість ножів із сталі 9ХС в серійних паперорізальних вузлах



цукеркозагортувальних автоматів ІЗМ-І з гіперболічною симетричною схемою різання може змінюватись від 2 до 7,7 млн. циклів, в залежності від співвідношення геометричних параметрів рухомого і нерухомого ножів (рис. 15.7).

Рис. 15.7. Залежність стійкості рухомих ножів зі сталі 9ХС від заднього кута α_1 при різних значеннях переднього кута загострення нерухомого ножа γ_2

Найбільшу стійкість мають рухомі ножі з заднім кутом $\alpha_1=22..32^\circ$ при роботі в парі з нерухомими з переднім кутом $\gamma_2= 10...20^\circ$.

Встановлено також, що вплив геометричних параметрів залежить від матеріалу ножів (рис. 15.8.). Для ножів із сталі ХВГ максимальна зносостійкість постерігається при $\alpha_1 = 20^\circ$, із сталі 55Х6В3СМФ — $\alpha_1 = 30^\circ$, а із сталі Р6М5 — $\alpha_1 = 37,5^\circ$.

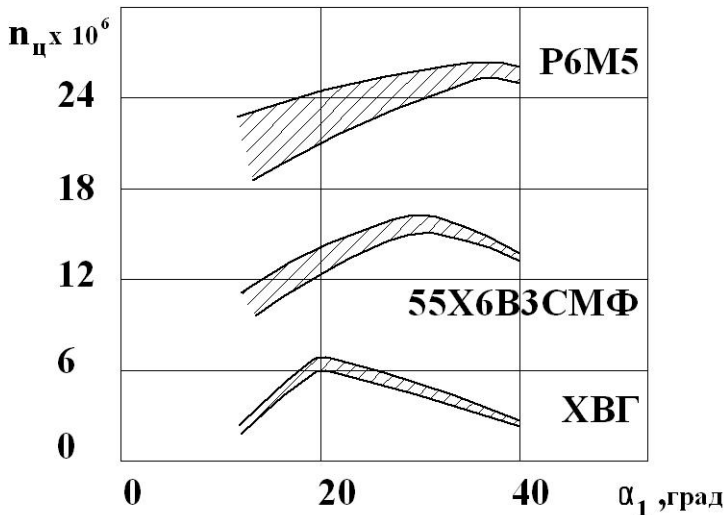


Рис. 15.8. Результати випробувань стійкості рухомих ножів з інструментальних сталей різних марок при зміні заднього кута різального леза

Випробування розроблених в НУХТ паперорізальних вузлів та ножів на кондитерських фабриках України і Росії

довели, що їх довговічність можна збільшити до 10 разів завдяки використанню раціональних конструкцій вузлів і ножів, а також за умови дотримання технології їх виготовлення і правил експлуатації.

15.2.2. Збільшення довговічності ножів м'ясорізальних вовчків

Одним з головних показників ножів м'ясорізальних вовчків (рис. 15.9), що визначають їх працездатність, є радіус заокруглення різального леза ρ . Від його величини залежить якість продукту — вологомісткість м'ясного фаршу (рис. 15.10). Дослідження показали, що радіус заокруглення різального леза ножа значною мірою визначається переднім кутом ножа γ (рис. 15.11). Зі збільшенням переднього кута зменшується величина спрацювання ножа, радіус заокруглення його різального леза і покращується якість продукту.

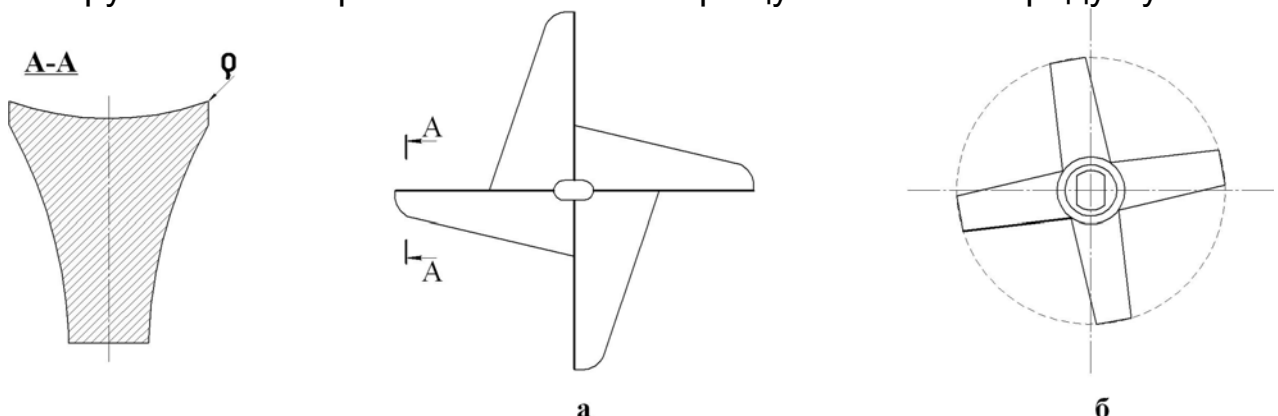


Рис. 15.9. Ніж м'ясорізального вовчка: а – серійний; б – із зміщеним різальними лезом

Недоліком серійних м'ясорізальних ножів є те, що різальне лезо ножа співпадає з радіальним напрямком (рис. 15.9,а) і процес різання

м'ясопродуктів наближається до процесу рубання. Внаслідок цього відбувається інтенсивне зношування і спрацювання різального леза та погіршується якість фаршу.

В НУХТ розроблена конструкція ножа вовчка зі зміщеним різальним лезом (рис. 15.9,б). При розміщенні леза по дотичній до кола діаметром D з'являється повздовжня (відносно леза ножа) складова зусилля різання, що забезпечує поступове розрізання сировини і покращує якість продукту.

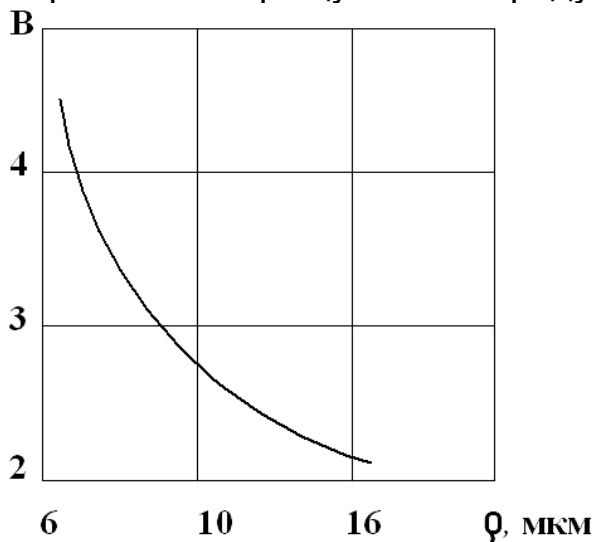


Рис. 15.10. Залежність відносної вологомості фаршу В від радіуса заокруглення різального леза ножа ρ

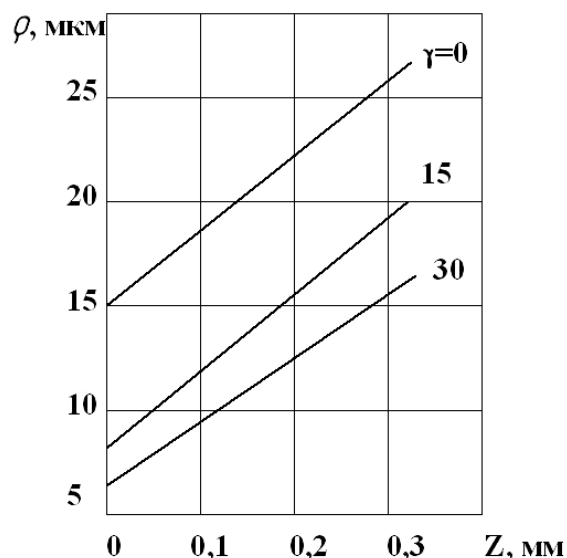


Рис. 15.11. Залежність радіуса заокруглення різального леза ρ від величини спрацювання Z і переднього кута ножа γ

Запропоновані конструкції ножів з передніми кутами $\gamma > 0^\circ$ не потребують суттєвої перебудови технологічного процесу їх виготовлення і забезпечують значне (на 50...100%) підвищення довговічності.

Надійність і довговічність м'ясорізальних вовчків переважно залежить від зносостійкості деталей різального комплексу (ножів і решіток). Відмови цих деталей обумовлені їх спрацюванням при терті зі змащуванням специфічним середовищем (фаршем і м'ясним соком). За даними виробничих спостережень, лінійне спрацювання серійних ножів вовчків до відмови становить близько 0,2...0,3 мм. При переточуванні знімається шар завтовшки 0,5...0,7 мм. За таких умов довговічність ножів дорівнює 7...15 робочих змін. Традиційні методи підвищення зносостійкості шляхом вибору зносостійких матеріалів і покриттів ґрунтовно досліджені і їх можливості обмежені. Проблема подальшого підвищення зносостійкості деталей різального комплексу може бути вирішена за умови використання нових конструктивних рішень і технологій. Зокрема, враховуючи, що в перероблювальному середовищі містяться різноманітні хімічно- і поверхнево-активні сполуки, ефективним може бути використання ефекту вибіркового

переносу. Вибірковий перенос забезпечує зменшення інтенсивності зношування певних пар тертя у присутності мастил і поверхнево-активних речовин. При наявності в зоні тертя міді на поверхні сталевих деталей утворюються збагачені міддю шари, деформація яких під дією зсувних напружень відбувається без зміцнення і розвитку втомлювальних тріщин. Але суттєве зменшення інтенсивності зношування і коефіцієнту тертя внаслідок прояву ефекту вибіркового переносу можливе лише за певних умов роботи вузлів тертя для конкретних матеріалів.

С.Некозом були проведені триботехнічні дослідження матеріалів в умовах, які відповідають параметрам навантаження деталей різального комплексу вовчків. Досліди проводились на спеціальній установці на базі вертикально-свердлильного верстата, яка моделює роботу пари ніж-решітка вовчка. Досліджувані зразки виготовляли із сталей 65Г і У8, які широко використовуються для виготовлення ножів і решіток. Зразок, який обертається, був виготовлений у вигляді складаного ножа вовчка з робочими пластинами із сталі 65Г (56HRC) товщиною 5мм, за якими закріплювали різної товщини вставки з бронзи БрАЖ 9-4. Бронза БрАЖ 9-4 була вибрана тому, що вона, згідно санітарно-гігієнічних вимог, допущена до використання в машинах і агрегатах харчової промисловості при контактуванні з м'ясом. За нерухомий зразок була використана серійна решітка вовчка (сталь У7, 60HRC_e) з отворами діаметром 3 мм. Досліди проводили в середовищі м'ясного соку, питоме навантаження 4,0 МПа, колова швидкість 1,4 м/с, що відповідає умовам роботи різального комплексу. Лінійне спрацювання зразків оцінювали за замірами зміни ширини пластини методом штучних баз за час дослідів (2 години).

Як показали проведені досліді, спрацювання рухомого зразка і коефіцієнт тертя залежать від співвідношення товщин сталеві і бронзові пластин (табл.15.1). Найменше спрацювання відбувалося при $\varphi=0,6$, а мінімум коефіцієнта тертя спостерігався при $\varphi=0,8$.

Для перевірки прояву ефекту вибіркового переносу і результатів триботехнічних досліджень були проведені досліді у виробничих умовах на м'ясорізальних вовчках. На спеціально сконструйованих ножах вовчків установлювались різальні пластини зі сталі 65Г (55HRC_e) товщиною 4,5 мм, за якими закріплювались бронзові пластини завтовшки 3,5 мм ($\varphi=0,77$).

Таблиця 15.1

Залежність спрацювання зразків зі сталі 65Г(Н) і коефіцієнта тертя (f) від співвідношення товщин бронзові і сталеві пластин (φ)

φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
H, МКМ	18	13	9	6	10	15	25	28	30
f	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,06	0,08	0,09	0,10

Випробування, під час яких проводили заміри лінійного спрацювання ножів по ширині різальних пластин, здійснювали при переробці яловичини I і II категорії. Температура вихідної сировини становила 2...4 °С. До складу різального комплексу вовчка, крім двох експериментальних ножів, входили серійні вхідна, проміжна і вихідна решітки. Діаметр отворів вихідної решітки дорівнював 3 мм. Для порівняння випробовувались також складані ножі без бронзових пластин.

Характер зношування різальних елементів ножів при використанні бронзових пластин не змінювався, найбільш інтенсивне спрацювання спостерігалось на периферії ножа. Як показали дослідження (табл.15.2), встановлення бронзових пластин завдяки прояву ефекту вибіркового переносу забезпечує понад двохразове підвищення напрацювання вовчків до допустимого зношування ножів (0,2...0,25 мм).

Таблиця 15.2

Залежність зношування ножів (Н)
від об'єму переробленої яловичини (Q)

Q, м ³	Зношування ножів Н, мм			
	Серійні ножі		Експериментальні ножі	
	на периферії леза	на середині леза	на периферії леза	на середині леза
6	0,12	0,06	0,06	0,02
12	0,17	0,09	0,09	0,03
18	0,21	0,16	0,13	0,06
24	0,23	0,18	0,15	0,09
30	-	-	0,17	0,12
36	-	-	0,19	0,14

Таким чином, проведені на кафедрі матеріалознавства і технології машинобудування НУХТ дослідження показали реальні перспективи суттєвого підвищення довговічності деталей різального комплексу м'ясорізальних вовчків шляхом використання ефекту вибіркового переносу.

15.2.3. Підвищення довговічності і надійності відцентрових електронасосів

На підприємствах харчової промисловості поширене застосування відцентрових насосів для перекачування технологічних продуктів, гарячої і холодної води, мийних розчинів тощо. Аналіз роботи цих насосів показав, що через декілька місяців роботи доводиться замінювати або ремонтувати робочі колеса через виникнення тріщин на диску колеса та лопатях (рис. 15.12). Причиною їх утворення є інтенсивна кавітаційна дія рідини, а також явища втоми внаслідок вібрації колеса і високий рівень внутрішніх напружень на його периферії, що виникають при штампуванні лопатей.

Матеріал периферійних ділянок колеса за лопатями знаходиться в складному напруженому стані. Під дією відцентрових сил виникають

розтягувальні напруги, величина яких становить понад 2 МПа. Робочі колеса серійних насосів виготовляють листовим штампуванням, використовуючи для утворення лопатів операцію надрізування. Виникаючі в місцях надрізування напруження досягають 20 – 40% межі міцності матеріалу. В умовах дії розтягувальних напружень і кавітації в корозійних технологічних рідинах інтенсивність кавітаційного зношування зростає на 60-70%.

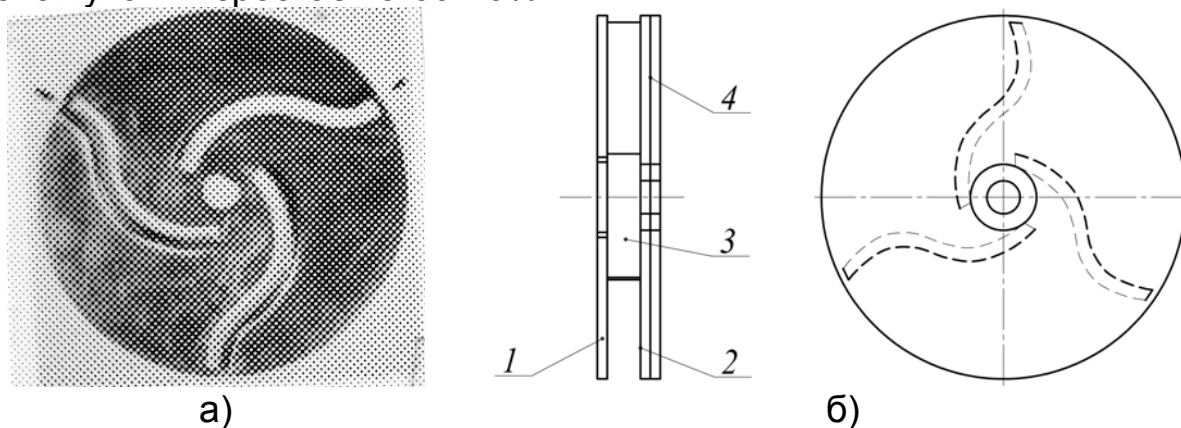


Рис. 15.12. Загальний вигляд (а) і конструкція (б) серійного робочого колеса насоса 36-1Ц 2,8-20: 1 – передній диск; 2 – основний диск; 3 – лопаті; 4 – задній диск (стрілками вказані місця розташування тріщин на основному диску колеса)

Аналіз геометричних параметрів робочого колеса дозволив знайти шляхи підвищення ефективності роботи насоса і його довговічності завдяки вдосконаленню конструкції.

В серійному робочому колесі є три радіальних лопаті (рис. 15.12). Водночас відомо, що насоси з загнутими назад лопатями забезпечують більший коефіцієнт корисної дії. На підставі виконаного аналізу і розрахунку О.Некозом (НУХТ) була запропонована нова конструкція робочого колеса, яка дозволяє зменшити витрати дефіцитної високолегованої сталі, підвищити довговічність і ефективність роботи насосів.

Робоче колесо серійного насоса складається з переднього диска 1 (рис.15.12,б), основного диска 2 з лопатями 3 і заднього диска 4. В запропонованій конструкції відпадає необхідність використання заднього диска, основний диск суцільний, а до нього точковим зварюванням приварено лопаті з кутом на виході 30° (рис. 15.13).

Зміна геометричних параметрів, кількості лопатей і конструкції колеса забезпечили покращення його характеристик (рис. 15.14) і усунула тріщини та кавітаційне руйнування.

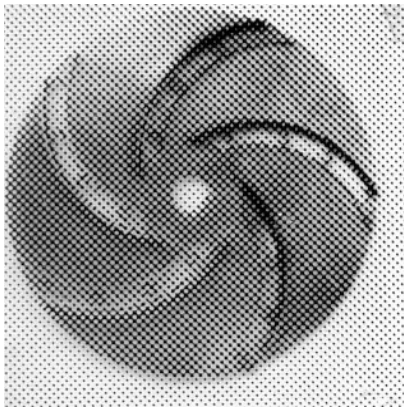


Рис. 15.13. Загальний вигляд диска нового робочого колеса

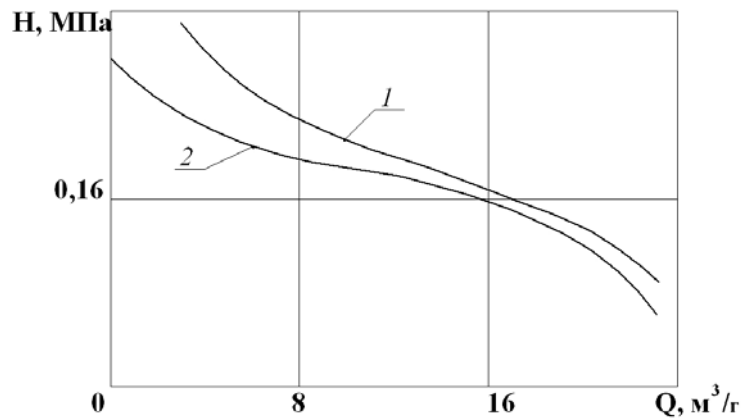


Рис. 15.14. Залежність напору H від продуктивності Q насоса з новим (1) і серійним (2) робочими колесами

Наведені приклади показують, що напрями підвищення довговічності і надійності обладнання шляхом конструктивного вдосконалення є одними з найбільш ефективних, але практична їх реалізація в обладнанні, яке вже випускається і експлуатується, ускладнена, а інколи неможлива.

15.2.4. Обґрунтоване конструювання – запорука підвищення працездатності обладнання галузі

Важливим резервом підвищення довговічності і працездатності обладнання є органічне поєднання його раціонального конструювання з цілеспрямованим вибором матеріалів, найбільш точно відповідаючим конкретним умовам експлуатації.

При конструюванні та виготовленні вузлів обладнання безпосередньо на харчових підприємствах, а також на спеціалізованих машинобудівних заводах, часто не приймаються до уваги конфігурація окремих вузлів і деталей, раціональність поєднання контактуючих матеріалів, шорсткість оброблених поверхонь та інші особливості деталей обладнання, що призводить до накопичення на них осадів, незручності мийки, підсилення корозії. Попередження корозійних руйнувань зводиться, в основному, до вибору матеріалів та покриттів, стійких до конкретного агресивного середовища. Таке конструювання часто призводить до передчасного виходу з ладу обладнання і комунікацій, порушення ходу технологічних процесів та санітарних вимог.

На підприємствах харчової промисловості зустрічаються наступні характерні конструктивні похибки, які зменшують довговічність та викликають підвищене кородування металів: наявність в обладнанні важкодоступних щілин і зазорів, які заповнюються залишками агресивних середовищ; застійних зон в апаратах, упорних ділянок продуктопроводів, які не мають ухилів для зливу надлишків продукту; груба обробка металевих поверхонь, яка створює умови для накопичення забруднень, пилу, осадів; застосування профільних форм спряження поверхонь замість округлих; виготовлення прямокутних та

пірамідальних ємностей замість циліндрично – конічних; використання поєднань різнорідних металів, які розташовані далеко один від одного в електрохімічному ряду напруг; нерівномірне розподілення температурних навантажень, яке викликає значне місцеве перегрівання окремих частин апаратів.

Найбільш простим конструктивним способом забезпечення розрахункового терміну строку служби обладнання, яке контактує з агресивними середовищами, є призначення припуску на корозію за товщиною стінок його деталей. Зазвичай, при рівномірному корозійному руйнуванні апарата, припуск дорівнює запланованому строку служби, помноженому на швидкість корозії. Але при такому методі призначення припусків на корозію необхідно мати експериментальні дані про відсутність в апараті, який проектується, локальних руйнувань (піттингів, корозійного розтріскування, міжкристалітної корозії та ін.). Цей метод використовують заводи - виробники обладнання, збільшуючи металоємність конструкцій. Наприклад, у вітчизняних теплообмінниках та комунікаціях використовують труби завеликої товщини, що не обумовлено ні міцністю, ні корозійними вимогами.

Раціональне ж конструювання дозволяє: попередити утворення щільових зазорів в тих апаратах, де можливе підвищення концентрацій агресивних середовищ та виникнення корозії під напруженням (наприклад, каустичної крихкості при високій концентрації лугу); усунути концентратори напружень (виступи, гострі грані), які можуть викликати локальне корозійне розтріскування; зменшити корозійно - ерозійне зношування за рахунок зниження турбулентності потоку та кількості зважених абразивних частинок в середовищі, завдяки відповідному підбору перехідних діаметрів комунікацій та швидкостей потоків, облицьовуванню ерозійно-стійкими матеріалами ділянок, які інтенсивно руйнуються; запобігти корозії введенням у конструкцію роз'єднувальних деталей – ізоляторів, електроізоляційних прокладок, або за рахунок нанесення пасивуючих (наприклад, цинкхроматних) ґрунтів.

Раціональний вибір технологічних процесів зварювання, відливання, обробки металів тиском, механічної обробки поверхонь деталей також суттєво підвищує стійкість обладнання до дії руйнівних чинників.

Відомо, що висока корозійна стійкість нержавіючих сталей обумовлена наявністю самовідновлюваної плівки оксидів, товщиною близько 10^{-3} мкм. Цей пасивний шар може пошкоджуватися при недбалому зберіганні, транспортуванні, неправильному проведенні санітарної обробки обладнання. Причому, захисний ефект може не тільки знизитись, але й зовсім зникнути. При неправильній термообробці нержавіючої сталі на межі поділу зерен металу виділяються карбіди хрому і вона може руйнуватись внаслідок

міжкристалітної корозії, а її механічні властивості відразу погіршуються.

Для теплообмінників трубні решітки невеликих діаметрів, фіттинги, фланці доцільно виготовляти штамповкою з наступним відпалюванням (для усунення деформацій), а інші елементи – з прокату. Відпалюванням зварних швів, хімічним або електролітичним травленням знімають напруження та видаляють тонкі напружені прошарки після механічної обробки, попереджуючи корозійне розтріскування металевих поверхонь.

Харчові підприємства України, набувши досвіду раціональної експлуатації обладнання, застосовують найрізноманітніші способи його конструктивного вдосконалення. Наведемо декілька прикладів.

Типовий розвантажувальний пристрій солодосушарки ЛСХА – 10, який виготовлений у вигляді шлюзового затвору, створює великі забруднення при експлуатації. Ущільнення з прогумованого паса швидко зношуються, розриваються та потребують заміни. Кутники кріплення ременів, які розташовані по периметру розвантажувального пристрою, внаслідок значних навантажень та тертя солоду, руйнуються і механізм розвантаження заклинюється, що викликає порушення технології висушування солоду. На Дніпропетровському пивоварному заводі впроваджена більш раціональна конструкція розвантажувального пристрою (рис. 15.15.). З труб діаметром 325 мм зі стінками, завтовшки 9 мм, виготовлений барабан із заглушеними торцями, до якого приварені напіввісі, що забезпечують вільне його обертання. На поверхню барабана з діаметрально протилежних сторін приварені половинки з труб, діаметром 60 мм, які створюють своєрідні гаманці 2. Барабан встановлений зі зміщенням на 100 мм відносно вісі шахти у напрямку розвантаження.

У верхній частині, над барабаном, змонтовані ущільнюючі затвори 1 з прогумованого паса. Зі сторони, протилежної навантаженню, розташований поворотний фартук 3 з металу, який прилягає до барабана. Нахилиючи фартук, можна регулювати швидкість вивантаження солоду. Він також може використовуватись для екстреного розвантаження солоду з шахти солодосушарки. Застосування такої конструкції дозволило повністю усунути простої вузла завантаження, забезпечити ритмічну роботу солодосушарки, стабільність технологічного режиму висушування, покращити якість солоду та збільшити ресурс солодосушарки.

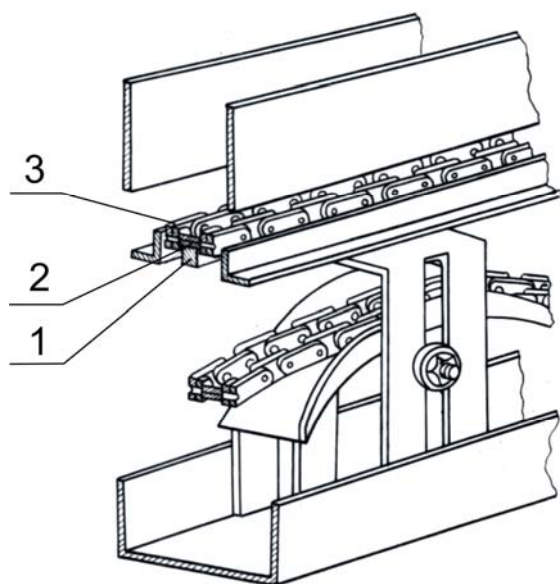
У солодовому цеху Дніпропетровського пивоварного заводу для зменшення кількості відмов в солодоростильних ящиках алюмінієві сита з продовгуватими отворами замінені на щілиновидні колосовидні сита з нержавіючої сталі. Такі сита самоочищаються, мають великий вільний переріз для проходження кондиціонованого повітря, не деформуються від механічних навантажень, мають достатню корозійну стійкість та довговічність. Застосування корозійностійких сит з

хромонікелевої сталі з живим перерізом 10% (6% у серійних) знижує тривалість фільтрації пивного сусла.



Рис. 15.15. Модернізований розвантажувальний пристрій солодосушарки ЛСХА-10

Пластинчасті ланцюги пляшкових транспортерів, які серійно випускаються промисловістю, мають значну площу контакту рухомих і нерухомих поверхонь, між якими виникає тертя, внаслідок чого каркас транспортера та пластини ланцюгів інтенсивно зношуються. Зношені частини каркасу замінюють повністю, або наварюють на них металеві полоси. В результаті знижується продуктивність ліній розливу, збільшуються прості обладнання та непродуктивні втрати продуктів



за рахунок інтенсивного розбивання пляшок. Крім цього, зношуються та розтягуються самі ланцюги, що також викликає часті перебої в роботі розливочно – закупорювальних блоків, погіршення якості напоїв. На багатьох заводах пляшкові транспортери модернізують з заміною пластинчастих ланцюгів на безпластинчасті втулочні з кроком опорних втулок 25,4 мм.

Несучою поверхнею ланцюга (рис. 15.16) є сталевий квадрат 14x14 мм - 1, змонтований по всій довжині транспортера.

Рис. 15.16. Модернізований ланцюговий пляшковий транспортер

З квадратом контактують тільки ролики 2 ланцюга 3, що набагато зменшує площу взаємодії поверхонь тертя. Пляшки співдотикаються днищами тільки з поверхнею втулково – роликового ланцюга і вільно переміщаються по транспортеру. Впровадження безпластинчастих транспортерів виключило інтенсивне корозійно – механічне зношування металевих деталей, знизило експлуатаційні витрати, втрати продукції та склотари, простої ліній розливу, збільшило міжремонтний період. При експлуатації пляшкомиїх машин часто відхиляється несуча планка столу завантаження завдяки різниці сил тертя привідних ланцюгів по напрямним та нерівномірному зносу зірочок. Підприємством – виробником не передбачене усунення таких несправностей безпосередньо з робочого місця оператора. На Дніпропетровському пиво – безалкогольному комбінаті на робочому місці оператора встановили штурвал, який з'єднаний з ведучим валом через конічну передачу, що дозволяє усувати перекося планки завантаження без зупинки пляшкомиїх машини.

Впровадження в пивоварне виробництво циліндро - конічних апаратів великої місткості на 15-20% знизило питомі капітальні вкладення, ліквідувало важку працю працівників в умовах знижених температур, підвищило ефективність процесів зброджування та доброджування, забезпечило випуск продукції високої якості. При модернізації циліндро – конічних танків (ЦКТ) у виробництві хлібного квасу у ВАТ „Росинка” (для інтенсифікації процесу зброджування) замість циркуляційної мішалки встановили спеціальний суперкавітаційний низьконапірний осьовий насос. Перевагою суперкавітації є те, що колапс каверн здійснюється в потоці рідини, який розташований на деякій відстані від робочих коліс насосів, що захищає їх від кавітаційних руйнувань. На режимах суперкавітації відсутня ерозія крильчаток. Кавітаційна обробка квасного сусла знизила час зброджування на 1,5-2 год (на 15-20%), що збільшило продуктивність ЦКТ.

Проблема підвищення надійності та захисту від корозії конденсаційно – холодильного обладнання від дії охолоджуючого середовища може бути частково вирішена завдяки застосуванню повітряного охолодження. В якості теплопередаючих елементів апаратів повітряного охолодження використовуються поребрени труби з алюмінію АД-1 або сплаву АМг2, які не потребують захисту від корозії при обдуванні атмосферним повітрям.

На Євдаківському оліє-жировому комбінаті модернізована конструкція ущільнюючих кілець сепараторів (рис. 15.17). Замість раніше використовуваних графітових кілець запропонована конструкція комбінованого кільця з нержавіючої сталі та графітової вставки. Частини комбінованого кільця з'єднуються на різьбі таким чином, щоб при роботі відбувалося їх самозатискання. Впровадження

такої конструкції суттєво підвищило надійність ущільнюючих кілець сепараторів.

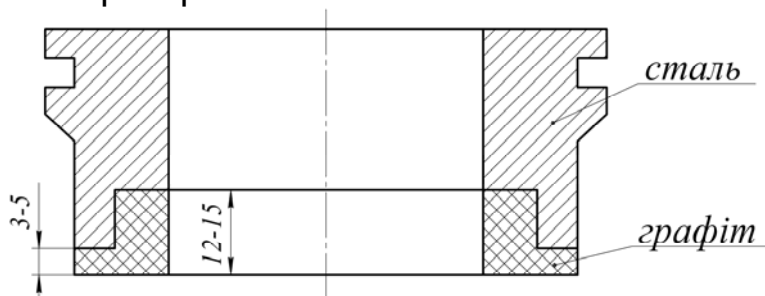


Рис. 15.17. Комбіноване ущільнююче кільце сепаратора

На багатьох цукрових заводах країни з'єднувальні муфти між електродвигунами та приводами обладнання замінили еластичними конструкціями (рис. 15.18), які складаються з пластини 40×120 мм з прогумованого паса завтовшки 8 – 10 мм. Таке з'єднання не потребує точного центрування і знімає пікові навантаження при запусках та зупинках обладнання.

На Кіровоградському заводі „Цукрогідромаш” і деяких цукрових заводах (з метою підвищення зносостійкості) робочі колеса відцентрових насосів для перекачування кислих середовищ бурякоцукрового виробництва виготовляють з алюмінієвих сплавів.

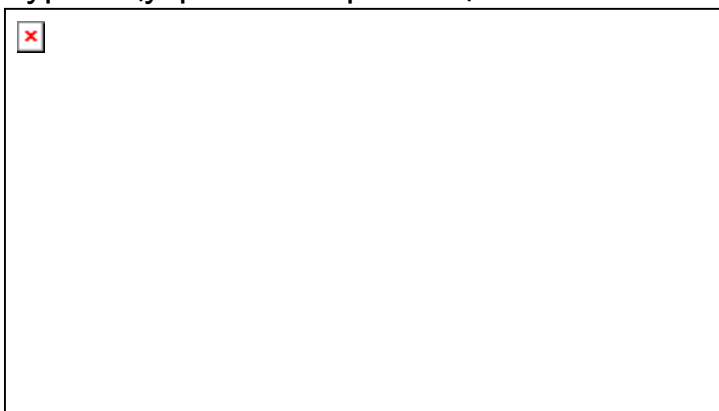


Рис. 15.18. Еластична з'єднувальна муфта

Застосовуються також полегшені зварені та пластикові робочі колеса насосів (рис.15.19).

На харчових підприємствах доцільно застосовувати способи утворення на поверхнях 1 похилих транспортерів, пневмоприводів і корпусів шнеків (рис.15.20, а,б,в), яким загрожує інтенсивне зношування, захисного прошарку з продукту, що транспортується. Такий прошарок створюється за допомогою кишень 2 з накопиченим продуктом 3 на пневмоприводах (рис. 15.20, б), використанням ступінчастих нахилених полиць 2 (рис. 15.20, а) з пристосуванням 3 для регулювання кута α , при якому формується захисний шар продукту, або заниженням днища корпуса шнека 1, яке забезпечує утворення шару продукту 2 для захисту (рис. 15.20, в).

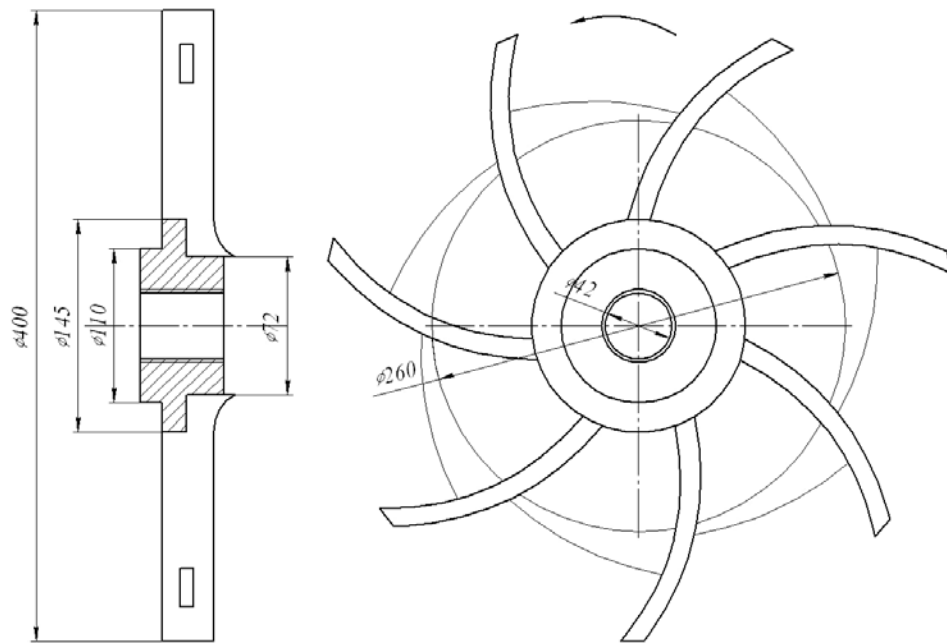
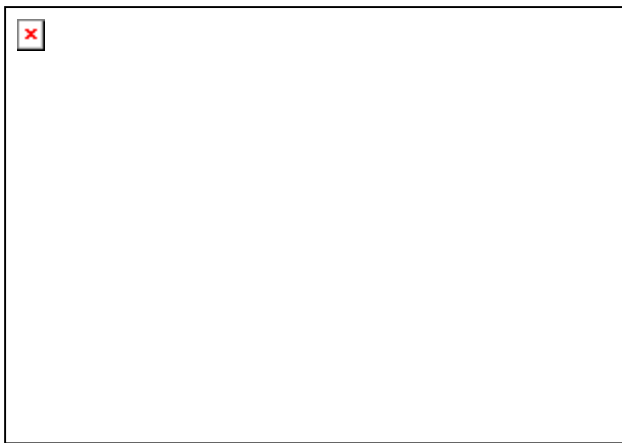
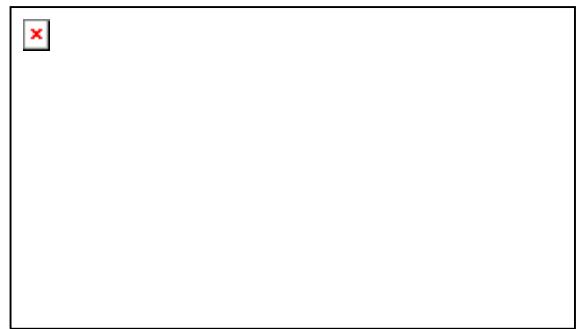


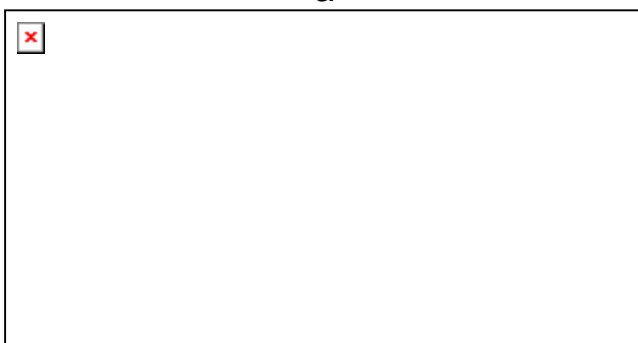
Рис. 15.19. Зварне робоче колесо насоса СОР-100



а



б



в

Рис. 15.20. Схеми утворення шару продукту, що захищає конструкцію від зношування і корозії (пояснення в тексті)

Зношування технологічного обладнання суттєво зменшується при якісному очищенні сировини від остаточного забруднення, ефективному облаштуванню піскоуловлювачів, які унеможливають попадання абразивних частинок у середовища, які переробляються.

На цукрових заводах для більш повного відділення сміття від буряків застосовують досить простий пристрій (рис. 15.21). Над

бункером для буряків 3 встановлений стрічковий конвейєр 1. Буряк, що подається конвейєром 1, обдувається потоком повітря, яке поступає з вентилятора 5 через сопло 4. Домішки, які відділені від буряку, подаються на конвейєр 2.

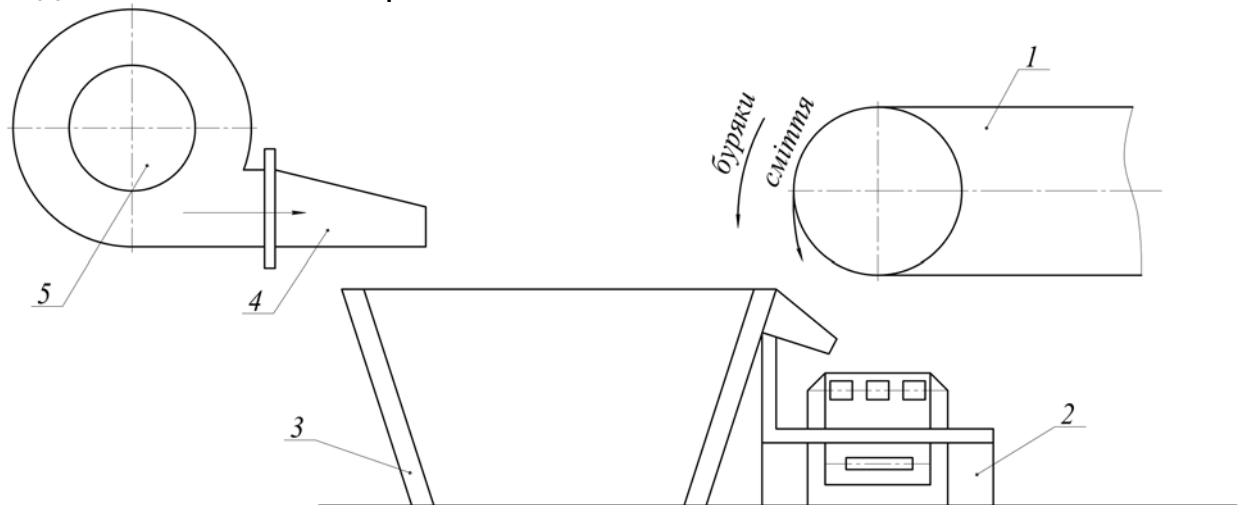


Рис. 15.21. Схема видалення сміття з буряків

У деяких випадках інтенсивність корозії може бути зменшена за рахунок раціонального компонування обладнання. Наприклад, під час дослідження випарних апаратів цукрових заводів встановлений негативний вплив розчинених кисню і діоксиду вуглецю на ступінь кородування кип'ятильних труб. Для попередження поступання повітря в перший корпус випарного апарата бажано не розташовувати дуже близько до нього збирачі соку, який направляється у цей корпус, і ретельно контролювати відсутність підсмоктування повітря насосами, що його перекачують.

Експлуатаційна надійність деталей та вузлів машин, апаратів, агрегатів, комунікацій підвищується при заміні традиційних металів і сплавів деякими неметалічними матеріалами. Зовнішні поверхні колін, труб або вигинів кабелів захищають від корозії так : на коліно або вигин надівають циліндричний патрубок з полімеру, який здатний стискатися при нагріванні; після нагрівання пальником щільно осівши на коліні патрубок додатково заключають у другий патрубок більшого діаметра для закривання щілини, яка є у першому патрубку. Його також нагрівають пальником для забезпечення щільного двохшарового обгортання коліна патрубками.

Існуюча конструкція роликів пневматичних підіймачів блоків розливу пиво – безалкогольної продукції Т1-ВДР-2 та Т1-ВРЦ-12 (рис. 15.22,а) має ряд недоліків: роликпідшипники (№104 або №204) 9 руйнуються через 6 місяців експлуатації; розбиваються місця для посадки підшипників у роликах 1, які закріплені на напівосях 8 гайками 5 та шайбами 6, і ролики підлягають заміні; високотверда поверхня ролика 1 інтенсифікує зношування копіра блоку, реставрація якого досить трудомістка; мащення підшипників 9 через маслянки 4, які

закріплені в кришках 3, ущільнених прокладками 2 і болтами 7, що розташовані в важкодоступному місці, потребує великих витрат часу; часта заміна дефіцитних роликотідишпників 9 у великій кількості (120 штук у кожному блоці) робить експлуатацію блоків незручною і дорогою. Тому на Дніпропетровському пиво-безалкогольному комбінаті замінені металеві ролики на капронові (рис. 15. 22, б). Таким чином спрощена конструкція кріплення ролика 1 до кронштейна 4 за допомогою шайби 2 та гайки 3. З'явилась можливість швидкої заміни ролика 1, виключене змащування вузла і підвищена довговічність копіра.

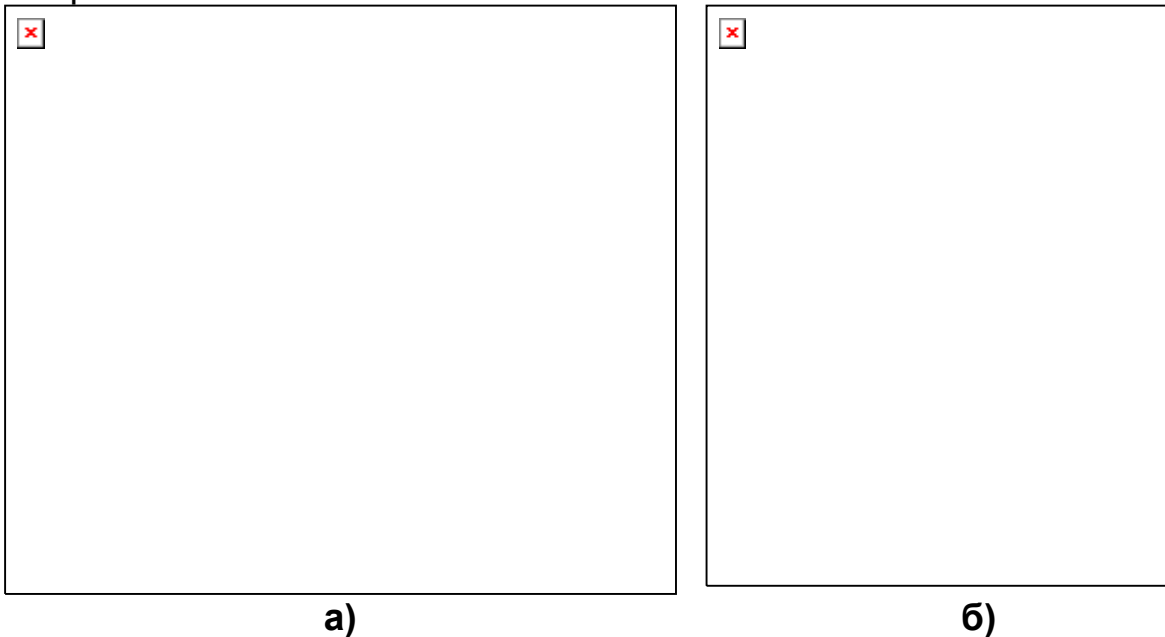


Рис. 15.22. Серійна (а) і змінена (б) конструкції пневмопіднімачів блоків розливу пиво-безалкогольної продукції

Суттєве зниження корозійних руйнувань харчового обладнання часто забезпечується раціонально зконструйованими та ефективно працюючими системами вентиляції. Такі системи не дозволяють парам технологічних та допоміжних середовищ поширюватись за межі простору ведення виробничих процесів. Тому в робочому об'ємі цеху знижується вологість і загазованість повітря, підтримується чиста атмосфера, яка сприяє підвищенню довговічності обладнання та комунікацій. Наприклад, забезпечення витяжною вентиляцією камер підв'ялення солодосушарок ЛСХА-10 суттєво знижує корозійні руйнування розташованого в них обладнання.

Усунення конструктивних недоліків обладнання, комунікацій і металевих конструкцій, раціональна модернізація деталей і вузлів знижує їх корозійне руйнування та зношування, підвищує надійність і довговічність, сприяє інтенсифікації технологічних процесів харчових виробництв.

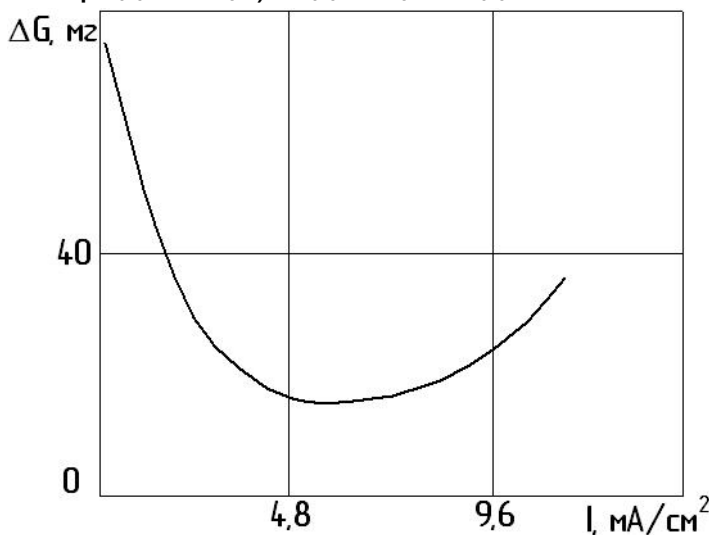
15.3. Зміна умов експлуатації для захисту обладнання від спрацювання

Застосування цього напрямку керування зносостійкістю обладнання в більшості випадків має на меті вибір ефективної системи мащення і виду мастил, а також ізоляцію зони тертя від контакту з зовнішнім середовищем з метою виключення можливості корозійно-механічного, абразивного та інших небажаних видів зношування.

Специфічні умови роботи обладнання харчової промисловості вимагають також ізоляції змащуваних вузлів тертя для запобігання попаданню мастил і продуктів зносу в сировину і продукти. Іноді змащування унеможлиблюється використанням. В цих випадках, а також в умовах кавітаційно-ерозійного, гідроабразивного, хіміко-механічного зношування неминучий контакт поверхонь деталей з технологічними середовищами. Тоді одним з можливих заходів підвищення довговічності може бути вплив на хімічну і поверхневу взаємодію матеріалу деталей і середовища. В першу чергу це пов'язано із застосуванням нетоксичних інгібіторів корозії і поверхнево-активних речовин. Але їх введення до складу технологічних рідин обмежене суворими санітарно-гігієнічними вимогами. Тому вони найчастіше застосовуються для зменшення корозійної активності мийних розчинів.

Більші можливості для застосування в харчовій і переробній промисловості мають електрохімічні методи захисту обладнання. Відомі роботи В.Супрунчука по катодному захисту від корозії деталей дифузійних апаратів цукрових заводів. Електрохімічний захист може бути корисними при кавітаційно-ерозійному і гідроабразивному зношуванні. Його ефективність тим більша, чим вища корозійна активність розчинів.

Дослідження на стенді з МСВ свідчать (рис. 15.23), що при катодній поляризації є оптимальні значення потенціалу і густини струму, які забезпечують найбільший захисний ефект. Застосування електрохімічного захисту дає можливість до 5 разів (залежно від середовища) підвищити довговічність деталей обладнання (апаратів,



трубопроводів тощо) з дешевих залізобуглецевих сплавів при кавітаційно-ерозійному зношуванні.

Рис. 15.23. Залежність втрат маси зразків із сталі 45 при дослідженні на стенді з МСВ в кислій жомовій воді цукрового виробництва від густини струму катодної поляризації

В деяких випадках (частіше при невисокому рівні мікроударного навантаження) можливий захист від кавітаційно-ерозійного зношування анодною поляризацією корозійностійких сплавів. Наприклад, анодною поляризацією при густині струму 60 А/м² вдалося більш як на 40% підвищити кавітаційно-ерозійну стійкість нержавіючої сталі 12Х18Н10Т в спиртовій барді.

При контакті з технологічними рідинами, що містять значну кількість твердих домішок (транспортно-мийні води, вапняне молоко в цукровому виробництві), можливий прояв абразивного зношування з високою інтенсивністю. В цих випадках ефективним може бути метод підвищення довговічності вузлів тертя завдяки примусовій подачі чистої води в зону тертя. За даними М.Сологуба, таким методом вдалося на 75% зменшити знос валів і підшипників бурякомийних агрегатів.

15.4. Раціональний вибір матеріалів – універсальний спосіб забезпечення довговічності обладнання

Одним з найбільш універсальних (але не завжди економічних) методів забезпечення високої надійності і довговічності обладнання є використання зносостійких матеріалів для його виготовлення. Вибір матеріалів визначається їх складом, будовою міцностними, протикорозійними, антифрикційними властивостями, рівнем зносостійкості, технологічними і економічними показниками. В той же час вибір матеріалів для обладнання харчової промисловості, в більшості випадків, обмежений вуглецевими сталями і чавунами без урахування їх опору зношуванню. Наприклад, в бурякоцукровій, крохмаль-патоковій, бродильній, соляній та інших галузях промисловості великогабаритне обладнання (дифузійні, випарні апарати, мийні агрегати тощо) виготовляють, в основному, з конструкційної вуглецевої сталі звичайної якості, а майже всі насоси для перекачування технологічних рідин — з сірого чавуну. Тобто є значні резерви підвищення надійності і довговічності обладнання у разі застосування більш зносостійких матеріалів і захисних покриттів.

Встановлені загальноприйняті вимоги до зносостійких матеріалів пар тертя: висока статична і динамічна міцність при підвищених температурах; малий коефіцієнт тертя; здатність легко притиратися; висока змочуваність мастилом; здатність утворювати на поверхні міцний шар мастила і відновлювати його; відсутність зчеплення при сухому терті; висока теплопровідність; висока зносостійкість.

У сучасному обладнанні, як антифрикційні і зносостійкі, застосовують металеві сплави, спечені порошкові, полімерні, композиційні матеріали. У загальному машинобудуванні накопичений

значний досвід по створенню і використанню цих матеріалів, який досить повно поданий у технічній літературі.

Для підшипників ковзання застосовують металеві, порошкові і полімерні матеріали. Матеріали найбільш розповсюджених металевих підшипників: бабіти, бронзи, латуні, чавуни, цинкові та алюмінієві сплави. Класичним бабітом вважається Б83, що складається з 82...84% олова, 5...6% міді і близько 11%. Його висока вартість і дефіцитність примусила розробити замітники – свинцево-сурмові і кальцієві, що за своїми якостями дещо поступаються олов'янистим. Бабіти перевершують усі підшипникові сплави за антифрикційними показниками, мають низьку теплостійкість і втомлювальну міцність, яка обумовлена неоднорідністю (гетерогенністю) структури. Для отримання якомога більш однорідної структури і підвищення втомлювальної міцності намагаються наносити бабіт на укладки підшипника найбільш тонким шаром.

Високі антифрикційні властивості мають олов'яні бронзи, наприклад, БрО10, БрОФ10-1, БрОЦС5-5-5, БрОЦС4-4-2,5. Залежно від складу, бронзи можуть бути ливарними й оброблюваними тиском. Безолов'яні бронзи (БрА9Ж4, БрА10Ж4Н4) дешевші, але поступаються олов'янистим за показниками антифрикційності.

Для виготовлення підшипників ковзання іноді використовують багатокомпонентні латуні, які містять, крім міді та цинку, алюміній, залізо, марганець, олово, свинець. За своїми антифрикційними властивостями вони значно програють бронзам, але їх використовують у випадках, коли для мащення механізмів застосовують оливи з хімічно - активними присадками.

Цинкові сплави ЦАМ 10-5, ЦАМ 10-1,5 та інші на основі цинку, в яких основним легуючим елементом є алюміній (до 12%), застосовують як замітники бабітів і бронз, але вони суттєво поступаються останнім за антифрикційними властивостями.

Як замітники бабітів поширені алюмінієві сплави, які характеризуються економічністю, достатньо високими антифрикційними властивостями і високою втомлювальною міцністю. Вони застосовуються у біметалевому і монометалевому виконанні. Найбільш високі експлуатаційні якості мають сплави АО9-1 (до 9% олова, 1% міді), АО20-1 (до 20% олова, 1% міді), що наносяться шаром завтовшки 0,5 мм на сталеву стрічку, з якої потім згортаються укладки підшипників. Монометалеві втулки відливаються зі сплавів АО3-1, АО9-2 та інших. Широко використовуються, особливо у вузлах, що працюють з пластичним змащенням, сірі і спеціальні антифрикційні чавуни АСЧ-1, АСЧ-2, АЧВ-1, АЧВ-2, АЧВ-3, АЧК-1, АЧК-2. Їх найважливішими особливостями є висока зносостійкість, добрі ливарні властивості, низька вартість. Порівняно нові марки чавуну АСЧ-4, АСЧ-5, АСЧ-6 призначені для роботи при навантаженнях до 150...300 кг/см², кутових швидкостях до 5 м/с і температурах до 300⁰С.

З чавуну виготовляють і багато інших деталей пар тертя. Можна вважати, що зі збільшенням твердості підвищується зносостійкість чавуну але, водночас, погіршуються його оброблюваність різанням і ливарні властивості.

Сірий чавун застосовують у тих випадках, коли деталь має значний обсяг механічної обробки через те, що він оброблюється краще, ніж білий. Наприклад, його застосовують для виготовлення деталей насосів, які перекачують пульпу з абразивом невисокої твердості (гіпс, вапняк, торф тощо), а також для виготовлення переважної більшості насосів бурякоцукрових заводів.

Відбілений чавун має підвищену зносостійкість за рахунок наявності в його структурі цементиту (до 50%). З нього найчастіше виготовляють швидкозношувані деталі, наприклад, мірошницькі вальці для підприємств, які виготовляють борошно.

Добрі стійкісні властивості мають високохромисті білі чавуни. Окремі їх види задовільно обробляються різанням, а деякі – досить важко. Вироби з цих матеріалів піддаються термічному обробленню (НЧХ28Н2, ИЧХ12М, 130Х16М2).

Деталі, виготовлені з матеріалів, отриманих методами порошкової металургії, можуть працювати при терті в умовах мащення твердими, пластичними і рідкими мастилами у широкому діапазоні температур і в агресивних технологічних середовищах. Порошкова металургія дозволяє синтезувати унікальні за складом, структурою, властивостями, економічністю матеріали, що відкриває широкі можливості їхнього використання як антифрикційних.

У вузлах тертя, що працюють з мащенням, застосовують порошкові матеріали з контрольованою пористістю. Заповнення пор мастильними матеріалами і їхнє наступне виділення в процесі тертя обумовлює самозмащування і можливість застосування вузлів тертя з обмеженим мащенням. Досить широко при виготовленні підшипників застосовують матеріали на основі заліза (Ж), заліза з добавками графіту (Гр) і міді (Д): ЖГр1, ЖГр2, ЖГр3, ЖГр2Д2,5, ЖГр1Д2 тощо. Залізо-графітові матеріали є заміниками дефіцитних підшипникових матеріалів при легких режимах роботи вузлів тертя технологічного обладнання харчових і переробних підприємств АПК.

Зносостійкість залізо-графітових матеріалів може бути підвищена введенням легуючих добавок (свинцю, олова, фосфору, сірки та інших компонентів). Пористі підшипники виготовляють зі спечених матеріалів на основі міді, найчастіше з бронзи. Бронзографіти містять до 5% графіту (БрОГр8-4 та інші). Крім того, існують спечені матеріали, в яких сухим мастилом служить не графіт, а дисульфід молібдену, нітрид бору, сірка тощо.

Матеріали на основі полімерів застосовують у вузлах тертя, що працюють без мащення або з мащенням олівами, водою, хімічно-агресивними рідинами, що важливо при їх застосуванні в обладнанні

харчових виробництв. Експлуатаційними перевагами матеріалів на основі полімерів є їхня висока зносостійкість (особливо при роботі без мащення і в агресивних середовищах), високе співвідношення міцності і питомої маси, здатність гасити вібрації, високий опір схоплюванню, технологічність виготовлення, порівняно невисока вартість. Однак, вони мають низьку теплопровідність, гігроскопічні, для них притаманний високий коефіцієнт лінійного розширення.

Окрему групу складають металопластмасові матеріали, у яких вдало поєднані найбільш вигідні властивості полімерів і спечених матеріалів. В машинобудуванні застосовуються пористі матеріали на основі заліза, бронзи, титанових сплавів, корозієстійких сплавів, просочені фторопластом-4Д. Використовуються різні способи просочення пористих виробів, наприклад, вдавлення полімерного порошку, пасти або стрічки, фільтрація водяних суспензій крізь пори за допомогою вакуумного і відцентрового способів або надлишкових тисків.

Найбільш прогресивними і зручними для масового виробництва є стрічкові матеріали, одержані нанесенням за допомогою напікання або напилювання пористого металевго шару, що потім наповнюється фторопластом. Для одержання пористого металевго шару найчастіше напікають сферичну олов'янисту бронзу (до 10% олова), рідше – латунну сітку. За наповнювачі фторопласта-4 використовують свинець, дисульфід молібдену, графіт тощо. На попередньо електролітично нанесений на стрічку з низьковуглецевої сталі мідний шар припікають шар сферичних часток бронзи діаметром до 0,1 мм і товщиною 0,3...0,4 мм. Пористість шару становить 30...40%. В подальшому пори заповнюються шаром фторопласту, наповненого дисульфідом молібдену, що виходить і на поверхню, покриваючи кульки бронзи на 0,02...0,03 мм. Штампуванням одержують опорні кільця, втулки та інші вироби, які потім застосовують у вузлах тертя.

В умовах харчових виробництв до названих вище вимог до антифрикційних і зносостійких матеріалів додається здатність матеріалів задовільно працювати в умовах контакту з технологічними середовищами при неможливості змащування мастилами.

Численні дослідження зносостійкості матеріалів в технологічних середовищах харчових виробництв проведені Г.Прейсом, М.Сологубом, О.Некозом з співробітниками. На базі цих досліджень розроблені рекомендації по використанню зносостійких матеріалів для конкретних умов роботи харчового обладнання. Наприклад, встановлено, що в багатьох середовищах бурякоцукрового виробництва (воді, дифузійному соці та ін.) зносостійкість пари сталь-чавун значно перевищує зносостійкість при терті сталі по кольорових металах (бронзі, бабіту). Довговічність важконавантажених підшипникових вузлів при змащуванні водою з вмістом абразивних частинок можна забезпечити використанням для виготовлення укладок

з деревини (особливо модифікованої) та полімерних антифрикційних матеріалів. Для багатьох деталей хлібопекарського обладнання, які контактують з тістом, досить ефективним може бути використання для їх виготовлення розробленого Інститутом проблем лиття НАН України сплаву 130ХІ6М.

З метою вибору найбільш перспективних сталей для виготовлення паперорізальних ножів цукеркозагортувальних автоматів пакувальних ліній кондитерської промисловості були проведені випробування ножів із сталей: вуглецевої (У10А), малолегованих (ХВГ і 9ХС), середньохромистих (Х6ВФ і 55Х6В3СМФ), високохромистих (Р6М5 та Р18Ф2). Випробувані сталі для ножів у порядку зростання стійкості можна поділити на три групи: низької зносостійкості - вуглецеві та малолеговані; середньої зносостійкості — середньо- та високохромисті, зносостійкість яких в 1,5-2 рази вища, ніж сталей першої групи; високої зносостійкості — швидкоріжучі, зносостійкість яких в 5-10 разів вища, ніж сталей першої групи.

О.Іпатовим було досягнуто значне збільшення стійкості ножів в результаті виготовлення їх з середньохромистих сталей. Ним, при випробуваннях, була отримана стійкість ножів із сталі Х6ВФ, яка дорівнювала $50 \cdot 10^6$ циклів, а із сталі 55Х6В3СМФ — $70 \cdot 10^6$ - $80 \cdot 10^6$ циклів. Однак, по мірі зношування ножів, виконувалась періодична ручна доводка ріжучого леза оселком, на яку витрачалось 10-15 хв. робочого часу, що привело до значного зменшення випуску товарної продукції. Крім того, часті випадки, коли паперорізальні ножі виходять з ладу в результаті неправильної доводки леза ножа. Нашими дослідженнями (табл. 15.3) встановлено, що підвищити стійкість ножів у вказаних межах можна, виготовляючи рухомі і нерухомі ножі з більш зносостійких матеріалів.

Значного підвищення зносостійкості ножів можна досягти також застосуванням газотермічних та інших покриттів, що буде обгрунтовано нижче.

Таблиця 15.3

Вплив сполучення матеріалів рухомого і нерухомого ножів цукеркозагортувальних автоматів на їх стійкість

Марка сталі ножа		Стійкість (млн. циклів)
нерухомого	рухомого	
ХВГ	Р18Ф2	47,5
	Р6М5	22
	55Х6В3СМФ	16
Р6М5	Р18Ф2	35
	Р6М5	20
	55Х6В3СМФ	13
Х6ВФ	Р18Ф2	51
	Р6М5	40
	Х12Ф1	15
55Х6В3СМФ	Р18Ф2	68,5

	P6M5	50
	X12Ф1	17
X12Ф1	P18Ф2	77,5
	P6M5	30
	55X6B3CMФ	15

Аналогічно було досягнуте підвищення довговічності ножів м'ясорізальних вовчків у 3-4,5 рази за рахунок використання сталей 9ХС і ШХ15 замість сталі У8 в серійних вовчках.

В корозійних середовищах харчових виробництв, які містять органічні кислоти, кухонну сіль та інші активні компоненти, високу кавітаційно - ерозійну стійкість мають нержавіючі аустенітні сталі, титанові та інші корозійностійкі сплави. Наприклад, виготовлення з сплаву 130Х16М деталей відцентрових насосів, які перекачують сульфатований сік цукрового виробництва, забезпечило підвищення їх довговічності більш ніж в 7 разів у зрівнянні з серійними насосами з сірого чавуну.

В той же час, використання зносостійких високолегованих, дорогих і дефіцитних сплавів для виготовлення обладнання не завжди обгрунтоване. Наприклад, кавітаційно-ерозійна стійкість деталей може бути підвищена майже в 2 рази заміною сірого чавуну на високоміцний. Для деталей, які працюють в деяких кислих середовищах за невисокої інтенсивності мікроударної дії, ефективним може бути використання алюмінієвих сплавів.

Значного підвищення довговічності обладнання можна досягнути раціональним використанням термічної або хіміко- термічної обробки. Але треба враховувати, що в умовах корозійно-механічного, кавітаційно-ерозійного зношування в корозійних середовищах харчових виробництв зміцнювальна термообробка інколи зовсім не дає бажаного ефекту підвищення довговічності. Наприклад, зносостійкість середньовуглецевих сталей без термообробки і після загартування та низького відпуску при терті по м'якій сальниковій набивці (за даними Ю.Смертяка і М.Сологуба) та в умовах кавітаційно-ерозійного зношування має один порядок і значно поступається менш міцним, але корозійностійким алюмінієвим і мідним сплавам. В цих умовах більш доцільною і ефективною є зміцнювальна термообробка саме корозійностійких сталей і сплавів. Розглянемо ці обставини більш детально.

Дослідження показали, що більшість відцентрових насосів бурякоцукрового виробництва перекачують технологічні середовища з температурою 50-90°C і працюють при радіальному тиску набивки 0,6-0,8 МПа і швидкості ковзання вала в межах 2,5-5,0 м/с. Тому, при проведенні дослідів на установці торцевого тертя, тиск становив 0,7 МПа, а швидкість ковзання дорівнювала 2,5 м/с. Температура робочих середовищ підтримувалась близькою до 50-60°C. За зразки правила

пенькова набивка, яку широко застосовують в насосах, а контртіло виготовлялось з досліджуваних матеріалів. Випробовування зносостійкості матеріалів проводили в дистильованій воді, яка за своїм складом близька до конденсату випарних апаратів цукрових заводів, а також в 15%-вому розчині цукрози, кислому буферному розчині (рН6,5), дифузійному та сатурованому соці. Досліджувалась зносостійкість нормалізованої і загартованої сталі 45, електролітично азотованої сталі 45Х, чавуну СЧ20, а також плазмових покриттів з бронзи БрОЦС-5-5-5, нікель-алюмінієвого сплаву ПН85Ю15, кераміки (плазмотексту ОТЗ та електрокорунду Мн 28) і газополуменевих покриттів з сплаву ПГ-10Н-01 (Ni-Cr-B-Si).

Випробування матеріалів в парі тертя з сальниковою набивкою показали (табл. 15.4), що в дистильованій воді найбільшу зносостійкість серед традиційних матеріалів має напилена плазмою бронза, а найменшу - сірий чавун СЧ20. Після випробувань на поверхні тертя зразка із сталі 45 були виявлені темні плями оксидів і сліди їх руйнування, які орієнтовані у напрямку ковзання (рис. 15.24,а). Колір оксидних плівок змінювався від чорного до світло-сірого, що свідчить про їх різну товщину. Травлення поверхні металу показало, що оксидні темні плівки розміщені, в основному, на ділянках перлітних включень. Електронно-мікроскопічні дослідження виявили полоси зруйнованих оксидів, які орієнтовані в напрямку ковзання (рис. 15.24,б). Руйнування оксидів відбувається шляхом видалення невеликих їх частинок, або навіть великих блоків.

Вигляд зношених поверхонь зразків з загартованої сталі 45 дещо інший (рис. 15.24,в). Тут на темному полі розсіяні вкраплення світло-сірого та чорного кольорів. З використанням електронного мікроскопа виявлені наслідки деформації, перетікання і руйнування оксидних плівок (рис. 15.24,г).

Поверхня тертя зразків із сірого чавуну вкрита темними і темно-сірими плівками оксидів, причому темні оксиди розміщені впродовж тильної сторони графітних включень, які орієнтовані перпендикулярно до вектора швидкості ковзання. Графітні включення виступають над поверхнею на висоту до 100 мкм і тому вона вкрита суцільними рифами (рис. 15.24,д).

Поверхня тертя зразка з напиленої плазмовим струменем бронзи БрОЦС-5-5-5 вкрита оксидами синього і темно-червоного кольору (рис. 15.24,е), а, в деяких місцях, на поверхні була виявлена мідь.

Таблиця 15.4.

Спрацювання металів і захисних покриттів (мг/км) при терті по пеньковій набивці в нейтральних, кислих та лужних модельних і технологічних середовищах бурякоцукрового виробництва

№ п/п	Модельні або технологічні розчини	Метали та захисні покриття								
		Сталь 45 (нормалізація)	Сталь 45 (гартування)	Чавун СЧ20	Бронза Бр05Ц5С5 (плазмове напилення)	ПГ-10Н-01 (газополуменева наплавка)	ПН85Ю15 (плазмове напилення)	ОТЗ (плазмове напилення)	Мн 28 (плазмове напилення)	Сталь 45Х (електроліт.азотування)
1.	Дистильована вода	0,275	0,205	0,372	0,025	0,018	0,016	0,018	0,022	0,004
2.	15%-ний розчин цукрози в дистильованій воді	0,155	0,170	0,305	0,020	0,015	0,014	0,017	0,021	0,003
3.	Кислий буферний розчин (рН 6,5)	1,502	2,225	1,632	0,254	0,028	0,032	0,026	0,028	0,925
4.	Дифузійний сік	1,005	0,625	1,18	0,225	0,020	0,022	0,025	0,026	0,532
5.	Лужний розчин	0,042	0,030	0,058	0,012	0,004	0,008	0,006	0,003	0,002
6.	Сатурований сік	0,033	0,027	0,045	0,010	0,002	0,006	0,004	0,003	0,002

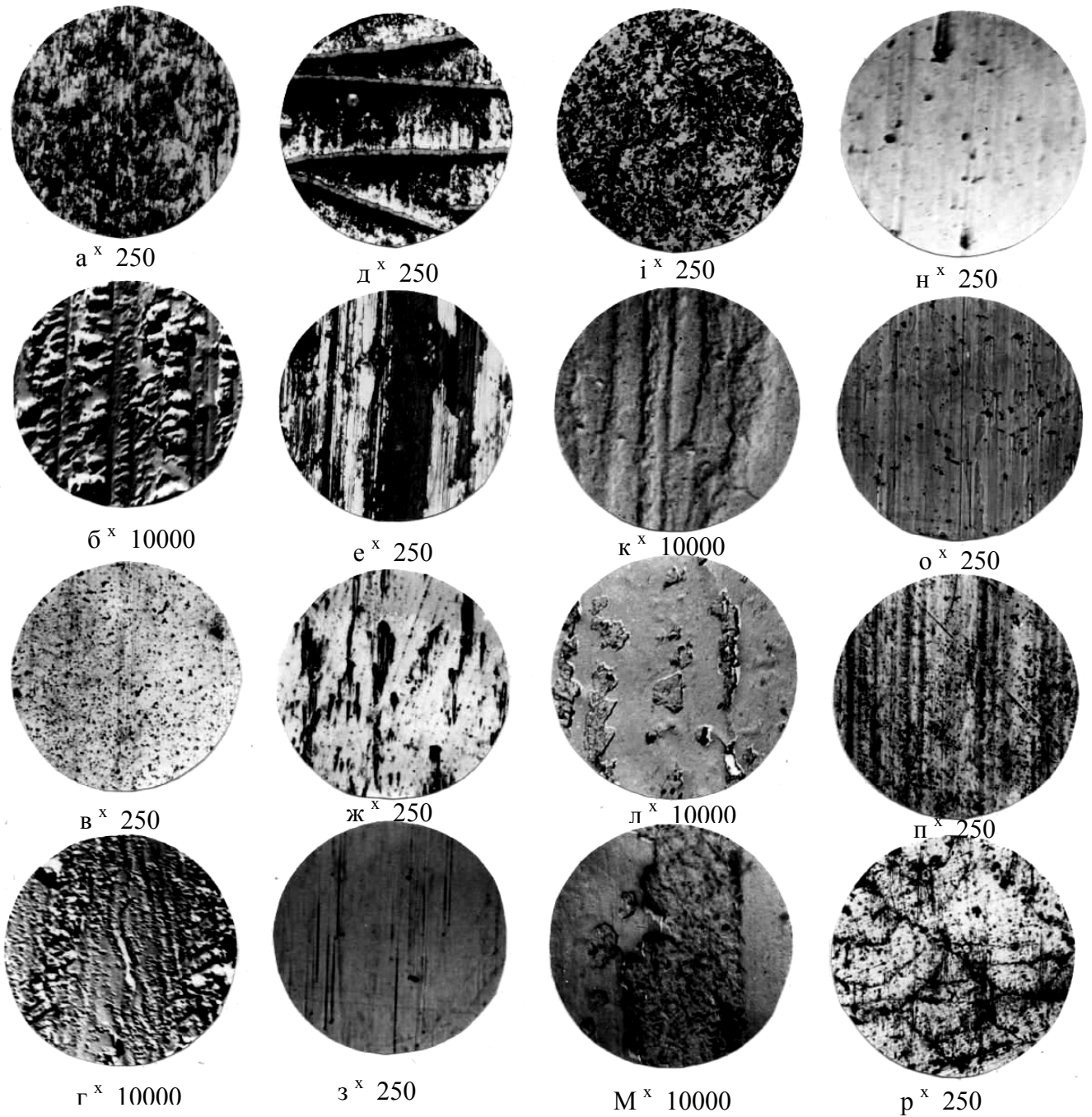


Рис. 15.24. Поверхні тертя зразків з нормалізованої (а,б,ж,і,к,н,о) і загартованої (в,г,з,л,м,п) сталі 45, сірого чавуну СЧ20 (д) і напиленої плазмою бронзи (е) після зношування пеньковою набивкою в дистильованій воді (а-е), 15%-ному розчині цукрози (ж-з), кислому буферному розчині (і-м), дифузійному соці (н) та лужному розчині (о-р)

При роботі в хімічно-активному середовищі зносостійкість металів залежить від їх антикорозійних властивостей та властивостей вторинних структур, які утворюються на поверхні тертя. Тому зносостійкість нормалізованої сталі 45 в дистильованій воді визначається міцністю зв'язку плівок, які утворені на її перлитній і феритній складових. На перлитних ділянках плівки зношуються поступово з невеликою

інтенсивністю, а на феритних вони відриваються від основи. Таким чином, збільшуючи в сталі кількість перлитної складової, можна очікувати підвищення її зносостійкості. Загартована сталь 45 має однорідну мартенситну структуру і більш кращі антикорозійні властивості. При терті на ній утворюються м'якіші, ніж основа, оксидні плівки, які плинуть по поверхні тертя без утворення тріщин (рис. 15.24,г), зношуються і руйнуються поступово, тому ця сталь має вищу зносостійкість, ніж нормалізована.

Сірий чавун корозійно не стійкий, а його металева основа розділена графітними включеннями. Руйнування оксидних плівок здійснюється на металевій основі, причому на феритних ділянках цей процес проходить більш інтенсивно, ніж на перлитних, тому при експлуатації в дистильованій воді сірий чавун з перлитною основою буде більш стійким.

Велика зносостійкість плазмово-напиленої бронзи обумовлена її високими антикорозійними властивостями і тим, що вторинні структури, які утворюються на її поверхні тертя мають мало тріщин і міцно зчеплені з основою. Інші газотермічні покриття також мають добрі антикорозійні властивості і їх знос ще менший (див. табл.15.4). Найменший знос характерний для електролітично азотованої сталі 45X.

В розчині цукрози (табл. 15.4), яка входить до складу більшості технологічних середовищ бурякоцукрових заводів, а також досить часто зустрічається в середовищах інших харчових виробництв, зносостійкість металів і покриттів визначається її інгібуючою дією на метал. Наявність цукрози в розчині значно збільшує зносостійкість практично всіх досліджених металів і металевих покриттів і майже не впливає на зносостійкість керамічних плазмових покриттів (табл. 15.4). Зносостійкість менш корозійностійких матеріалів підвищується більше, ніж металів і покриттів, які мають високі антикорозійні властивості. Цукроза також знижує коефіцієнти тертя досліджуваних матеріалів. Відмітимо, що цукроза - це надзвичайно слабка багатоосновна кислота з константою електролітичної дисоціації при 25°C рівною $3 \cdot 10^{-13}$. Тому можна припустити, що однією з причин уповільнення інтенсивності зношування матеріалів в розчині цукрози є уповільнення електрохімічних процесів, які при терті та зношуванні часто відіграють визначальну роль. Разом з тим, для цукрози властиві добрі змащувальні властивості, що дає можливість більше навантажувати пару тертя. На поверхнях тертя при випробуваннях в цукровому розчині утворюються більш світліші, ніж у дистильованій воді, захисні плівки (див. рис. 15.24,ж,з). Так, на поверхні тертя із нормалізованої сталі 45 (див. рис. 15.24,б) і загартованої (див. рис.15.24,в) темних оксидів значно менше, ніж при випробуваннях цієї ж сталі в дистильованій воді (див. рис. 15.24,а,в). Темні оксиди розташовані лише у вигляді плям, а на загартованій сталі навіть зменшилась їх

кількість. Металографічний аналіз поверхонь тертя зразків після випробування у розчині цукрози показав, що їх корозійно-механічне зношування відбувається менш інтенсивно, ніж при терті в дистильованій воді, тому зносостійкість корозійно-стійких металів в розчинах цукрози підвищується, в середньому, на 8-15%, а металів з малою корозійною стійкістю (сердньовуглецеві сталі та чавуни) - на 35-45%.

В кислих середовищах (жомо-водяна суміш, кислі жомові та жомопресові води, дифузійний сік в бурякоцукровому виробництві, молочна сироватка, молочна кислота, газована вода в інших галузях харчової промисловості) з рН 3,5-6,5 значно зростає інтенсивність зношування всіх досліджуваних металів і захисних покриттів. Так, дослідження зносостійкості матеріалів в буферному розчині двоохаміщеного фосфорнокислого натрію і лимонної кислоти в дистильованій воді з рН 6,5 в парі з пеньковою набивкою показали, що найвищу зносостійкість в ньому мали (табл. 15.4) нанесені газотермічним напиленням металеві сплави ПГ-10Н-01, ПН85Ю15, а також керамічні покриття з плазмотексту ОТЗ та електрокорунду Мн 28. Серед металів високу зносостійкість показали нормалізована сталь 45 та сірий чавун СЧ 20, а менш стійкою виявилась загартована сталь 45. Напилена плазмовим струменем бронза по зносостійкості займала проміжне місце між чорними металами і нікелемісткими та керамічними газотермічними покриттями. Низька зносостійкість була також у електролітичноазотованих зразків із сталі 45Х.

Металографічні дослідження поверхонь тертя нормалізованої сталі 45 показали, що вони вкриті темними і темно-сірими оксидними плівками, причому більш темними (товстими) плівками вкриті ділянки з перлитною складовою (див. рис. 15.24,і). Дослідження поверхонь тертя на електронному мікроскопі (див. рис. 15.24,к) виявили, що при терті нормалізованої сталі 45 оксидні плівки руйнуються так, як і в дистильованій воді (див. рис. 15.24,б), але мікронерівності на плівках більш плавні та заокруглені. Це свідчить про те, що під дією кислого середовища відбувається їх інтенсивне електрохімічне розчинення, яке призводить до зростання інтенсивності зношування. Дослідження зносостійкості зразків з загартованої сталі 45 показало, що вона набагато менша за зносостійкість нормалізованої сталі 45 (табл. 15.4). На поверхні тертя мають місце два види руйнування оксидних плівок - це руйнування з поступовим стиранням плівок (див. рис. 15.24,л) і крихке (див. рис. 15.24,м). При випробуванні зразків із сірого чавуну СЧ20 виявилось, що характер руйнування поверхонь подібний до руйнування при терті в дистильованій воді (див. рис. 15.24,д).

Зменшення зносостійкості металів в кислому буферному розчині пов'язане з більшою хімічною активністю середовища та зі збільшенням ролі механічного чинника при зношуванні через інтенсивне заповнення поверхні набивки продуктами зносу. Тому

ведучим видом зношування металів і покриттів в кислих середовищах треба вважати корозійно-механічний. Знос монолітних металів в цих середовищах в 5-8 разів вищий, ніж у дистильованій воді. Максимальну зносостійкість в цих середовищах мають корозійностійкі керамічні плазмові покриття, а також покриття на нікелевій основі.

При терті матеріалів в дифузійному соці (рН 6,2-6,4) порядок їх розташування за зносостійкістю подібний до порядку в кислому буферному розчині, але величина зносу зменшується на 30-50%. Серед металів найбільшу зносостійкість має загартована сталь 45, а найменшу - сірий чавун СЧ20. Газотермічні покриття з нікелемістких сплавів і оксидів мають надзвичайно високу зносостійкість, яка істотно перевищує зносостійкість бронзового покриття. Азотування сталей для роботи в кислих розчинах не дає бажаного результату (табл. 15.4).

Більш висока зносостійкість металів і захисних покриттів в дифузійному соці пояснюється наявністю в ньому поверхнево-активних речовин (ПАР), частинок клітковини та домішок абразивних частинок. В цьому середовищі процес тертя набивки по металах і покриттях схожий на процес полірування. ПАР на поверхні зразка і набивки міцно зчеплюються між собою і, за рахунок цього, відбувається відривання оксидних плівок, а тверді частинки обкатують і вигладжують через шар ПАР поверхню металу (див. рис. 15.24,н). Значне підвищення зносостійкості загартованої сталі 45 і азотованої сталі 45Х в дифузійному соці (див. табл. 15.4) зумовлене також дією ПАР, які, ефективно розділяючи спряжені поверхні, перешкоджають місцевій концентрації напружень, зменшують тангенціальні зусилля, попереджуючи крихке руйнування поверхонь тертя. Тому загартовані сталі можна рекомендувати для виготовлення деталей вузлів тертя, які працюють у дифузійному соці. Ще кращі результати можуть бути отримані при використанні нікелемістких і оксидних покриттів. Так, зносостійкість самофлюсованого сплаву ПГ-10Н-01, нанесеного методом газополуменевої наплавки, більша в 30 разів за зносостійкість сталі 45.

Технологічні лужні середовища досить часто зустрічаються в харчових виробництвах - це розчини для миття і дезинфекції обладнання, різні соки тощо. На бурякоцукрових заводах - це вапняне молоко, суспензія гідроксиду кальцію, сатуровані і сульфатовані соки. Сатурований сік має водневий показник рН 10-11. До його складу, крім сполук кальцію, входить цукроза. Сульфатований сік, який отримують після обробки сатурованого сірчанним газом, має слаболужну реакцію (рН 7,6÷8,0). В ньому немає сполук кальцію і домішок абразивних частинок. Враховуючи це, лужне середовище моделювалось водняним розчином оксиду кальцію (рН 11).

Дослідження показали, що серед монолітних металів найменш стійким у лужних середовищах є сірий чавун СЧ20, посередині розташовується олов'яниста бронза, а надзвичайно велику стійкість мають газотермічні та азотомісткі покриття. Поверхні майже всіх

зразків після випробування були більш світлими, ніж при випробуванні в кислих середовищах (див. рис. 15.24,о,п). Знос металів і покриттів в лужному середовищі зменшився (в середньому у 5-9 разів), що можна пояснити утворенням на поверхні тертя більш міцних оксидних плівок, а також пасивуючих шарів з ОН-іонів, які перешкоджають розвитку корозійних процесів. Більш міцні оксидні плівки, утворені на металевих ділянках чавуну СЧ20 (див. рис. 15.24,р), зношуються менш інтенсивно, ніж графітні включення і тому рифи на поверхні зразка (див. рис. 15.24,д), як це було при випробовуваннях в дистильованій воді, не утворюються.

Дослідження у фільтрованому соці 1-ї сатурації (сухих речовин-15%, доброякісність-90%, рН – 11) показали, що знос всіх зразків дещо зменшився (див. табл. 15.4), що пояснюється інгібуючою дією цукрози і наявністю ПАР, які пластифікують поверхні тертя, попереджуючи крихке руйнування оксидних плівок.

Таким чином, технологічні середовища бурякоцукрового виробництва по-різному впливають на зносостійкість металів і захисних покриттів. Найбільше інтенсифікують зношування кислі технологічні середовища.

15.5. Застосування поверхневого захисту деталей

При зношуванні деталей їх довговічність в основному визначається показниками контактної міцності, зносостійкості, антифракційності, корозійної стійкості, тобто властивостями, будовою і зміною в процесі зношування тонких поверхневих шарів деталей. Це обумовлює різні вимоги до об'ємних і поверхневих властивостей матеріалу деталей — так названий А.Старосельським і Д.Гаркуновим *принцип взаємного доповнення якості*. На використанні цього принципу ґрунтується переважна більшість технологічних методів забезпечення надійності і довговічності деталей. Він займає чільне місце в обладнанні харчової промисловості, коли в умовах безпосередньої дії технологічних середовищ висувуються особливі вимоги до складу, будови і властивостей поверхневих шарів деталей. Реалізація принципу взаємного доповнення якості, в першу чергу, пов'язана з різноманітними технологічними методами нанесення захисних покриттів.

Зносостійкі покриття за типом матеріалу покриття поділяють на металеві, неметалеві, композиційні.

Металеві покриття можна поділити на такі, що їх нанесення супроводиться зміною хімічного складу основи, і такі, що пов'язані в основному з структурними перетвореннями. До останніх відносяться покриття, які отримують різноманітними методами поверхневого наклепування (зміцнювальне обкатування, дрібоструменева обробка, поверхнево-фрикційне зміцнення, лазерна обробка та ін.). Але, в умовах роботи обладнання харчових виробництв при контакті з

корозійними технологічними середовищами, вони мають обмежене застосування.

За технологічними прийомами нанесення металеві покриття можна поділити на: металургійні (поверхневе легування, біметалізація); термодифузійні (однокомпонентні та багатокомпонентні); покриття, що наносяться напиленням (газополуменеві, плазмові, детонаційні); наплавлювані (електродугові, газополуменеві, СВЧ та ін.); гальванічні; покриття, які одержують осаджуванням з газової фази; іонно-плазмові та електроіскрові покриття.

До неметалевих покриттів відносяться полімерні та склоемалеві. Наносять їх здебільшого методами занурення, умочування, напилення і обмазування. В обладнанні харчової промисловості найбільше застосування вони знайшли для підвищення корозійної стійкості в хімічно-активних середовищах. Відомі розробки М.Роменського, В.Супрунчука, Г.Тищенка по впровадженню в харчову промисловість таких захисних покриттів.

Композиційні покриття можуть мати металеві і неметалеві (полімерні, керамічні, скляні та ін.) складові і, в залежності від їх кількості, їх іноді відносять до металевих або до неметалевих. Для нанесення композиційних покриттів можуть бути використані методи порошкової металургії та різноманітні засоби напилювальної, плазмової, лазерної, гальванічної та інших технологій.

Проведені дослідження довели, що на сучасному етапі для обладнання харчової промисловості найбільш доцільними і ефективними для підвищення довговічності деталей можуть бути такі покриття: термодифузійні, газополуменеві, плазмові, гальванічні та електроіскрові. Тому розглянемо ці методи поверхневого захисту деталей від корозійно-механічного зношування більш детально.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Назвіть основні способи керування зносостійкістю деталей з урахуванням властивостей технологічних середовищ харчових виробництв.
2. Охарактеризуйте способи конструктивного забезпечення довговічності вузлів обладнання галузі.
3. Які заходи є перспективними для підвищення довговічності ножів пакувальних машин і м'ясорізальних вовчків?
4. Як застосувати ефект вибіркового переносу у парі тертя для підвищення довговічності різального комплексу вовчків?
5. На прикладі відцентрового насоса поясніть можливість застосування конструктивної модифікації для підвищення його довговічності.
6. Наведіть приклади конструктивних рішень з цукрової, пиво-безалкогольної, оліє-жирової, борошняної та інших галузей харчової промисловості, які забезпечили підвищення довговічності обладнання.

7. У яких випадках доцільно застосовувати електрохімічні методи захисту обладнання від корозійно-механічного зношування?
8. Чи можна підвищити довговічність харчового обладнання завдяки зміні умов його експлуатації?
9. Які матеріали є перспективними для виготовлення деталей харчового обладнання, що працюють в умовах корозійно-механічного зношування?
10. Які переваги матеріалів, виготовлених методами порошкової металургії, при їх застосуванні у вузлах тертя?
11. Чому застосування поверхневого захисту деталей харчового обладнання є перспективним напрямком у підвищенні його довговічності?
12. Які покриття найчастіше застосовують для захисту деталей від спрацювання?

[перейти до змісту](#)

16. Підвищення довговічності деталей обладнання термічною і хіміко-термічною обробкою

16.1. Термічна обробка деталей і їх зносостійкість

У процесі спрацювання найважливішу роль грає стан і властивості тонкого поверхневого шару деталей, формування якого відбувається при їх завершувальному обробленні. Розроблено багато способів зміни стану, структури і властивостей тонкого поверхневого шару деталей машин. Їхнє раціональне використання з урахуванням конкретних умов експлуатації і наперед заданими властивостями може значно підвищити надійність і довговічність машин і технологічного обладнання.

Термічна обробка є одним з найбільш розповсюджених методів зміни властивостей виробів. Для зміни об'ємних властивостей деталей застосовують різні методи об'ємного термічного оброблення, а для зміни поверхневих властивостей - поверхнєве загартування. В останньому випадку нагрівання може здійснюватись струмами високої частоти (СВЧ), газовим полум'ям, опроміненням лазером тощо. Полумєнєве загартування незамінне для великогабаритних деталей, а також широко використовується для зміцнення зубів великих зубчастих коліс. Загартування СВЧ підвищує втомлювальну міцність сталей на 40...100%.

Г.Прейс проводив порівняльні випробування зношування сталі 45, піддані об'ємному загартуванню і загартуванню СВЧ. При окислювальному зношуванні з невеликою швидкістю ковзання, коли лише трохи проявляється атермічне схоплювання, зносостійкість матеріалу, підданого поверхневому загартуванню, підвищується майже вдвічі. При окислювальному зношуванні з більшою швидкістю ковзання, загартування СВЧ підвищує зносостійкість на 25...40%, а при тепловому зношуванні воно переваг не дає. Значно більші можливості притаманні хіміко-термічний обробці деталей.

16.2. 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 відрізнитися від матеріалу основи.

На рис. 16.1 приведено класифікацію основних видів ХТО. Насичення поверхневого шару при ХТО може здійснюватись різними методами. Основні з них такі: насичення з порошкових сумішів (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.

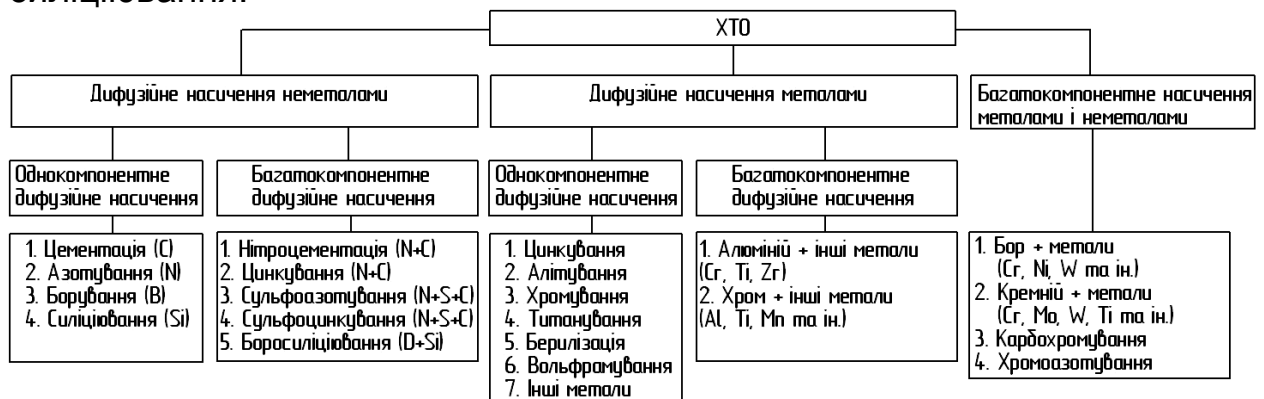


Рис. 16.1. Класифікація основних видів хіміко-термічної обробки

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 аніж 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.

16.3. Застосування хіміко-термічної обробки

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 залізобуглецевих 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.

16.4. 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 кавітаційної-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. 16.1. 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 16.1

Вплив термодифузійного хромування на кавітаційно-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. 16.2) 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.

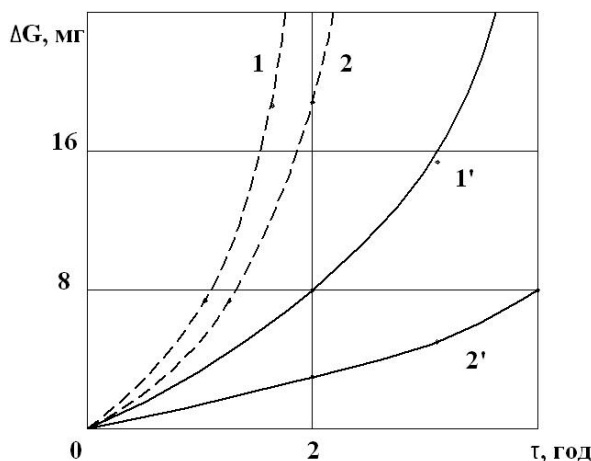


Рис. 16.2. Кінетика зношування сталей 20 (1,1') і 45 (2,2') в 3%-ному розчині кухонної солі на установці з МСВ: 1,2 – без покриття; 1', 2' – після іонного азотування

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.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте способи проведення загартування деталей і вплив такого зміцнення на їх зносостійкість.
2. Назвіть методи проведення хіміко-термічної обробки (ХТО) деталей.
3. Чому лікерний метод є перспективним для зміцнення деталей обладнання галузі?
4. Чому багатокомпонентні покриття забезпечують більшу довговічність деталей обладнання у порівнянні з однокомпонентними?
5. Які покриття, отримані методами ХТО, можна рекомендувати для підвищення довговічності деталей обладнання цукрових заводів?
6. Які покриття є перспективними для підвищення довговічності обладнання виноробних заводів?
7. У чому переваги іонного азотування деталей у порівнянні з пічними? Наведіть приклади його застосування для підвищення довговічності обладнання.

8. Опишіть сутність термодифузійного хромування і наведіть приклади його використання для підвищення кавітаціо-ерозійної стійкості деталей технологічного обладнання.

[перейти до змісту](#)

17. Підвищення довговічності деталей напиленням і наплавленням захисних покриттів

Захисні покриття на деталі обладнання можуть наноситись в газоподібному і пароподібному стані, з розчинів, у твердому стані, хімічним та фізичним осадженням з парової або з газової фази, гарячим зануренням, наплавкою, термічним напиленням, напайкою, спіканням, хімічними методами, металізацією та іншими способами.

За останні три десятиріччя практика зміцнення та відновлення деталей поповнилась методами газотермічного напилення покриттів (ГТНП). Цьому сприяла поява в чорній металургії промислового виробництва легованих порошків, що забезпечило широке застосування газотермічних методів у народному господарстві.

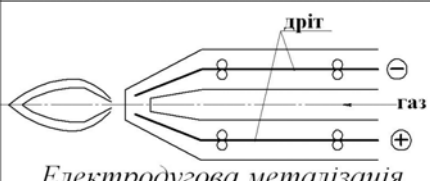
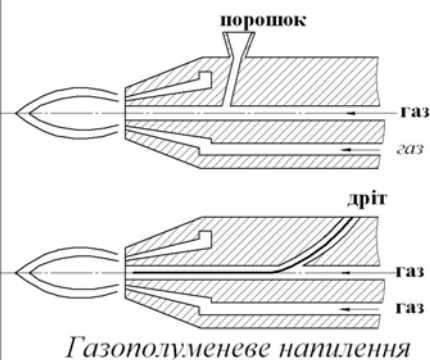
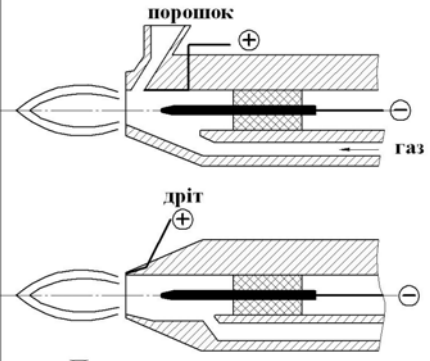
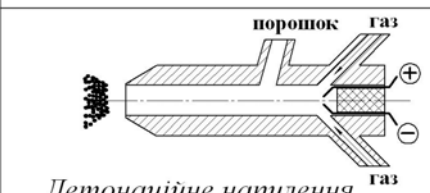
Згідно з ГОСТ 28076-89 **газотермічне напилення** — це процес отримання покриття з нагрітих і прискорених часток напилюваного матеріалу з застосуванням високотемпературного газового струменя, при співударі яких з основою забезпечується їх з'єднання за рахунок зварювання, адгезії та механічного зчеплення. При газотермічному напиленні частинки напилюваного матеріалу в високотемпературній зоні напилюючих пальників нагріваються до розплавлення або високопластичного стану. Газовим або плазмовим потоком їм надається висока швидкість польоту, яка забезпечує енергію співудару, достатню для утворення міцного фізико-хімічного зв'язку напилюваного матеріалу з деталлю.

Методи ГТНП мають цілий ряд переваг перед іншими способами нанесення покриттів: висока продуктивність процесу напилення; незначна температура нагрівання поверхні деталі (не вище 200-300⁰С); універсальність у використанні матеріалів покриттів; можливість покривати відкриті поверхні габаритних виробів і конструкцій, у тому числі листових, тонкостінних і можливість напилювати покриття на поверхні не тільки металів, а і пластмас, кераміки, графіту, дерева й інших матеріалів; відносна простота технології самого процесу напилення.

Серед матеріалів ГТНП найбільш поширеними є методи електродугової металізації, газополуменевого та детонаційного напилення (табл. 17.1).

Таблиця 17.1.

Методи газотермічного напилення

<i>Схема напилення</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Область використання</i>
 <p><i>Електродугова металізація</i></p>	<p><i>Висока продуктивність, проста технологія, мобільність обладнання</i></p>	<p><i>Нанесення покриттів з спеціальними властивостями і ремонтні роботи з використанням дроту</i></p>
 <p><i>Газополуменеве напилення</i></p>	<p><i>Простота обладнання і технології та мобільність обладнання</i></p>	<p><i>Нанесення покриттів з спеціальними властивостями і ремонтні роботи з використанням дроту і порошків</i></p>
 <p><i>Плазмове напилення</i></p>	<p><i>Можливість нанесення тугоплавких матеріалів, підвищена щільність покриття і міцність зчеплення з основою</i></p>	<p><i>Нанесення покриттів з спеціальними властивостями і відновлення деталей з використанням дротяних і порошкових матеріалів</i></p>
 <p><i>Детонаційне напилення</i></p>	<p><i>Можливість нанесення тугоплавких матеріалів, висока міцність зчеплення і щільність покриттів</i></p>	<p><i>Нанесення покриттів з спеціальними властивостями і ремонтні роботи з використанням дисперсних порошків</i></p>

17.1. Газополуменеві покриття

При газополуменевому напиленні температура киснево-ацетиленового полум'я не перевищує 3200⁰С, а швидкість польоту частинок порошку становить декілька десятків метрів за секунду. Це обумовлює високу пористість і невелику міцність зчеплення з основою газополуменевих 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 2000⁰С, на відстані 100 мм — 1900⁰С, 150 мм — 1400⁰С.

Залежно від призначення та матеріалу деталей, умов їх експлуатації, при відновленні розмірів і зміцненні деталей використовують такі способи газополуменевого 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 - B - 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 ацетилена типу ГЗУ-3 і ГЗУ-4, які широко застосовуються в зварювальному виробництві.

Найбільш часто для газотермічного напилення в Україні використовують порошки Торезького заводу наплавлених 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. 17.2.

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 - 700⁰С. 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.

Таблиця 17.2.

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.

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 700⁰С) 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 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.

Терморреагуючий 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 напилувати 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), «Plazmatech 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 роликком.

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. 17.1). 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.

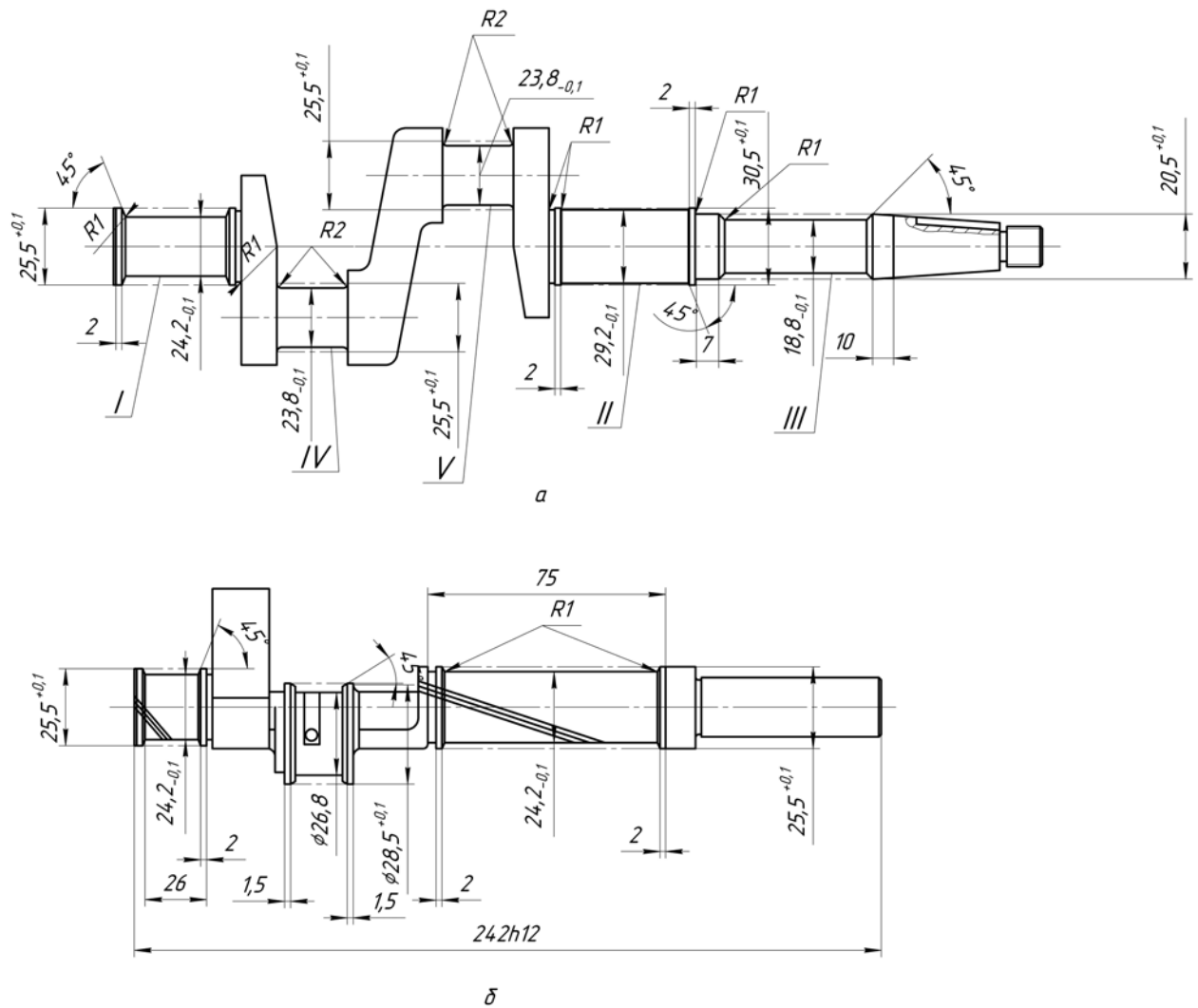


Рис. 17.1. Колінчастий (а) та ексцентриковий (б) вали холодильних компресорів ФАК-0,7У і ВСе 0,7 (пунктиром і цифрами I-IV - поверхні, які відновлювали)

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. 17.2), 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% карбиду вольфраму. Для нікелевих самофлюсованих сплавів системи Ni - Cr - В - 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 опаленням його

при температурі 1040-1060⁰С. Оплавлення покриття забезпечує його високу щільність, безпористість і гарантує утворення дифузійної зони на межі покриття з сталеву основою (рис. 17.3), що забезпечує достатній рівень зчеплення з деталлю.

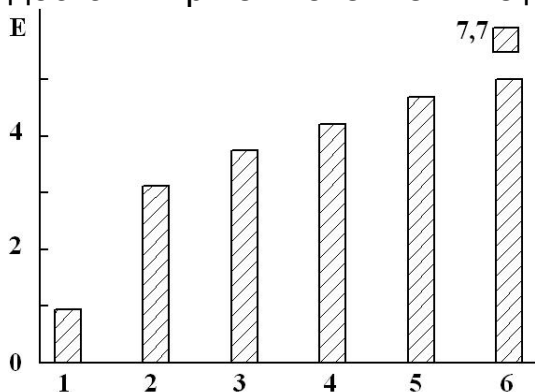


Рис. 17.2. Відносна зносостійкість матеріалів в умовах абразивного зношування: 1 – сталь 45; 2 – ПГ-12Н-01; 3 – ПГ-12Н-02; 4 – ПГ-10Н-01; 5 – ПГ-10К-01; 6 – ПС-12НВК-01

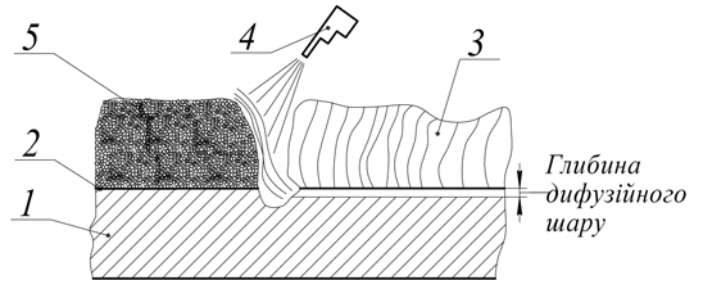


Рис. 17.3. Схема оплавлення самофлюсованого порошку: 1 – деталь; 2 – оксидна плівка; 3 – оплавлене покриття; 4 – газовий пальник; 5 – напилене покриття

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. 17.4) зазвичай виготовляють із сталі Ст3, піддають цементації і термообробці до 240-250 НRV. Втулки виготовляють із сталі Ст5, а пластини зі сталі Ст3 без термообробки. Деталі ланцюгів працюють при швидкості ковзання 0,05 м/с і навантаженні 45-50Мпа.

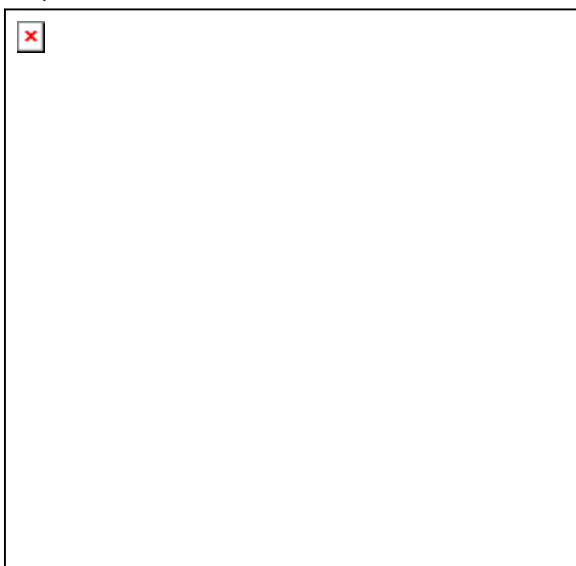


Рис. 17.4. Ланка втулко-роликового ланцюга бурякоелеватора: 1 – палець; 2 – причепний палець; 3 – ківш; 4,5,6 – пластини; 7 – втулка; 8 – шплінт; 9 – шайба; 10 – упор

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 газополуменевими 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.

17.2. Плазмові покриття

Плазмове напилення — це подальший розвиток металізації напиленням (див. табл. 17.1). 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.

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».

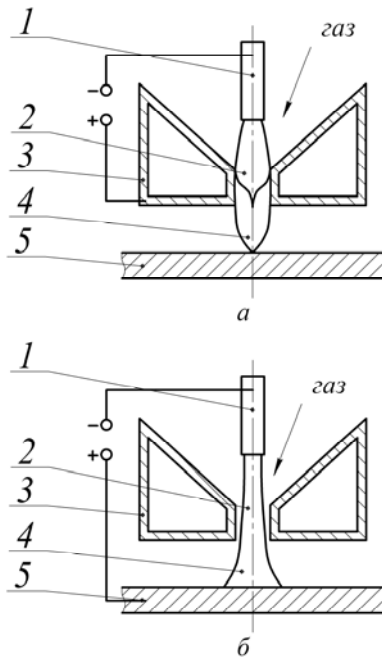


Рис. 17.5. Схема будови плазмотронів з дугою побічної (а) та прямої (б) дії: 1 – електрод; 2 – електрична дуга; 3 – охолоджуване водою сопло; 4 – плазмовий струмінь; 5 – деталь

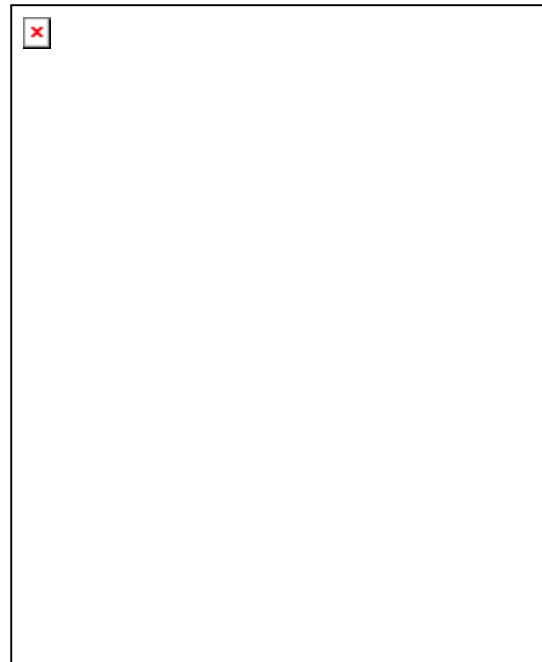


Рис. 17.6. Схема будови плазмотрона з дугою комбінованої дії: 1 – електрод; 2 – джерело живлення дуги побічної дії; 3 – внутрішнє сопло; 4 – плазмовий струмінь побічної дії; 5 – зовнішнє сопло; 6 – плазмовий струмінь прямої дії; 7 – джерело живлення дуги прямої дії; 8 – деталь

Для плазмового напилення можна використовувати всі ті матеріали, які використовуються для газополуменевого 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 , плазмотексту - 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. 17.7) 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.

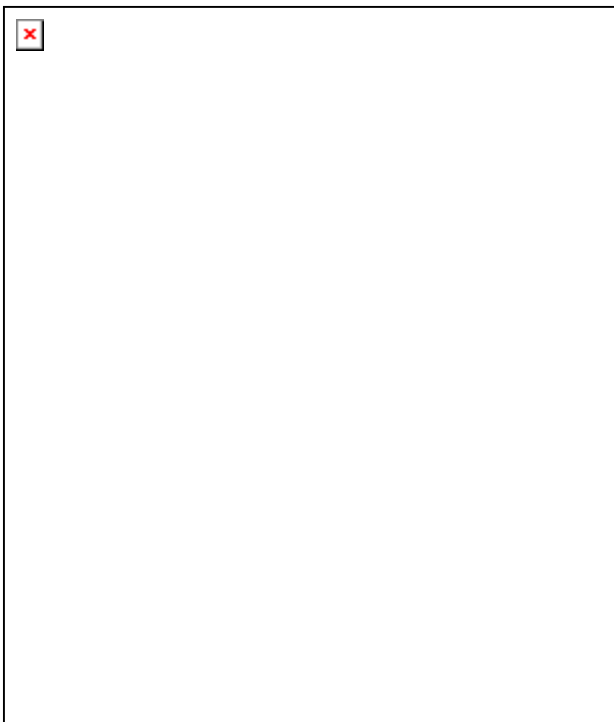


Рис. 17.7. Схема камери для машини тертя СМЦ-2: 1 – колодка; 2 – диск; 3 – сальник; 4 – термометри; 5 – змійовик; 6 - корпус

Дослідження показали (рис. 17.8), 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 окиду хрому і титанового 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.

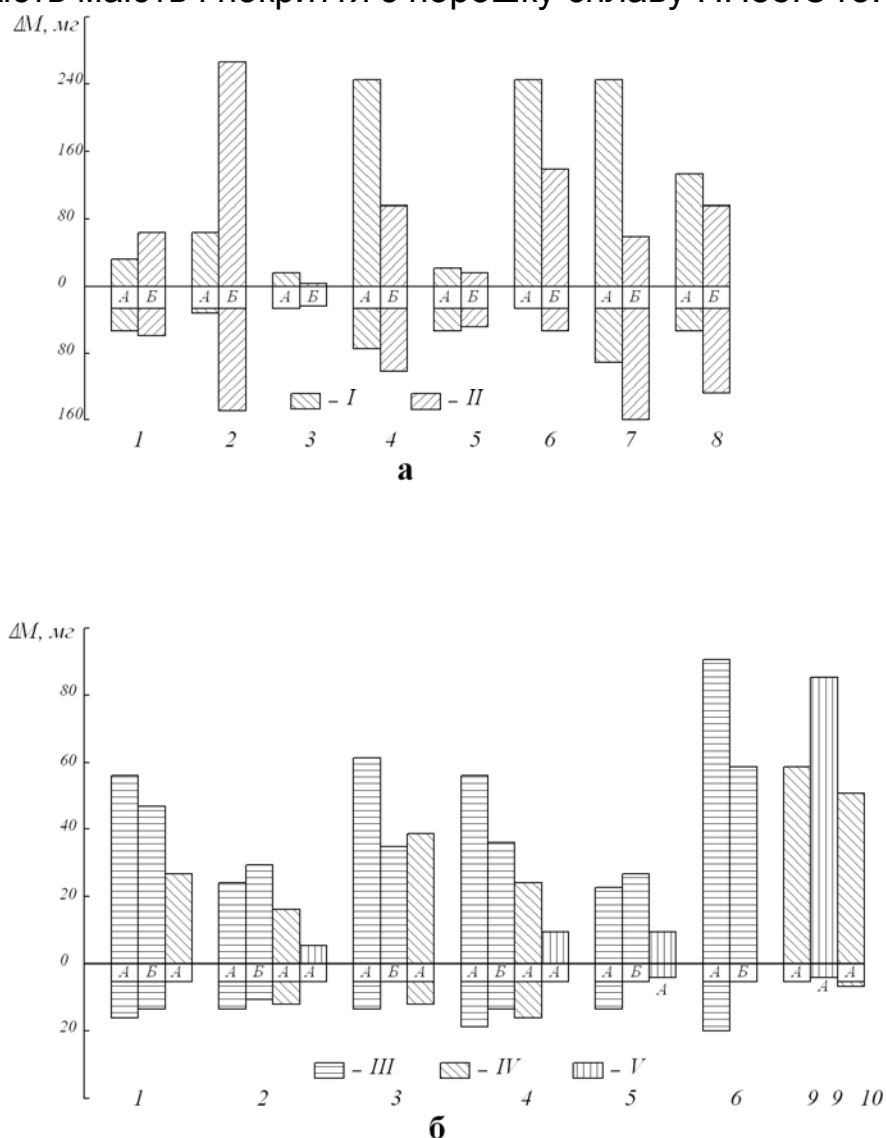


Рис. 17.8. Втрата маси ΔM покриттів з порошоків: нікельалюмієвого сплаву(1); окиду хрому (2); рутилового концентрату (3); нормального (4) і титанового (5) електрокорунду; бронз Бр А10 (6) і Бр 010 (8); плазма тексу ОТЗ (7); ПГ-19М-01 (9); ПТ-19Н-01 (10) і контртіл із сталі 45 (А) і чавуну СЧ20 (Б) при сухому терті (I,II) – а, в модельних розчинах тіста (III), бурякоцукрового виробництва (IV) і в молочній сиворотці (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. 17.8). 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 рН4,5 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 застосованні 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. 17.3). 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-механічний, а супутнім — абразивний. В ущільненнях насосів для перекачування транспортерно-мийної води і вапняного молока провідним є абразивний, а супутнім — корозійно-механічний знос (рис. 17.9).

Таблиця 17.3.

Середньодобовий знос І захисних втулок відцентрових насосів, їх відносна зносостійкість ε і вплив плазмових покриттів на знос

Технологічне середовище	I, 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-мийна 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

Виробничі випробування захищених втулок показують, що застосування плазмових покриттів може підвищити їх зносостійкість в 3-9 разів за умови правильного вибору захисних покриттів та виконанні всіх вимог технології плазмового напилення. За даними цукрових заводів, застосування зміцнених втулок дало змогу зменшити в 2-5 разів втрати напівпродуктів цукрового виробництва.

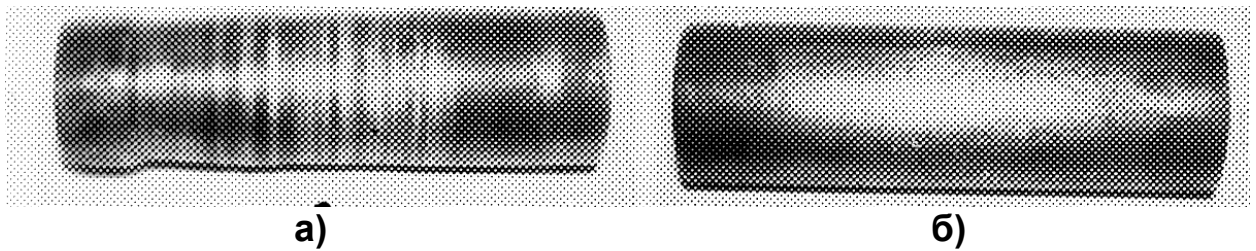


Рис. 17.9. Захисні втулки (Ст 3) відцентрових насосів для перекачування транспортерно-мийної води на цукровому заводі: а – після 80 діб експлуатації; б – відновлена та зміцнена плазмовим напиленням порошком ПГ-10Н-01 з наступним оплавленням

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. 17.10) 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.

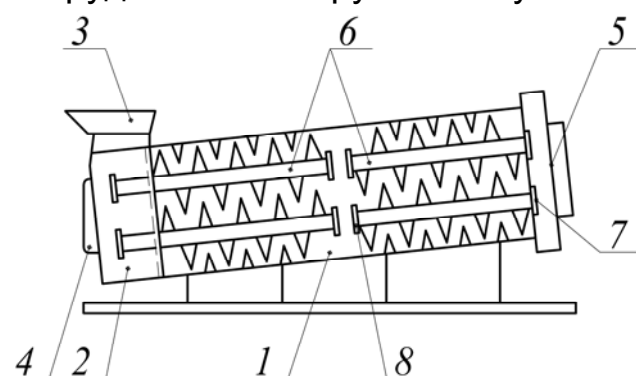


Рис. 17.10. Схема пошкодженого дифузійного апарата типу ПДС-20: 1 – корпус; 2 – камера; 3 – шахта; 4,5 – нижній та верхній приводи; 6 – шнек; 7,8 – зовнішня та внутрішня підшипникові опори

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-ТiВ₂ (марки ТН), 12Х18Н9Т - TiB₂ - CrB₂ (ХТН) і 12Х18Н9Т-TiB₂-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. 17.4).

Таблиця 17.4.

Хімічний та фазовий склад порошкових евтектичних сплавів

Сплав	Вміст компонентів, мас. %							Фазовий склад		Вміст зміцнюючих фаз, об. %
	Cr	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-ЗД. 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. 17.5).

Таблиця 17.5.

Інтенсивність (I_k) і швидкість (h_k) корозії сталі 12Х18Н9Т 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
12Х18Н9Т	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. 17.6). 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 нерівноважним 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 17.6.

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 напиленням у решітці (рис.17.11) 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. 17.11. Схема плазмового напилення м'ясоподрібнювальної решітки: 1 – електрод; 2 – електрична дуга; 3 – сопло; 4 – плазмовий струмінь; 5 – транспортер бронзи; 6 – екран; 7 – решітка

Технологічний процес плазмового напилення включав такі основні операції: підготовку порошків, налагодження обладнання, механічне оброблення та знежирювання

деталей, напилення 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. 17.12).

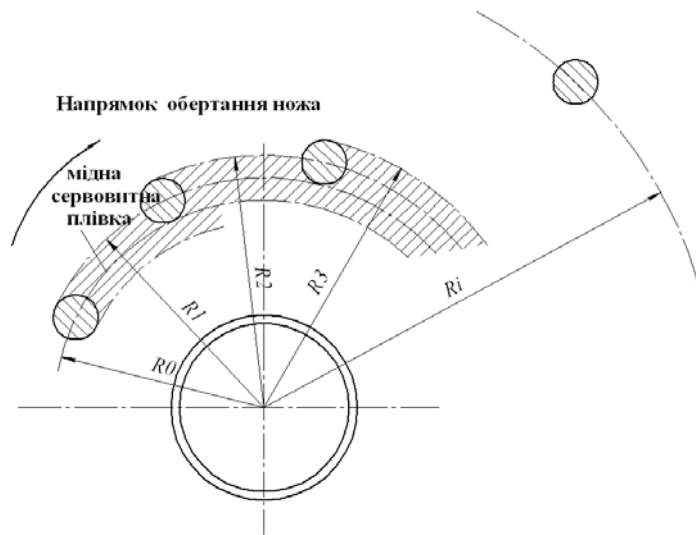


Рис. 17.12. Схема розміщення напилених плазмою вставок на решітці м'ясоподрібнювального вовчка

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

$$R_i = R_{i-1} + D_B / n, \quad (17.1)$$

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. 17.7).

Таблиця 17.7.

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, зменшенням 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 напиленням, 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. 17.13,а) термін служби вхідних 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. 17.13,в). Зносостійкість вітчизняних наплавлених конусів наблизилась до зносостійкості імпортних, виготовлених способами порошкової металургії з твердих сплавів.

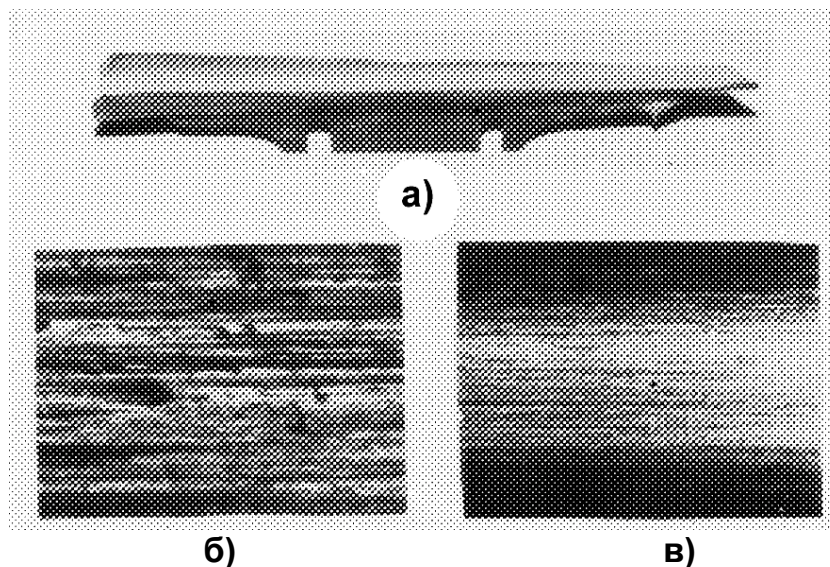
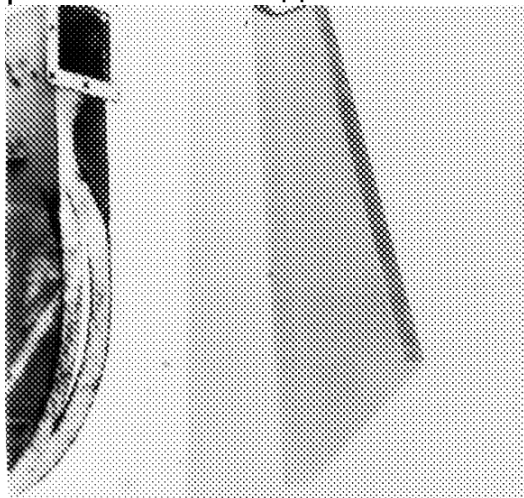


Рис. 17.13. Вхідний конус цигаркової машини, зміцнений плазмовою наплавкою самофлюсованого сплаву ПС-12НВК-01 (а) та зношені поверхні серійного (б) і зміцненого (в) конусів після 40 годин експлуатації

Для 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.17.14,а), а зносостійкість крильчатки обумовлена зносостійкістю лопаті. Для захисту від абразивної ерозії радіусна частина корпусу

вентилятора та лопаті крильчатки були зміцнені плазмовими покриттями порошком електрокорунду Мн28 з прошарком порошку ПН85Ю15 (рис.17.14,б). Зміцнення вказаних деталей дозволило в 3-4 рази збільшити довговічність вентиляторів.



а б

Рис. 17.14. 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 хлібо заводах можна виділити такі деталі і вузли для захисту і відновлення плазмовими та газополуменевими покриттями: опорні ролики хлібопекарських печей, вали шестерінчастих насосів, робочі органи тісто змішувачів, 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 СОТ, НД, НПСФ для перекачування технологічних середовищ, пальців бурякоелеваторів і транспортерів та ін.

В молочній промисловості відновленню газотермічним напленням 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 наплення та наплення: 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 наплення. Але більш доцільною є організація спеціалізованих дільниць газотермічного наплення.

17.3. 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 наплення 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 газополуменевого і плазмового струменя.

При детонаційному напленні висока (в тисячі разів більша, ніж при газополуменевому напленні) 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 газополуменевого 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. 17.15).

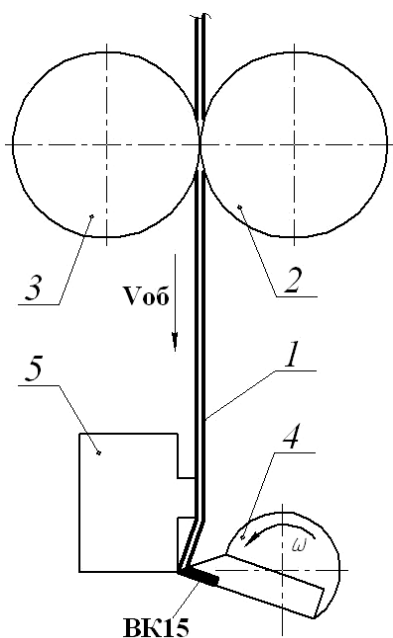


Рис. 17.15. Схема поперечного перерізу паперорізального вузла ірисозагорткового автомата ІЗМ: 1 – обгортка; 2,3 – ролики; 4 – вал з обертовим ножом; 5 – нерухомий ніж

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. 17.16) пояснюється тим, що спочатку лезо заокруглюється на дільниці твердого 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

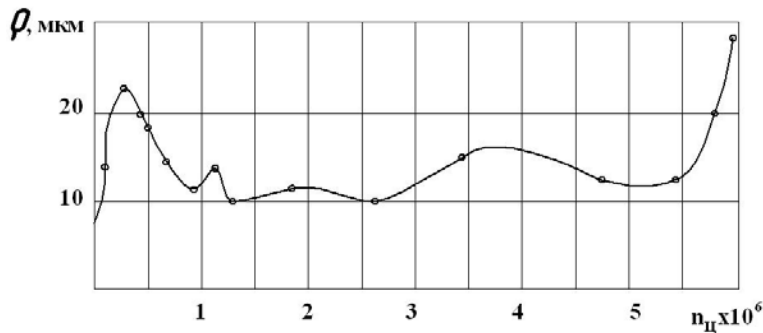


Рис. 17.16. Зміна радіуса заокруглення ножа залежно від кількості різальних циклів

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 сталеву 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 (опис технології подано у розділі 18).

Авторами були зміцнені і відновлені колінчасті вали, поршневі пальці та ексцентрики холодильних машин (табл.17.8). 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 17.8.

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	Поршневий 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.17.9. Вони підтверджують високу зносостійкість трибоспряжень лопать-ротор та лопать-паз циліндра, що зміцнені нітридами титану і нітридом ванадію на установці 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 – С – Si – Ti.

Таблиця 17.9.

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

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.

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 трибоспряжень в 5 - 6 разів (табл.17.9.); б) використання запропонованих покриттів для відновлення деталей герметичних компресорів холодильних машин збільшує ресурс роботи компресорів та терміни проведення капітальних ремонтів; в) середній ресурс роботи трибоспряжень 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).

17.4. 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 алюмініування 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 поєнанні з традиційними фарбовими покриттями – 35-40 років.

Алюмініуванням 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 алюмініування 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 дrotів 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, АМ_ц (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 газополуменевого і плазмового напилення за виключенням напилювальних пристроїв та типів газів.

17.5. Корозійна стійкість газотермічних покриттів на деталях харчового обладнання

Переважає більшість деталей харчового обладнання контактує з корозійно-активними технологічними середовищами. Особливо інтенсивно руйнуються деталі, що працюють у кислих середовищах, наприклад, у молочній кислоті. Тому їх потрібно виготовляти з дорогої

нержавіючої сталі або захищати від корозії за допомогою антикорозійних покриттів.

Корозійним випробуванням підлягали покриття з порошку нержавіючої сталі I2X18H9T, нанесені плазмовим напиленням на листову сталь Ст3. Швидкість корозії матеріалів оціювалась ваговим методом. Першими ж дослідями було встановлено, що ці покриття руйнуються в 38%-му водяному розчині молочної кислоти зі швидкістю $7 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с), що у два рази перевищує швидкість корозії матеріалу основи. В той же час швидкість корозії листової сталі I2X18H9T становить всього $3,5 \cdot 10^{-8}$ кг/(м²·с), що більш ніж у 200 разів перевищує її стійкість в покритті. Встановлена різниця у швидкостях корозії суцільних і напилених плазмовим струменем пористих матеріалів свідчить про те, що агресивне середовище діє на всі доступні поверхні зразків. Подібною була поведінка покриттів в інших кислих харчових середовищах (дифузійному буряковому соці, кислій жомовій воді тощо). Було встановлено, що зміна складу агресивного середовища зумовлює однакові відносні зміни швидкості корозії конструкційних матеріалів і самих газотермічних покриттів.

Проведений аналіз показав, що існуючі зв'язки корозійної стійкості з товщиною покриттів неоднозначні. З одного боку збільшення товщини шару попереджає доступ агресивного середовища до поверхні, а з іншої – через пористість покриттів збільшується фактична реакційна поверхня.

Для кількості оцінки оптимальної товщини нанесених плазмою захисних шарів, треба було попередньо розглянути умови зчеплення матеріалу покриття з підкладкою, фактори, що впливають на розтікання крапель металу по поверхні, та вплив на ці процеси технологічного режиму напилення захисного покриття. Оцінюючи розмаїття факторів, які впливають на формування газотермічного покриття, за допомогою ПЕОМ встановлено, що основним з них є швидкість зіткнення плазмово-металевої суміші з деталлю. Доведено, що при швидкості 100 м/с крапля захисного металу розтікається по поверхні деталі настільки інтенсивно, що теплової енергії, яку вона акумулює, достатньо для приварювання до основи лише 10% площі сплющеної краплі. Із зниженням швидкості плазми до 25 м/с площа приварювання буде близькою до площі міделевого перетину краплі. При цьому крапля набуде напівсферичної форми, а частка привареної поверхні виросте приблизно в 3 рази порівняно з варіантом, що відповідає швидкості 100 м/с. Це докорінно змінює існуючі уявлення про вплив швидкості плазмово-металевого струменя на якість газотермічного покриття, особливо якщо воно призначене для захисту від корозії.

Розглянуту кінетику формування газотермічних покриттів можна використати для оцінювання розвитку корозійних процесів у разі

взаємодії з агресивними харчовими середовищами і для визначення оптимальної кількості корозійностійкого металу, який застосовується для формування захисного покриття.

З певним наближенням можна записати таке рівняння для швидкості корозії одиниці поверхні виробу в агресивному середовищі, кг/(м²·с):

$$W_1 = 2(1-S)K_n + (1-S)K_0, \quad (17.2)$$

де S – частка поверхні виробу з привареними краплями матеріалу покриття; K_n – швидкість корозії одиниці поверхні матеріалу покриття; K_0 – швидкість корозії одиниці поверхні матеріалу основи деталі.

Нанесення наступного шару порошкового покриття створює додаткову поверхню, на якій буде розчинятися матеріал захисного покриття, але доступ до відкритої поверхні основи зменшиться. Імовірність доступу до поверхні основи для двох шарів буде $(1-S)^2$, а для n шарів – відповідно $(1-S)^n$. Аналогічно поверхня покриття, що буде реагувати з агресивним харчовим середовищем, становитиме $2n(1-S)^2$. Отже, швидкість корозії виробу з покриттям, яке складається з n шарів, буде такою:

$$W_n = 2n(1-S)K_n + (1-S)^n K_0. \quad (17.3)$$

Якщо продиференціювати це рівняння за кількістю шарів n і прирівняти похідну до нуля, то дістанемо умову, яка визначає оптимальну кількість шарів для забезпечення максимальної корозійної стійкості покриття (загальновідомий пошук екстремуму):

$$W'_n = 2K_n + K_0 \ln(1-S) \cdot (1-S)^n = 0. \quad (17.4)$$

Розв'язавши це рівняння відносно n і прологарифмувавши його, отримаємо:

$$n = \ln\left(\frac{2K_n}{K_0} \ln|1-S|\right) / \ln|1-S| \quad (17.5)$$

Підставивши у це рівняння значення $K_n/K_0=100$ і $S=0,1$, визначимо, що при такому співвідношенні швидкостей корозії покриття і основи оптимальним буде плазмове покриття, яке складається з 16 шарів. У 38%-й молочній кислоті оптимальній стійкості покриття, яке складається з 16 шарів ($K_n=3,5 \cdot 10^{-8}$ кг/(м²·с)), відповідає швидкість корозії виробу ($K_0=3,5 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с)), яка становить 47% швидкості корозії підкладки, за умови, що $S=0,1$. А тому таке покриття буде малоефективним, незважаючи на те, що монолітний матеріал покриття має в 100 разів більшу стійкість, ніж основа.

Якщо швидкість корозії матеріалу покриття буде в 1000 разів менша від швидкості корозії основи, то оптимальним буде покриття, яке складається з 38 шарів. У цьому випадку його швидкість корозії

становитиме всього 8,6 % швидкості корозії підкладки. Отже, чим вища стійкість захисного матеріалу, тим доцільніше наносити більшу кількість шарів покриття.

Щоб підвищити корозійну стійкість і міцність зчеплення покриття з основою, з одночасним зменшенням його товщини, можна використовувати ущільнювальні порошки деяких фторидів, які гальмують розтікання крапель покриття і одночасно відновлюють оксидну плівку на поверхні деталі в процесі плазмового напилення.

Запропонована методика визначення оптимальної кількості шарів газотермічного антикорозійного покриття дає можливість у більшій мірі реалізувати потенціальні можливості захисних матеріалів.

17.6. 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 пасти і зеленого горошку, в цукро-рафінадному — для деталей автоматичних ліній типу "Шамбон" пресування швидкокорозійного 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 180-200⁰С, поліпропілену — 220-240⁰С, а фторопласту — 260-270⁰С.

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: шпатльовки, 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 сталеві 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 почалися 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 сталеві 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 280⁰С, 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.

17.7. 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, 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 епоксиам'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 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-етинолем 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.

Нагріваючі 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. Нагріваними 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.

Світловідбиваючі 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: диоксид 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 сополімервінілхлоридн (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, тіоколові 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, солоні 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, покритої склоемаллю, 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, бориди важкоплавких металів, а також складні з'єднання (карбонітриди, карбобориди 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 газополуменевою наплавкою і «холодним напиленням»?
3. Які горючі і плазмо утворюючі гази найчастіше застосовують при газотермічному зміцненні деталей?
4. Назвіть самофлюсовані сплави вітчизняного виробництва для газополуменевого напилення і наплавки.
5. Як збільшити твердість і зносостійкість самофлюсованих сплавів?
6. Які сплави варто застосовувати для відновлення і зміцнення колінчастих і ексцентрикових валів холодильних компресорів?
7. Які порошкові сплави найстійкіші в умовах абразивного зношування?
8. Назвіть основні ознаки низькотемпературної плазми.
9. Які матеріали можна застосовувати для плазмового зміцнення і відновлення деталей?
10. Назвіть основні операції технологічного процесу плазмового напилення.
11. Які порошкові матеріали найбільш ефективні для захисту деталей від спрацювання в кислих технологічних середовищах? Наведіть приклади їх застосування.
12. Чому порошковий матеріал ПН55Т45 є найбільш ефективним для захисту транспортних систем нахилених дифузійних апаратів цукрових заводів?
13. Які порошкові сплави можна застосовувати для підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості деталей?
14. Як підвищити зносостійкість різального комплексу м'ясоподрібнюючих вовчків з використанням плазмового напилення і ефекту вибіркового переносу матеріалів?
15. Якими порошковими сплавами доцільно зміцнювати деталі обладнання тютюнових фабрик?
16. Назвіть типові деталі харчового обладнання, які можна відновлювати і зміцнювати газотермічним напиленням і наплавкою.
17. Назвіть основні переваги детонаційного напилення у порівнянні з іншими методами газотермічного зміцнення деталей.
18. Як реалізувати ефект само загострення різальних інструментів пакувальних автоматів за допомогою детонаційних покриттів?
19. Які економнолеговані захисні покриття є ефективними для відновлення деталей холодильних компресорів?
20. В чому переваги покриттів, які нанесені на деталі методом ЕЛМЕТ, у порівнянні з лакофарбовими?
21. Опишіть технологічний процес захисту деталей від зносу і корозії за допомогою електрометалізації.

22. Де в харчовій промисловості можна застосувати метод ЕЛМЕТ. Назвіть відомі Вам приклади.
23. Яка кількість шарів захисного газотермічного покриття може забезпечити повний захист деталі від корозії?
24. Які властивості полімерних і металополімерних покриттів забезпечують їх широке використання і харчовій промисловості?
25. Які покриття з спеціальними властивостями застосовують на харчових, мікробіологічних і фармацевтичних підприємствах?

[перейти до змісту](#)

18. Електрофізичні та електрохімічні методи підвищення ресурсу обладнання

Перспективними для використання у вузлах тертя обладнання харчових і переробних виробництв є лазерні, електроіскрові, іонно-плазмові, гальванічні та комбіновані електрохімічні покриття. Їх застосування дає можливість суттєво підвищити показники надійності і довговічності обладнання.

18.1. Лазерні технології поверхневого зміцнення деталей

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, гляндювання. 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 вибіркєву 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.

18.2. Електроіскрова та іонно-плазмова обробка деталей

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} ... 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 карбиду 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 забезпеченні перерозподілу температур в різальному лезі інструменту під час роботи, що збільшує його теплостійкість. Випробування зразків ножів загартувальних 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 легуваних і вуглецевих сталей.

Перед обробкою виробу 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 (катода) під дією електростатичного поля. Поблизу катода виникає висока напруженість електричного поля, яке розганяє іони азоту до великих швидкостей і вони, співдаряючись із зміцнювальним 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 СОТ-100 із сталі

45X на перекачуванні вапняного молока, сульфітованого соку і соків I та II сатурації мали зносостійкість в 6 разів вищу від серійних. Зносостійкість причіпних пальців бурякоелеватора була збільшена завдяки застосуванню азотування у середньому в 5...7 разів.

18.3. 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. 18.1 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. 18.2). 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.

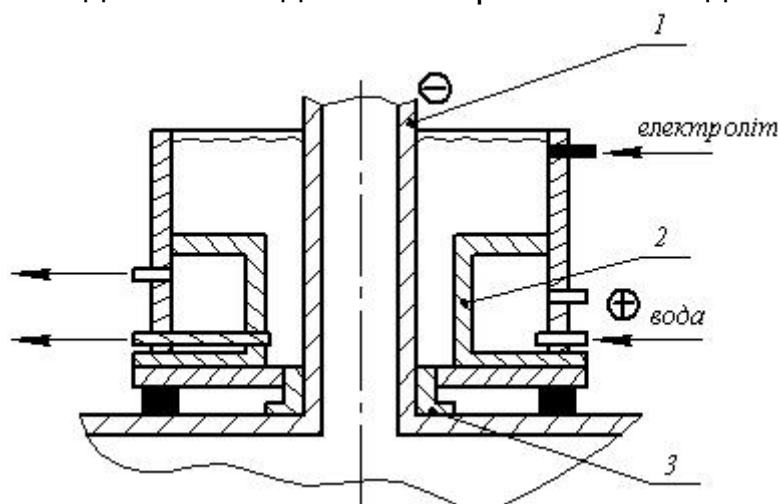


Рис. 18.1. Схема осталення зношеної шийки вала: 1 – вал; 2 – анод; 3 – вініпластові прокладки

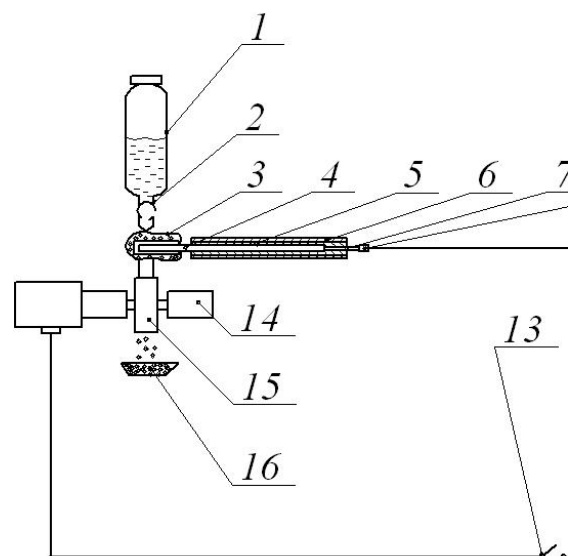


Рис. 18.2. Схема відновлення зовнішньої поверхні циліндричної деталі способом гальванічного натирання: 1 – резервуар з електролітом; 2 – трубопровід; 3 – тампон; 4 – анод; 5 – корпус анода; 6 – ізоляція; 7 – гніздо клема; 8 – клема; 9 – реостат; 10 – амперметр; 11 – випрямляч; 12 – вольтметр; 13 – вимикач; 14 – обертач; 15 – деталь; 16 – ванна

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: вольфрамвокислий 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...45⁰С. Тривалість нанесення 40 хв. Аноди нікелеві марок НПА1 та НПА2. Товщина покриття складає близько 10 мкм. Після термообробки протягом однієї години при температурі близько 400⁰С 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 800⁰С) вольфрам-нікель-азотистих покриттів і добрі триботехнічні характеристики дозволили рекомендувати їх для зміцнення опорних елементів хлібопекарських печей типу, які працюють при температурі близько 300⁰С.

Використання способу азотування сталевих деталей в електролітах з наступною термообробкою дозволило в 1,5...2 рази підвищити зносостійкість ножів пакувальних машин для загортування 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 ірисозагортуральних 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 підіймання 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. 18.3,а,б), але спочатку на поверхні тертя виникає сітка тріщин (рис. 18.3,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. 18.3,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 гідроксидів 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 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

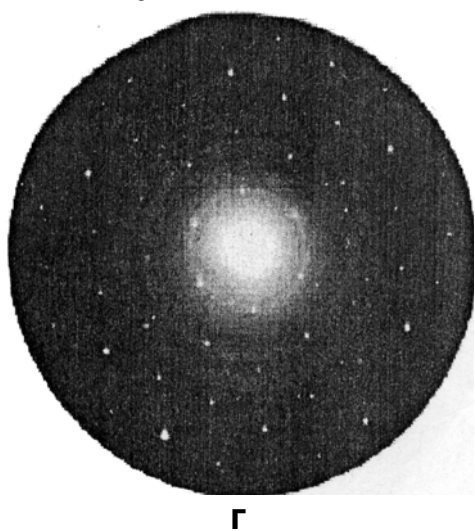
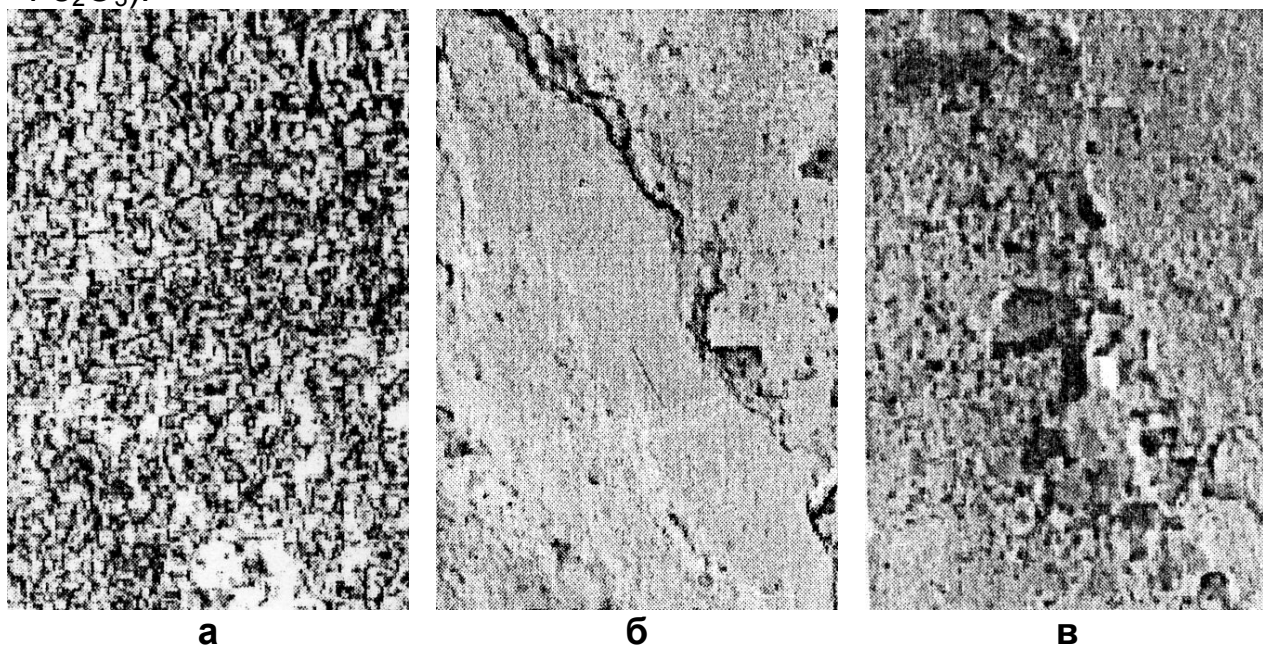


Рис. 18.3. Зношені поверхні пальців ірисозагортувальних автоматів ІЗМ з сталей 18ХГТ (а^х 200) і 45 (б,в^х 20000), загартованих до HRCe 55, та мікро електронограма оксидної плівки, видаленої з поверхні тертя (г)

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-обертowego 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. 18.4).

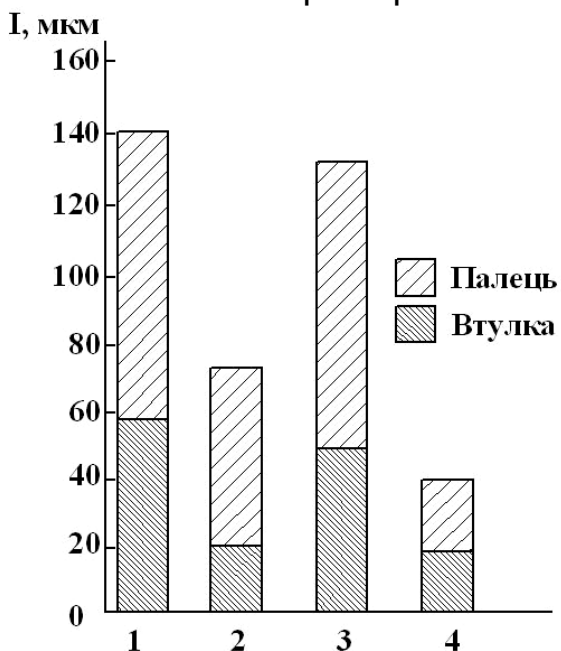


Рис. 18.4 Знос втулок із сталі 45 (HRC_e 52-55) закручуючих губок і пальців з різних матеріалів, термооброблених до твердості HRC_e 52-55, у вузлі закрутки (ірисозагортувальних машини ІЗМ після 50 робочих змін експлуатації: 1- сталь У8; 2 – 18ХГТ (цементована на глибину 0,8-1,0 мм); 3-сталь 20 (цементована 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.

18.4. Організація діляниць зміцнювальної технології

Проведені дослідження по аналізу складових витрат на нанесення покриттів різними методами: електрометалізацією, газополуменевим, плазмовим і детонаційним напиленням. При електрометалізації використовують найбільш дешевий газ — стиснене повітря, при газополуменевому та детонаційному — ацетилен і пропан-бутан, а в якості окислювача - кисень. При плазмовому напиленні використовують аргон, азот, аміак, суміш аргону з воднем, азотом, гелієм тощо. За питомими витратами на газ вартість напилення зростає в такій послідовності: електрометалізація, газополуменеве, плазмове та детонаційне напилення. Сумарні питомі витрати на технологічну операцію по нанесенню 1 кг захисного покриття характеризують ефективність способів напилення (рис. 18.5). Якщо технологічний процес передбачає оплавлення покриттів, до

витрат на напилення слід додавати витрати на оплавлення.

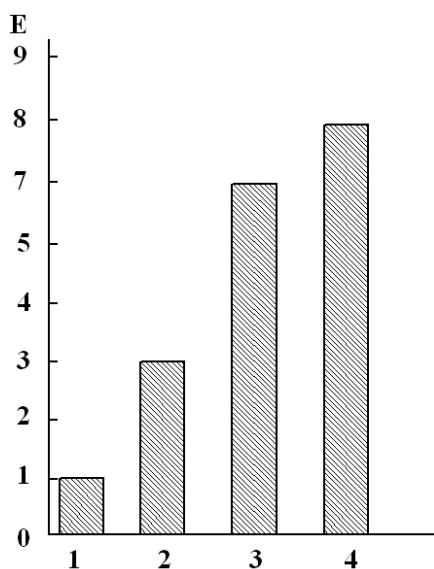


Рис. 18.5 Відносна вартість E нанесення 1 кг покриття різними газотермічними способами: 1- електрометалізація; 2- газополуменеве; 3- плазмове; 4- детонаційне напилення

Кожний з газотермічних способів нанесення захисних покриттів має свої найбільш ефективні галузі застосування. Електрометалізацію та газополуменеве напилення рекомендується використовувати в малосерійному виробництві, при виготовленні та відновленні одиничних деталей, у тому числі великогабаритних, в ремонтному виробництві, а також для антикорозійного захисту деталей і зварних конструкцій. Способи плазмового і детонаційного напилення доцільніше використовувати у крупносерійному виробництві, при виготовленні та відновленні відповідальних деталей, які потребують високих фізико-механічних властивостей напиленого шару.

Використання методів газотермічного напилення для зміцнення або відновлення деталей вимагає технологічної та організаційної підготовки виробництва і, в першу чергу, як основного документу,

технологічного регламенту. До складу технологічного регламенту входять: характеристика виробництва, опис схеми технологічного процесу, характеристика вихідної сировини та матеріалів, порядок ведення технологічних операцій, відомості оснастки та інструменту, правила техніки безпеки, розрахунок техніко-економічних показників.

Наведемо приклад організації газотермічного напилення деталей на ремонтно-монтажному комбінаті (РМК) Київської облспоживспілки, де за проектом НУХТ була створена дільниця по зміцненню та відновленню деталей (рис. 18.6). Дільниця плазмового напилення, газополуменевої наплавки і електродугової металізації призначена для газотермічного нанесення покриттів (ГТНП) на деталі харчового і торговельного обладнання (переважно на колінчасті вали холодильних компресорів).

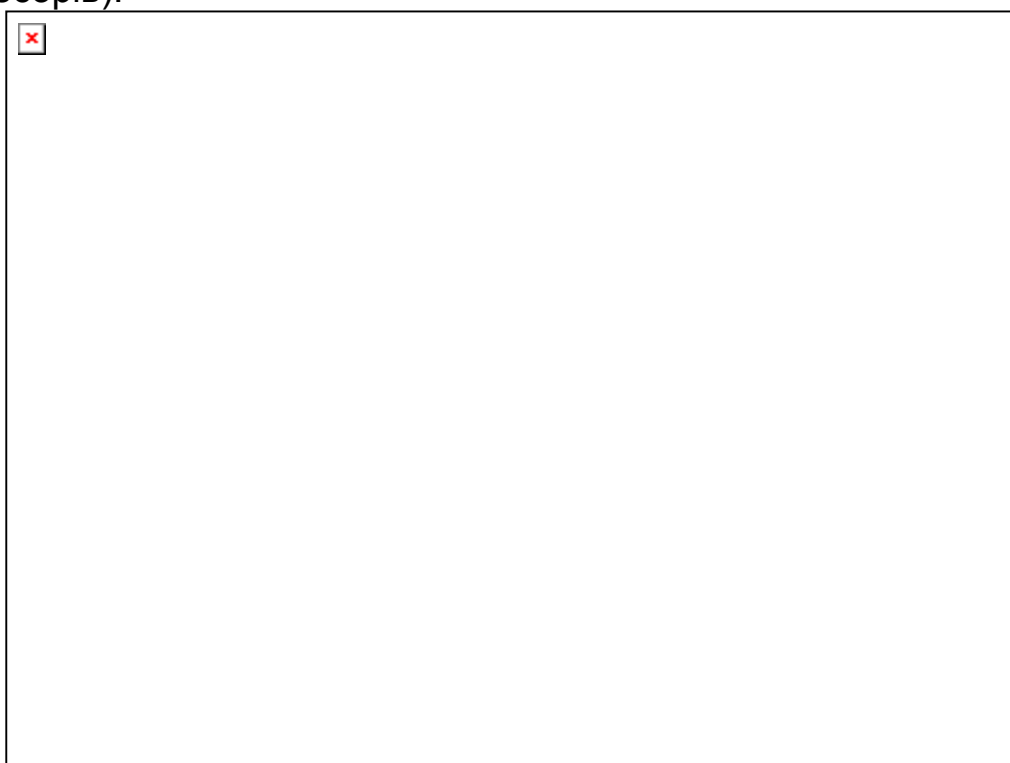


Рис. 18.6. Планування дільниці газотермічного зміцнення та відновлення деталей на ремонтно-монтажному комбінаті Київської облспоживспілки: 1 – напівавтомат плазмового напилення; 1.1 – камера напилення; 1.2 – пульт управління; 1.3 – респіраційний пристрій; 1.4 – електрична шафа; 1.5 – плазмova установка; 1.6 – джерело живлення плазмової установки; 2 – ванна для знежирювання деталей; 3 – ванна для обполіскування деталей; 4 – камера абразивоструменевої обробки; 5 – стіл зварювання, укомплектований пальником «ГН» і пістолетом «Могул»; 6 – металізаційна установка; 7 – сушильна шафа; 8 – установка для розсіювання порошоків

Технологічний процес газотермічного напилення включає такі операції: вхідний контроль деталей, знежирення, мийку і сушіння деталей, контроль очищення; абразивно-струменевоу обробку; контроль шорсткості поверхні; газотермічне нанесення покриттів; контроль якості напилення. Виходячи з цього, дільниця поділена на 4

спеціалізованих робочих місця (відділення). Відділення складування та підготовки порошкових матеріалів забезпечує вхідний контроль порошкових і дротяних матеріалів, просіювання і поділ порошкових матеріалів на фракції, їх сушіння та очищення. У відділенні знежирювання і абразивної обробки деталей здійснюється миття, знежирювання і сушіння деталей, а також надання поверхні деталі необхідної шорсткості. Відділення плазмового напилення призначене для нанесення на деталі зносостійких плазмових покриттів. Відділення газополуменевої наплавки і електродугової металізації також використовується для нанесення відповідних захисних покриттів.

Невеликі дільниці газотермічного напилення можуть бути створені безпосередньо на харчовому підприємстві в ремонтній майстерні, як це зроблено за допомогою НУХТ на Лучанському цукровому заводі.

Така невелика дільниця базується на використанні пальників для наплавлення типу ГН-1,2,3, або пістолетів типу "Могул-У9С". Будова і схема роботи наплавлювального пальника показані на рис. 18.7.

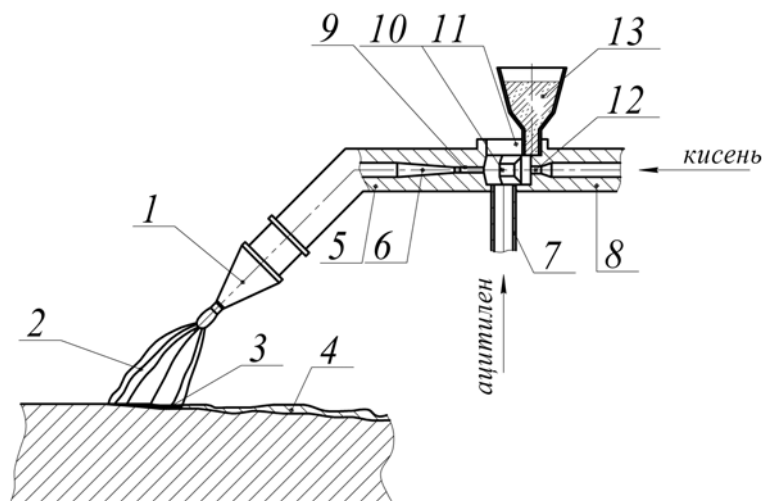
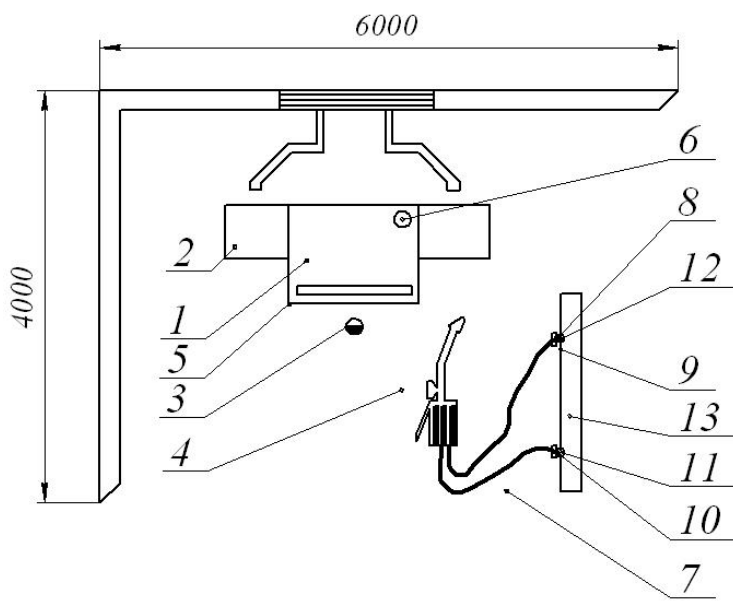


Рис. 18.7. Схема пальника типу ГН: 1 – мундштук; 2 – полум'я; 3 – зварювальна ванна; 4 – наплавлюваний шар; 5 – корпус; 6 – канал; 7 – ацетиленова трубка; 8 – киснева трубка; 9,11 – камера змішування; 10 і 12 – інжектори; 13 – бункер з порошком

Крім пристроїв для напилення дільниця газополуменевого напилення повинна включати утримувач балонів для горючого газу і окислювача, шланги для їх подачі в зону напилення.



Для забезпечення рівномірного нанесення шару покриття на деталі у вигляді тіл обертання встановлюють токарно-гвинторізальний верстат, обертач чи зварювальний маніпулятор (рис. 18.8).

Рис. 18.8. Варіант апаратурного оформлення дільниці газополуменевого напилення: 1 – зварювальний стіл; 2 – стелажі

для деталей; 3 – робоче місце металізатора; 4 – пальник ГН або пістолет «Могул»; 5 – пристрій для наплавки деталей типу вал; 6 – пристрій для наплавки деталей типу кільце; 7 – шланг кисневий; 8 – шланг пропановий (ацетиленовий); 9 – редуктор кисневий; 10 – редуктор пропановий (ацетиленовий); 11 – балон кисневий; 12 – балон пропановий (ацетиленовий); 13 – утримувач балонів

Порошки висушуються в сушильних шафі і просіюються на ситах для виділення необхідних фракцій.

Бажано забезпечити централізовану подачу кисню, ацетилену та пропан-бутану і регулювання їхнього тиску. Обов'язково повинна бути передбачена загальна і місцева вентиляція. На дільниці також повинні бути стелажі для складування заготовок і деталей.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. У чому сутність лазерного зміцнення деталей машин і обладнання?
2. Які переваги лазерної термообробки деталей?
3. Як здійснюється електроіскрове легування деталей?
4. Які переваги має ЕІЛ у порівнянні з поверхневим загартуванням деталей?
5. Назвіть деталі харчового і переробного обладнання для яких електроіскрові покриття можуть бути ефективними.
6. Як здійснюється процес зміцнення деталей на установках типу «Булат»?
7. Опишіть технологію іонного азотування сталей?
8. Назвіть приклади деталей обладнання, для яких можуть бути ефективними електролітичні покриття.
9. Опишіть технологію усталення деталей. Назвіть приклади її застосування.
10. Опишіть технологію електрофорезу і назвіть приклади її застосування для підвищення довговічності харчового обладнання.
11. Яке обладнання розташовують на дільниці газотермічного зміцнення і відновлення деталей?
12. Який спосіб нанесення газотермічних покриттів є економічно найбільш виправданим?

[перейти до змісту](#)

19. Мащення машин і механізмів

19.1. Вимоги до мастильних матеріалів

Працездатність механізмів і машин, їх довговічність суттєво залежать від трьох основних чинників: конструкції, технології (якості) виготовлення, раціонального мащення.

Питанням конструювання обладнання, технології його виробництва у відповідних дисциплінах приділяється значна увага, а мащення механізмів машин висвітлюється зовсім недостатньо, внаслідок чого інженери-механіки інколи мало інформовані про природу дії мастильних матеріалів, особливості їхнього впливу на тертя і зношування деталей машин та обладнання. Це приводить до недооцінки впливу змащувальних матеріалів на довговічність і працездатність машин, не дозволяє правильно їх вибрати для конкретних умов експлуатації технічних засобів виробництва.

Мастильний матеріал, як елемент триботехнічної системи, виконує низку таких функцій:

- знижує сили тертя, що виникають в області контакту її елементів;
- зменшує зношування та запобігає схоплюванню рухомих співдотичних поверхонь;
- відводить тепло із зони тертя;
- захищає поверхні тертя елементів системи та інші неізольовані від корозійного впливу зовнішнього середовища поверхні;
- ущільнює зазори між спряженими елементами трибосистем;
- видаляє із зони спряження деталей продукти зношування, корозії та різні забруднення.

Мастильні матеріали повинні мати такі основні властивості, незалежно від умов їх застосування чи призначення:

- забезпечувати надійне виконання своїх функцій в широкому діапазоні зміни умов використання;
- мінімально змінювати свої властивості в процесі експлуатації;
- не впливати на властивості контактуючих з ними матеріалів;
- мати належні екологічні характеристики (бути пасивними по відношенню до зовнішнього середовища, мінімально пожежо- та вибухонебезпечними, мати здатність до багатократної регенерації та повної утилізації тощо);
- виготовлятися з легкодоступної сировини та мати невисоку вартість.

Змащувальна ефективність мастильного матеріалу залежить від багатьох взаємопов'язаних чинників, що у сукупності визначають характер дії на процес тертя і зношування змащуваних поверхонь, а саме від:

- властивостей самого змащувального матеріалу, у тому числі від його трансформації в процесі експлуатації;

- стану і властивостей поверхонь тертя та їхньої зміни протягом експлуатації;
- характеру взаємодії між компонентами мастильного матеріалу, поверхнями тертя і плівками, які утворюються на них;
- параметрів режиму тертя (швидкості, навантаження, температури тощо).

Взаємодія зазначених факторів має складний і суперечливий характер. Додаткової складності додає нестабільність властивостей більшості з них внаслідок зміни умов роботи змащуваних поверхонь, що ускладнює раціональний вибір мастильного матеріалу.

Як мастильні матеріали використовуються речовини в різних агрегатних станах - газоподібному і змішаному (аерозолі, емульсії), рідкому, пластичному і в твердому.

В харчовій і переробній промисловості та галузевому машинобудуванні використовуються такі основні типи мастильних матеріалів: рідкі (переважно мінеральні, органічні і синтетичні оливи), пластичні або густі (мазі), тверді, або газоподібні. Тому розглянемо їх докладніше.

19.2. Класифікація, властивості і маркування олив

Мінеральні (нафтові) оливи складаються із основи (базової оливи) і синтетичних добавок, які сприяють покращенню її властивостей. Синтетичні оливи отримують із різної вихідної сировини багатьма методами (каталітична полімеризація рідких і газоподібних вуглеводнів і нафтової сировини, синтез кремнійорганічних сполук).

Оливи за призначенням поділяються на: моторні, індустріальні, трансмісійні, гідравлічні, турбінні, компресорні, електроізоляційні, консерваційні, технологічні, спеціальні.

Моторні оливи використовуються для поршневих двигунів внутрішнього згоряння (бензинових, дизельних і авіаційних).

Трансмісійні оливи призначені для мащення механічних і гідромеханічних передач.

Індустріальні оливи призначені для зменшення коефіцієнту тертя в вузлах тертя промислового обладнання. Водночас вони призначені для відведення тепла, захисту деталей від корозії, очищення поверхонь тертя від забруднення, ущільнення, запобігання зчепленню поверхонь тертя. Вони поділяються на чотири групи: для гідросистем, для напрямних ковзання, для зубчастих передач, для підшипників кочення.

Гідравлічні оливи (рідини) використовують як робоче тіло в гідросистемах різних машин. Для амортизаторів (через специфіку їхньої роботи) використовують спеціальні оливи, робочий діапазон температур яких повинен бути достатньо широким від -60 до + 400С.

Турбінні оливи призначені для мащення трибосистем різноманітних турбін, турбокомпресорів, турбонасосів і т.д.

Для змащування і герметизації вузлів тертя різних компресорів і вакуумних насосів використовуються **компресорні оливи**.

Для захисту технічних виробів, вузлів, апаратури, машин, конструкцій від атмосферної корозії і корозійно-механічного зношування використовують **консерваційні матеріали** (оливи, розчини з обмеженою розчинністю, аерозолі, емульсії). В цій групі передбачено дві різновидності олив - тільки для консервації і ходові.

Технологічні оливи використовують як робоче середовище в технологічних процесах (обробки різанням, пластичної обробки, термообробки, у виробництвах бетонних виробів, ливарних форм, кераміки).

Спеціальні оливи служать для забезпечення особливих і конкретно визначених функцій (насичувальна, для механізмів, ланцюгів тунельних печей, для герметизації свердловин, паяльна, парфумерна, медична та інші).

Оливи класифікуються за критеріями в'язкості та якості. Моторні і трансмісійні оливи, зокрема, класифікуються за обома критеріями, а індустріальні оливи - тільки за першим з них. Якісно оливи поділяються на звичайні (без присадок), з присадками, з наповнювачами (твердими мастилами). За в'язкістю моторні оливи поділяють на літні, зимові і всесезонні.

Деякі оливи працюють у надзвичайно несприятливих умовах. Так, у зоні контакту зубів зубчастої передачі оливи поступово стиснення, причому за період 10^{-5} с тиск може збільшитись від атмосферного до 2000 МПа і більше, а потім миттєво знизитись до початкового. У двигунах внутрішнього згорання мастило (олива) змішується з продуктами згорання палива і може нагріватись до 300°C.

У властивостях самих олив закладена низка протиріч:

- внаслідок старіння якість олив загалом погіршується, але в них інколи можуть утворюватись продукти, які навіть покращують мащення;

- властивості однакових марок олив проявляються по-різному, в залежності від режиму змащування, - рідинного або граничного;

- оливи, що добре захищають від одного виду зношування, можуть не захищати від інших його видів і навіть стимулювати руйнування поверхонь тертя.

Давно визнано, що мастило варто розглядати як елемент певних конструкцій машин та механізмів і розробники повинні включати рекомендовані марки олив у їх специфікацію поряд з іншими деталями та вузлами. Від якості вибраного змащувального матеріалу значною мірою залежать надійність і довговічність технічних об'єктів та їх коефіцієнт корисної дії.

Для покращення експлуатаційних властивостей олив їх легують присадками. Такі композиції найчастіше замінюють звичайні оливи у всіх відповідальних випадках подібно до того, як леговані сталі інколи

витісняють вуглецеві. Нелегована основа таких олиив називається *базовою*.

Мастила призначаються для зменшення і запобігання зношуванню, зниження коефіцієнта тертя. У багатьох випадках олиив одночасно повинні відводити тепло з зони тертя, запобігати корозії, виконувати спеціальні функції, наприклад, передавати рух у гідроприводах. А тому експлуатаційні властивості олиив можна розділити на змащувальні та службові.

Змащувальні властивості характеризують здатність олиив забезпечувати працездатність поверхонь тертя завдяки максимальному зменшенню їхнього зношування і зниженню сил тертя.

Службові властивості - в'язкість, експлуатаційна стабільність, корозійна активність, мийна здатність тощо є допоміжними.

Змащувальні властивості олиив обумовлюють їхній вплив на різновиди зношування. Так, олиив з покращеними антизадирними властивостями можуть інтенсифікувати окислювальне зношування, яке є бажаним для підтримання належної довговічності пар тертя. Як правило, олиива повинна забезпечувати: при *рідинному терті* - найбільш стійке збереження рідинного шару між поверхнями тертя (рідинного мащення) при підвищенні напруженості їх роботи; при *граничному терті* - мінімальні величини зносу і коефіцієнта тертя.

Ефективність змащувальної дії олиив залежить не тільки від її властивостей, але і від характеру взаємодії з поверхнями тертя, від ряду зовнішніх чинників, які характеризують умови застосування мащення, (режиму і кінематики тертя, властивостей матеріалів контактуючих деталей, геометричної форми і мікропрофілю поверхонь тертя тощо). Отже, оцінювати зношувальні і фрикційні властивості олиив без врахування умов їхнього застосування можна тільки загальною. "Добра" за мастильними властивостями олиива в одних умовах використання може виявитись малоефективною при іншому поєднанні чинників експлуатаційних умов. Найбільш вагома зміна в оцінках може відбуватись при переході режиму тертя від рідинного до граничного і навпаки, тому що внаслідок цього вступають у дію зовсім інші комплекси властивостей олиив - об'ємні та поверхневі.

Експлуатаційні властивості олиив (у першу чергу в'язкість) забезпечують прямий або непрямий вплив на змащувальну здатність. Вони повинні задовольняти певні норми роботи технічних об'єктів, інакше можливі ускладнення при експлуатації машин і обладнання, навіть коли ці олиива мають найкращі змащувальні властивості.

В'язкість - найбільш важлива об'ємна властивість олиив, їхня найважливіша експлуатаційна характеристика, що визначає можливість рідинного мащення. Вона обумовлює несучу спроможність мастильного шару і, отже, змащувальну здатність, характеризує у багатьох випадках характер дії олиив для різних умов експлуатації технічних об'єктів.

В'язкістю (або внутрішнім тертям) рідини називають опір відносному зсуву її шарів під дією прикладеної сили. Одна і та ж сила створює в різних рідинах різні швидкості зсуву шарів, які знаходяться на однаковій відстані один від одного.

Сила в'язкого зсуву (або рідинного тертя) визначається за законом Ньютона $T = \mu \cdot (dv_x/dy) \cdot S$,

де μ - динамічна в'язкість; dv_x/dy - градієнт швидкості зсуву по нормалі до напрямку потоку "x", тобто зміна швидкості потоку по товщині шару рідини; S - площа зсуву.

Рідини, які підпорядковуються цьому закону називають ньютонівськими. До них відносять і мастила. Неньютонівськими рідинами оливи стають при низьких температурах і кристалізації парафінових вуглеводнів, при загущенні полімерними присадками тощо.

Динамічна (абсолютна) в'язкість μ у ньютонівських рідинах є фізичною константою і залежить від температури і тиску. Її визначають у пуазах (П), або у сантипуазах (сП), причому $1\text{сП} = 10^{-3}$ Па·с. Наприклад, динамічна в'язкість води при 20°C становить $1,01\text{МПа}\cdot\text{с}$.

В'язкість оливо у більшості випадків виражають в одиницях *кінематичної в'язкості* ($\nu, \text{м}^2/\text{с}$), що є відношенням динамічної в'язкості рідини μ до її густини ρ за однакових умов (температури і тиску).

За одиницю кінематичної в'язкості традиційно використовують "стокс" ($1\text{Ст} = 1\text{м}^2/\text{с} = 10^{-4}\text{м}^2/\text{с}$). Стандарти на оливи нормують їхню кінематичну в'язкість при атмосферному тиску і температурі 50° або 100°C .

Найменш в'язкі марки нафтових оливо для закритих механізмів мають мінімальну кінематичну в'язкість, а для відкритих передач застосовують оливи підвищеної в'язкості. У зоні тертя в'язкість оливи може суттєво відрізнитись від початкової внаслідок збільшення температури і тиску. При підвищенні температури в'язкість оливи знижується, а при підвищенні тиску – суттєво підвищується. У важконавантажених передачах оливи можуть втрачати свої рідинні властивості і перетворюватися в квазітверде тіло.

Стабільність - здатність оливи зберігати свої властивості при експлуатації і зберіганні, тобто протистояти старінню. Причиною старіння оливи є окислювання киснем повітря, внаслідок чого утворюються шкідливі кислоти і смоли. Інтенсивність старіння є основним показником, що визначає термін служби оливи в механізмах. Стабільність найчастіше оцінюється за здатністю оливи відкладати на поверхнях у вигляді плівок різної товщини, в залежності від температури використання. Це найважливіша після в'язкості експлуатаційна властивість оливи.

Корозійна активність. За наявності в оливах кислот, лугів, води, агресивних присадок може виникнути корозія змащуваних металів. Нафтові оливи, нелеговані антикорозійними присадками, недостатньо захищають метали від корозії. Якщо оливи містять агресивні продукти окислювання і нафтонові кислоти, які залишилися після очищення нафти, вони також можуть стимулювати корозію змащуваних поверхонь.

Оливи, які включають хімічно-активні речовини (сірку, хлор) можуть негативно діяти на деякі неметалеві матеріали, наприклад, гумові і шкіряні ущільнення, які стають крихкими і руйнуються. Оливи часто викликають набрякання або усадку гумових ущільнень, що вимагає підбору взаємосполучених олив і ущільнень. У багатьох випадках вимагається також їхня сумісність з продуктами харчової і переробної промисловості. Стандарти і технічні вимоги до олив регламентують температури їх застигання і спалаху, що гарантує протипожежну безпеку при застосуванні змащувальних матеріалів.

Сировиною для одержання мінеральних олив є мазут, який переганяють (розділяють) у вакуумі і одержують три фракції дистилятів (легку, середню і важку), а також залишки (гудрон, напівгудрон). При очищенні дистилятів отримують дистиляторні оливи, а при очищенні гудрону – залишкові. До дистиляторних відносять автоли і окремі сорти індустріальних олив. Залишковими є деякі види авіаційних, циліндрових та інших олив. Дистиляторні оливи більш стабільні і менш схильні до нагароутворення. Але у початковому (вихідному) стані дистиляторні оливи мають більш низьку в'язкість і поверхневу активність. Часто дистиляторні і залишкові олії змішують у певних пропорціях і одержують компаундовані оливи. Для покращення властивостей олив (підвищення в'язкості, антикорозійності, поверхневої активності тощо) їх легують спеціальними присадками.

Залежно від призначення оливи бувають загального призначення (універсальні), спеціалізовані (для певної категорії об'єктів мащення, наприклад, турбінні, компресорні, моторні), спеціальні (для конкретного об'єкта, наприклад, для гіпоїдної передачі заднього моста автомобіля тощо).

Хімічний синтез дозволяє одержувати синтетичні оливи і пластичні мастила з заданими властивостями, але висока вартість обмежує їх застосування (діефірні, неопентилові, полігліколеві, силіконові).

Маркування, що вказує точне призначення олив, поки не складене. Однак деякі сорти олив (моторні, трансмісійні, індустріальні) мають певне маркування.

Моторні оливи використовують для поршневих двигунів внутрішнього згорання. Вони складаються з базової оливи в'язкістю 3,5...22 сСт при 100⁰С і синтетичних добавок. Концентрація присадок

становить від декількох відсотків (в оливах для легких умов роботи) до 25...30% (в оливах для судових двигунів).

За способом виробництва моторні оливи поділяють на мінеральні, напівсинтетичні і синтетичні. Мінеральні оливи є найпоширенішими. Їх отримують змішуванням (компаундуванням) базових дистилатних та (або) залишкових олив.

Синтетичні моторні оливи виготовляються за складними технологіями з використанням дорогої сировини. Їм притаманні високі експлуатаційні характеристики. Вони можуть експлуатуватися при будь-яких зовнішніх температурах та режимах роботи двигуна.

Напівсинтетичні моторні оливи виготовляються компануванням мінеральних та синтетичних олив. Вони кращі за характеристиками порівняно з мінеральними. Їх можна практично без обмежень застосовувати у всіх типах двигунів.

Олива для певного двигуна підбирається за в'язкісними показниками в залежності від його конструкції, технічного стану, умов експлуатації, сезону та інших чинників.

В країнах СНД встановлена система позначення моторних олив за ГОСТ 17479.1 -85, яка включає декілька знаків: букву М (моторна); цифру (або дріб), що характеризує клас (або класи) кінематичної в'язкості; букву, що означає належність до групи за експлуатаційними властивостями; цифру після букви, яка характеризує умови роботи двигунів.

Найпоширенішою закордонною класифікацією моторних олив за експлуатаційними властивостями є класифікація Американського нафтового інституту (API – American Petroleum Institute). З часом вона багаторазово змінювалась і доповнювалась, однак принцип поділу моторних олив на дві категорії залишався завжди. Оливи, згідно з цією класифікацією, позначаються двома літерами. Перша літера вказує на використання оливи або в карбюраторному двигуні, або в дизелі. Якщо перша літера S (Service), то олива призначена для бензинових двигунів, а якщо перша літера C (Commercial), то значить олива призначена для дизелів. Універсальні моторні оливи містять в позначенні як бензинову, так і дизельну групи якості.

Друга літера цієї класифікації визначає область застосування і якість оливи. Чим далі йде літера за англійською абеткою, тим вищою є якість оливи. В категорію Service введені наступні класи-SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SJ, а в категорію Commercial – CA, CB, CC, CD, CDП, CF, CF-4, CF-2, CG-4. Цифри при позначенні класів CDII, CF-4, CF-2, CG-4 дають додаткову інформацію про застосування олив даного класу в 2-тактних або в 4-тактних дизелях відповідно. Нині у США, наприклад сертифікують тільки оливи з високими рівнями експлуатаційних властивостей, а саме SH та SJ для бензинових двигунів, CF, CF-2, CF-4 та CG-4 - для дизелів.

Суттєві конструктивні відмінності між американськими та європейськими двигунами спонукали розробити та прийняти єдину класифікацію моторних оливо, що відповідають вимогам для двигунів, які виготовлені в Європі.

Класифікація CCMC (Constructeurs d'Automobiles du Marche Commun), так само як і API, поділяє моторні оливи на класи окремо для карбюраторних та дизельних двигунів. За цією класифікацією моторним оливам присвоюється двохзначний (оливам для легкових дизельних автомобілів - тризначний) код, який описував область застосування та якість моторної оливи. Ця класифікація поділяє оливи на три групи: для карбюраторних двигунів: (G - Gazoiline (бензин)) G1, G2, G3, G4, G5; для дизельних двигунів вантажівок: (D - Diesel (дизель)) D1, D2, D3, D4, D54; для дизельних двигунів легкових автомашин: (PD - Personal Diesel) PD-1, PD-2.

Індустріальні оливи використовують для промислового устаткування і умовно поділяють за в'язкістю на три групи: малов'язкі (легкі), середньов'язкі (середні), в'язкі (важкі). Індустріальні оливи загального призначення I-5A, I-18A...I-100A за вимогами стандарту є дистилаторними і залишковими оливами нормального ступеня очищення без присадок. Вони призначені для змащування промислового обладнання, коли не вимагаються спеціальні оливи з присадками. Крім того, їх використовують базові при виробництві оливо із присадками. В сучасному обладнанні поширеного використання набули леговані індустріальні оливи різноманітного асортименту.

Іноді назва оливи означає обмежену галузь її застосування – годинникова, трансформаторна тощо. При виборі сорту оливи треба враховувати, що за маркою або назвою оливи важко визначити її функціональну придатність. Для цього потрібно користуватись досвідом експлуатації аналогічних вузлів або перевірити працездатність вибраної оливи в лабораторних (виробничих) умовах.

19.3. Пластичні мастильні матеріали

Пластичні мастила (мазі) одержують при змішуванні рідких оливо з милами або спеціальними загущувачами. Вони незамінні у вузлах, де рідкі оливи не утримуються, а їхня безперервна подача неможлива або недоцільна. Їх також використовують як ущільнювачі в сальниках, різьбових та інших з'єднаннях. В якості згущувачів використовують натрієві, літієві мила, органічні та неорганічні продукти (парафін, графіт).

В залежності від типу загущувача мазі поділяються на: натрієві, літієві, алюмінієві, силікагелеві, полімерні з фтором, полікарбаміди та інші. Вони є сумішами мінеральної (синтетичної) оливи з загущувачами, присадками і наповнювачами (графіт, де сульфід молібдену, порошкоподібні метали та їх окисли, слюда тощо).

Мазі використовуються там, де неможливо або нераціонально використовувати інші види мастильних матеріалів, зокрема оливи,

наприклад, в вузлах тертя, де не передбачена зміна мастила або воно поповнюється періодично. В таких випадках пластичне мастило, наповнюючи вузол тертя, сприяє постійному змащуванню поверхонь і не витікає із зони тертя.

Розглянемо більш детально асортимент і сфери застосування пластичних мастильних матеріалів.

Антифрикційні мастила. Мастила загального призначення (солідоли) - це гідровані кальцієві мастила. Перевагою солідолів є водостійкість, добрі захисні (від корозії) і протизадирні властивості, невеликою-низькою температура плавлення і механічна стабільність.

Промисловістю випускається два види солідолів: синтетичний (ГОСТ 4366-76) і жировий (ГОСТ 1033-79).

Солідол синтетичний - це м'яка синтетична мазь від світло- до темно-коричневого кольору. Містить Са (до 3%), що є стабілізатором. Випускається двох марок - солідол С (СКа 3/7-2) і прессолідол С (СКа 4/5-0).

Солідол С - найбільш масовий сорт антифрикційних пластичних мастил. Солідол С застосовується в підшипниках кочення і ковзання, в шарнірах, гвинтових і ланцюгових передачах та інших вузлах тертя. Неюліком солідолу С є низька механічна стабільність. При сильному ущільненні експлуатаційні властивості його погіршуються. Він неюліточно сумісний з іншими мастилами, тому при заміні солідолу С на мастила інших типів його неюлібно повністю видаляти з вузла тертя.

Прес-солідол С в основному застосовується у вузлах тертя машин і обладнання. Оскільки його готують з менш в'язких мастил і додають меншу кількість загущувача, тому він краще нагнітається солідолонагнітачем, ніж солідол С.

Солідол жировий відрізняється від синтетичного тим, що містить кальцієві мила жирних кислот, які входять до складу природних жирів. За зовнішнім виглядом і основними характеристиками жирові солідоли близькі до синтетичних, однак мають кращі в'язкісно-температурні характеристики і добре сумісні з іншими типами мастил. Стандартом передбачається дві марки жирових солідолів: солідол Ж (СКа 2/6-2) і прес-солідол Ж (СКа 3/6-0). За властивостями і застосуванням жирові солідоли аналогічні синтетичним.

Солідоли використовують у вузлах тертя, що працюють при температурі до 60 ... 70° С, коли до їх якості особливих вимог не ставлять. Тому, при впровадженні нових енергонасичених машин, солідоли заміняють високоякісними мастилами, в першу чергу багатоцільовими. Солідоли всіх марок можна без обмежень замінити Литолом-24, з яким вони сумісні. В Хмельницькому національному університеті, НВО „МАСМА” та в НУХТ розроблені пластичні мастила „Літрол” і „Ріплена” на основі модифікованої ріпакової олії, які є екологічно безпечними і з успіхом замінюють солідоли та літоли.

Графітна мазь (ГОСТ 3833-80, СКа 2/6-г3) - це груба, щільна мазь чорного кольору із срібним відтінком. За складом близька до синтетичних солідолів, але виготовлена на в'язкій оливі, а загущувачем є графіт. Незважаючи на незадовільні в'язкісно-температурні властивості, вона застосовується і влітку, і взимку для мащення ресор, підвісок гусеничних тракторів, відкритих зубчастих коліс.

Мастила для підвищених температур (консталіни) використовуються для роботи при температурах 100 ... 110°C. Виготовляються на основі індустриальних, авіаційних, трансформаторних олив із загущенням натрієвими і натрієво-кальцієвим милами. Тому загальний їх недолік - це розчинність у воді.

І-13 жирова (ГОСТ 3801145-80) - однорідна зерниста мазь на основі рицинової олії від світло - до темно-жовтого кольору. Використовується у підшипниках кочення, рідше у підшипниках ковзання. Змащують також підшипники електричних машин, що працюють при температурі 80 ... 90 °С, маточини зубчастих коліс-сателітів та інші вузли. Строк служби її в підшипниках до трьох років, але низька якість і дефіцитність рицинової олії вимагають заміни мастилом Литол-24.

Консталін (ГОСТ 1957-73) - густа мазь жовтого або світло-жовтого кольору з дрібнозернистою або слабо-волокнистою текстурою. За зовнішнім виглядом він подібний до мазі І-13, а за складом відрізняється відсутністю кальцієвого мила і застосуванням рицинової олії. Як і мастило І-13, консталін успішно замінюється литолом-24.

Багатоцільові мастила іноді називають багатофункціональними, або універсальними. Вони водостійкі і працюють у широкому інтервалі швидкостей, температур і навантажень. Виготовляються на основі нафтових олив (суміш веретенної та індустриальної або залишкових і дистильованих олив) із загущенням літєвими милами.

Литол-24 (ГОСТ 21150-75, МЛи 4/12-3) - м'яка мазь коричневого кольору. Водостійкий, має високу механічну стабільність і добрі мастильні властивості. Можна застосувати для переважної більшості вузлів тертя машин і апаратів харчових і переробних підприємств. При використанні Литолу-24 у вузлах тертя замість мастил загального призначення строки проведення змащувальних робіт зростають майже вдвічі.

Фиол-1 (НЛп 4/12-1) - дуже пластичне мастило, за складом і основними характеристиками близьке до Литолу-24. Має понижений вміст загусника, тому в'язкість і межа міцності менші, м'якіша консистенція, дещо краща морозостійкість.

Фиол-3М(НЛп 4/12-Д2) - м'яка мазь сріблясто-чорного кольору, за складом близька до багатоцільових мастил серії «Фиол». Наявність в'язкісної, а також антиокислювальної присадки поліпшує експлуатаційні властивості.

Комплексні кальцієві мастила одержують при застосуванні комплексного кальцієвого мила, високомолекулярних жирних кислот і оцтової кислоти.

УНИОЛ-1 (ЖкКа 3/15-2) - м'яке мастило коричневого кольору, нагадує за зовнішнім виглядом солідол С, водостійке навіть у киплячій. Має високу термостійкість, хорошу колоїдну стабільність, дешево. Недолік - підвищена гігроскопічність, а тому його необхідно зберігати у герметичній тарі. Рекомендується застосовувати як термостійке мастило загального призначення при температурах до 200°C.

ЦИАТИМ-221 (ЖкКа 6/15к-1/2)—м'яка мазь білого або світло-сірого кольору. Максимальна температура застосування близько 150°C, допускається короточасне перегрівання до 180°C. Має добрі низькотемпературні властивості, можна використовувати до температури - 60 °С. Застосовується для мащення підшипників кочення, а також в парах гума - метал.

Морозостійкі мастила призначені для застосування при температурах до -50° С і нижче. Виготовляються з застосуванням звичайних і комплексних мил та твердих вуглеводнів.

ЦИАТИМ-201 (НЛи 6/9-1) - м'яка мазь жовтого або світло-коричневого кольору. Основне морозостійке мастило, яке застосовується в країнах СНД. Достатньо водостійке. Призначене для змащування вузлів тертя всіх типів (підшипники кочення і ковзання, шарніри тощо). Не рекомендується його використовувати при високих питомих навантаженнях деталей.

Автомобільні мастила. Поряд із мастилами загального призначення (солідоли, багатоцільові мастила тощо) промисловість випускає спеціальні мастильні матеріали для вузлів автомобілів, які з успіхом можуть застосовуватись для мащення шарнірів широкої гами автоматів, що експлуатуються у харчовій, фармацевтичній та мікробіологічній промисловості.

ШРБ-4 (УБа 3/12-2) - практично єдине бар'єве мастило, яке виготовляється і застосовується в країнах СНД. Воно має високу температуру краплепадіння, водостійке, достатньо морозостійке, з волокнистою структурою. Застосовується у шарнірах пакувальних автоматів, рульових тягах автомобілів тощо.

№ 158 (Ули-Пг 4/12-1) - м'яка мазь синього кольору, дисперсної текстури. Застосовується при робочих температурах від -30 до + 120°C. Призначена для використання в електрообладнанні (генератори, стартери, магнето). Широко застосовується також для змащування підшипників карданних передач.

Консерваційні мастила посідають важливе місце серед пластичних мастил і призначені для тривалого і надійного захисту деталей обладнання від корозії. Найбільш поширеними серед консерваційних мастил є вуглеводневі.

Гарматне мастило (ЗТ 5, 5-5) - густа липка мазь коричневого кольору, виготовлена методом сплавлення петролатумів з в'язкою оливою і загущенням церезином. Консерваційна властивість пов'язана з водостійкістю. Захищає від корозії металеві вироби всіх розмірів і форми. У несприятливих умовах вона здатна захищати метали від корозії протягом 3-5 років.

Специфічною характеристикою пластичних мастил є межа міцності на зсув, при якій розпочинається їх в'язке витікання з вузлів тертя. Ця характеристика обумовлює здатність мастильного матеріалу утримуватись в робочому зазорі між контактуючими деталями. Надмірно велика межа міцності шкідлива, тому що за цих умов утруднюється подача мастила і зростають втрати потужності у вузлі тертя.

19.4. Тверді мастильні і самозмащувальні матеріали

Тверді мастильні матеріали – це переважно речовини з шаруватою структурою, які мають високу анізотропію механічних властивостей. Найбільш широко застосовують графіт, що добре працює у вологому середовищі, та дисульфід молібдену, який застосовують в сухому середовищі. Менш відомі дисульфід вольфраму, нітрид бору та інші.

Це матеріали, які забезпечують змащування між поверхнями в умовах сухого або граничного тертя в екстремальних умовах (високі температури, глибокий вакуум, іонізація, випромінювання, неможливість присутності рідини), де неможливе застосування традиційних мастильних матеріалів. Вони можуть належати ні до одного із елементів трибосистеми, або входити як наповнювач до композиційного антифрикційного матеріалу чи до покриття одного або обох елементів. На даний час є достатньо велика група різних хімічних сполук, які мають властивості твердих мастил. До них відносять графіт (С), фторографіт (СТД), нітрид бору (BN); дисульфід молібдену (MoS_2), вольфраму (WS_2), танталу (TaS_2), диселенід молібдену (MoSe_2), диселенід вольфраму (WSe_2), ніобію (NbSe_2), танталу (TaS_2); йодид кадмію (CdI_2), свинцю (PbI_2), вісмуту (BiI_2), ртуті (AgI); дисульфід сурми (SbS_2); дифторид барію (BF_2), кальцію (CaF_2); дихлорид цирконію (ZrCl_2) і ін. Крім того, як тверді мастила, використовують покриття із м'яких металів (Pb, Sn, Cd, In, Ga, Au), а також деякі полімерні матеріали.

Суттєвою перевагою твердих мастильних матеріалів є їхня стабільність при роботі в різноманітних, іноді екстремальних, умовах експлуатації при високих (600°C і вище) і низьких температурах, у вакуумі тощо.

Способи застосування твердих змащувальних матеріалів такі:

- в умовах ковзання змащувальний брикет може притискатись до поверхні вала за допомогою пружного елемента;
- сухе порошкоподібне мастило може вноситись в зазор пари тертя за допомогою інертних газів (наприклад, азотом);
- сухе мастило змішують з фенольною смолою і одержану суміш наносять на поверхні тертя, а потім висушують.

Як самозмащувальний матеріал можна застосовувати металокераміку, яка містить сухе мастило. Водночас, висока пористість матеріалу також може забезпечити тривалу подачу рідкого мастила в зазор, якщо ним він був насичений.

19.5. Вибір змащувальних матеріалів для підшипникових вузлів

Раціональний вибір змащувальних матеріалів сприяє роботі технологічного обладнання з більш високим коефіцієнтом корисної дії, зменшує знос робочих поверхонь тертя, збільшує тривалість експлуатації машини, її надійність, запобігає корозії. Рідкі мастила також відводять частину тепла з нагрітих деталей, тобто виконують функції охолоджувальних рідин. В технічній документації на обладнання завжди задають вид і марку рекомендованого мастила.

Вибір мастильних матеріалів залежить від багатьох умов, зокрема від конструкції вузла тертя, експлуатаційного режиму (навантаження, швидкості, температури), матеріалу деталей, оброблюваного і зовнішнього середовища, можливості обслуговування механізму під час його роботи тощо.

Вибір мастильних матеріалів (в першу чергу) визначається доцільністю застосування оливи або пластичного мастила. Порівняно з пластичними мастилами оливи мають такі переваги: підвищену стабільність і чистоту, менший коефіцієнт внутрішнього тертя, можливість фільтрування, спрощеність збирання і додаткового внесення необхідних компонентів для їх регенерації, забезпечення контролю стану мащення і більш гнучкий контроль за подачею оливо у робочу зону, забезпечення охолодження робочих поверхонь.

Водночас, оливи мають певні недоліки, які обмежують їхнє застосування, зокрема, можливе їх витікання через нещільності роз'ємів корпусів і з'єднань трубопроводів, що викликає необхідність вдосконалення конструкцій ущільнень. Оливи також вони створюють підвищену пожежну небезпеку.

Здатність обраного сорту оливи створювати між контактуючими поверхнями при заданих режимах роботи надійний проміжний шар є загальним, головним критерієм її придатності. Однак, при виборі оливи необхідно враховувати і додаткові вимоги, обумовлені особливостями експлуатації машин. В одних випадках олива повинна бути досить інтенсивним охолоджувачем, в інших – запобігати корозії, ущільнювати вузол і одночасно бути гідравлічною рідиною. Обраний сорт оливи за своїми фізико-хімічними властивостями (вогнебезпечність, хімічна агресивність, забрудненість, схильність до нагароутворення) не

повинен ускладнювати експлуатацію механізму. Адже мащення може спричиняти пластифікуючу дію на деталь, яка приводить до зміни поверхневої структури. В умовах високих контактних тисків (зубчасті колеса, підшипники кочення) мастило інколи сприяє виникненню деформацій зсуву, що також може негативно вплинути на поверхневий шар металу і вивести вузол тертя з ладу.

Таким чином, працездатність вузла може в однаковій мірі залежати від його конструкції і від умов мащення. Однак, використання великого асортименту олив для мащення різних вузлів однієї машини неекономічне, а іноді (при централізованому мащенні) – нерациональне. А тому необхідно вибирати оливи таким чином, щоб певний її сорт найбільшою мірою задовольняв експлуатацію декількох вузлів одночасно.

Вибір в'язкості оливи для рідинного режиму тертя можна здійснити розрахунковим шляхом, наприклад, для підшипників ковзання. Однак, розмаїття типів і конструкцій машин, умов їх експлуатації роблять ці розрахунки лише орієнтовними, які повинні бути відкореговані на підставі експериментальних і експлуатаційних даних.

Розрахункових формул для вибору сорту оливи для мащення підшипників в умовах граничного тертя немає. Встановлено, що у залишкових олив працездатність при недосконалому мащенні вища, ніж у добре очищених (наприклад, моторних), але в циркуляційних системах залишкові оливи не застосовуються через небезпеку відкладення смол і забруднення трубопроводів.

У порівнянні з мінеральними оливами пластичні мастила мають такі переваги: задовільна працездатність при малих швидкостях і великих тисках, працездатність при ударних і знакозмінних навантаженнях, частих зупинках, при високих температурах, можливість роботи з'єднань з великими зазорами, задовільне утримування в корпусах, перешкоджають забрудненню поверхонь тертя, тому що пластичні мастила повністю заповнюють зазори і нещільності у вузлах тертя. Недоліками пластичних мастил є: можливість розплавлення і витікання при тривалій роботі і високих температурах, зміна мастила вимагає трудомісткого розбирання і промивання механізмів, конструктивні можливості підведення пластичного мастила у вузол обмежені. Конструктивна простота вузлів із пластичними мастилом обумовлює їхню певну перевагу над вузлами з рідким мащенням, якщо це не суперечить умовам роботи вузла.

При низьких температурах сили внутрішнього тертя у густих мастилах підвищуються, що може спричинити загальне порушення нормальної роботи вузлів машини. Застосування пластичних мастил не завжди можливе у з'єднаннях, періодичне розбирання яких неприпустиме.

Пластичні мастила застосовують у парах тертя тихохідних механізмів, у відкритих зубчастих передачах і підшипниках кочення, які працюють при швидкостях до 2 м/с, а також при повторно-короткочасних режимах експлуатації.

Для опор кочення, в залежності від їхньої конструкції, можуть застосовуватись як рідкі, так і пластичні мастильні матеріали. При великій частоті обертання і помірних навантаженнях між елементами кочення (кульками, роликами) і кільцями виникає контактний гідравлічний ефект. У важких умовах роботи виникає тільки гранична плівка. Крім зменшення втрат на тертя мастило в опорах кочення виконує і ряд інших функцій, зокрема, захищає деталі підшипника від корозії, стимулює тепловідведення, ущільнює підшипник, зашкоджує попаданню в нього бруду.

При виборі мастила для підшипникового вузла в першу чергу необхідно виходити з колової швидкості кільця підшипника, що обертається, а також слід враховувати температурний режим вузла, стан навколишнього середовища (вологість, забрудненість).

Консистентні мастила застосовуються, якщо $dn < 300000$, де (d - внутрішній діаметр підшипника, мм; n - частота обертання, об/хв; рідкі мастила - при довільних швидкостях і діаметрах і належній подачі мастила. При великих швидкостях обертання деталей виникають підвищені втрати на тертя, що збільшує температуру мастила і, водночас, сприяє прискореному відведенню тепла від робочих поверхонь.

В табл. 19.1 наведені марки і в'язкість олив, які застосовуються для підшипників з незалежною системою мащення.

Таблиця 19.1

В'язкість олив для підшипникових вузлів при температурі 50°C

Найменування, ГОСТ, ТУ	Індустріальна, 20799-75			Турбінна, 9972-74			Веретенна 1642-75
Марка	20	30	50	22	30	57	АУ
В'язкість, сСт	17-23	27-30	42-58	20-23	28-32	55-59	4-12

При доборі олив і консистентних мастил для підшипникових вузлів завжди треба враховувати конструктивні особливості системи мащення, особливості температурного навантаження вузла, характеристики ущільнюючих пристроїв, які утримують мастило в робочій зоні.

Для вибору в'язкості мастила служить номограма (рис. 19.1).

Основною причиною втрати працездатності підшипників кочення є викришування поверхонь, якому сприяє окислювання оливи. Застосування ж протиокисних присадок може істотно позначитись на довговічності підшипника.

Застосування густих мастил спрощує конструкцію підшипникових вузлів і їх обслуговування, але значні втрати на внутрішнє тертя

обмежують застосування густих мастил при швидкостях обертання понад 4-5 м/с. В практиці для мащення нешвидкісних вузлів тертя найчастіше використовують солідол. При високій температурі і в сухому середовищі можливе застосування консталінів. Однак консталіни погано змиваються гасом і при заміні мастила вузол треба промивати нагрітою до 100°C мінеральною оливою, що ускладнює ремонтні роботи.

- підбір консистенції мастила.

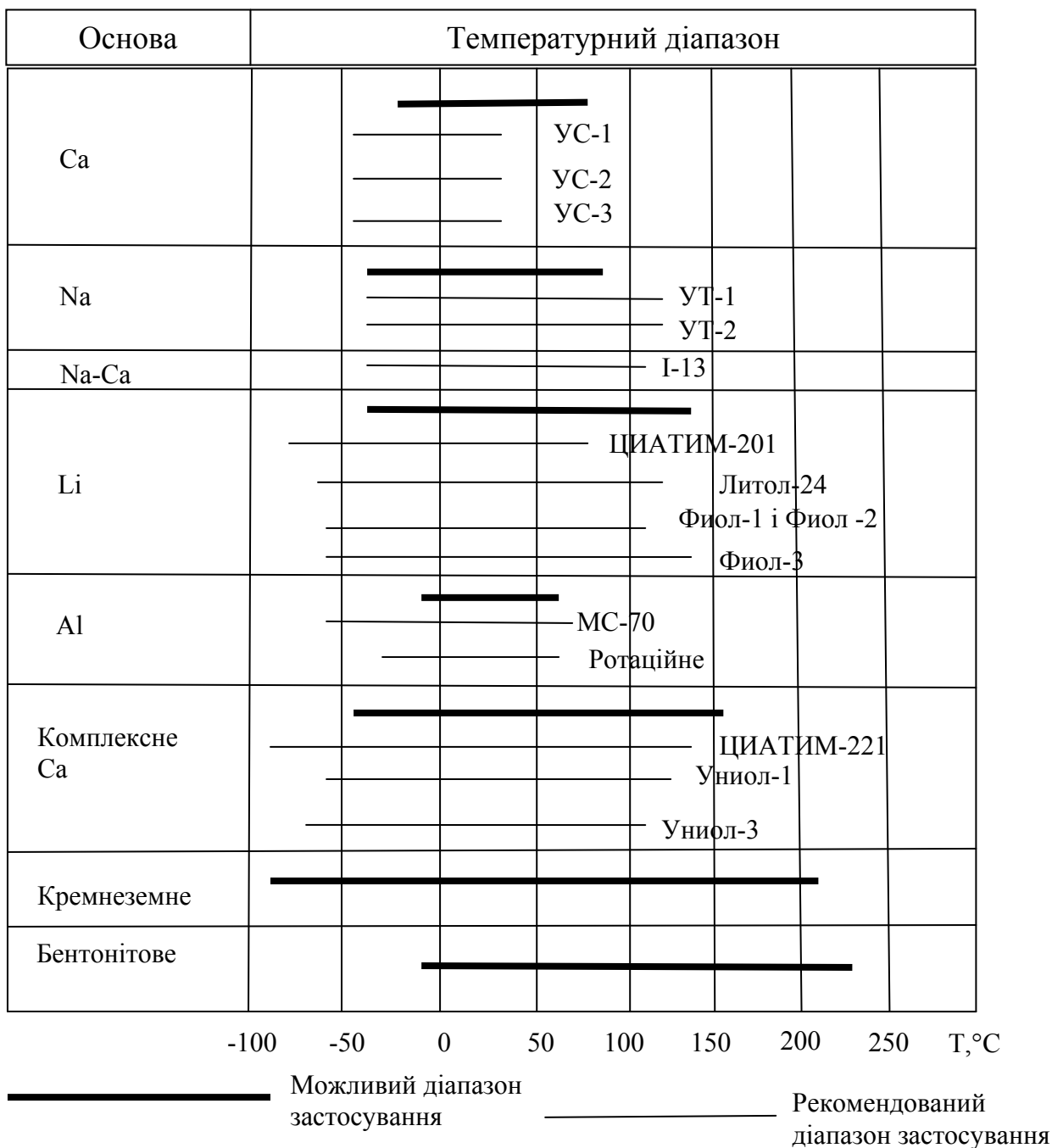


Рис. 19.1. Діапазон робочих температур пластичних мастил

При доборі пластичних мастил треба забезпечувати найбільш повну відповідність їх властивостей умовам експлуатації вибраних

вузлів. Для забезпечення експлуатаційних властивостей мастило повинно утримуватись в трибоспряженні у вибраному діапазоні навантажень і температур. З цією метою для підбору найбільш вигідного серійного мастила треба користуватись довідковими даними або даними експериментальних досліджень. На рис. 19.1 обрамлені діапазони робочих температур для основних типів пластичних мастил. Основними етапами їх добору є такі:

- аналіз навантажень, що діятимуть на мастило у вузлі;
- встановлення виду мастила з огляду на робочі температури, кутові чи лінійні швидкості;
- встановлення, з огляду на рівень навантаження вузла, необхідності застосування мастила з присадками чи без них;

19.6. Змащування зубчастих, черв'ячних і ланцюгових передач

Змащування зубчастих передач зменшує їх спрацювання, шум і вібрацію, запобігає зчепленню поверхонь, охолоджує деталі, пом'якшує удари. Через те, що у гвинтових і гіпоїдних передачах спостерігається значення бічне ковзання зубів, вони найбільш схильні до зчеплення (схоплювання контактуючих поверхонь).

Умови виникнення рідинного тертя найкращі у прямозубих колесах, менш сприятливі в косозубих і незадовільні в гвинтових і гіпоїдних. Тому гвинтовим і гіпоїдним передачам потрібне мастило з протизадирними присадками, або гіпоїдна олива.

Чим вищі допустимі навантаження зубчатої передачі, тим більшою повинна бути в'язкість оливи, для вибору якої користуються спеціальними таблицями і номограмами. На вибір сорту оливи впливає також захищеність передачі. В добре закритих і ущільнених конструкціях застосовують оливи з меншою в'язкістю.

Закриті зубчасті передачі при коловій швидкості не вищій 12...15 м/с, як правило, змащуються зануренням у рідке мастило. Рекомендовані значення кінематичної в'язкості мастил подані в табл. 19.2.

Таблиця 19.2

Рекомендовані значення кінематичної в'язкості (сСт) олив для сталевих коліс закритих зубчастих передач при температурі 50°C

Матеріал	σ_b , МПа	при коловій швидкості V, м/с				
		0,5 -1	1-1,25	1,25-5	5-12,5	12,5-25
Сталь	450-1000	180	120	85	60	45
	1000-1250	270	180	120	85	60
	1250-1600	270	270	180	120	85
Сталь цементована або загартована з поверхні		270	270	180	120	85

Кількість рідкого мастила вибирається з розрахунку 0,35...0,7 л на 1 кВт потужності, що передається.

У відкритих або недостатньо закритих передачах, наприклад, в металорізальному обладнанні, застосовують оливи індустріальні І-20А, І-30А чи І-40А. У великогабаритних зубчастих передачах при швидкостях менше 4м/с допускається застосування густих мастил.

В черв'ячних і гвинтових передачах можливості рідинного тертя обмежені. Вибір в'язкості олив для них здійснюють за табл. 19.3.

Таблиця 19.10

Кінематична в'язкість олив для черв'ячних передач

Швидкість ковзання, м/с	Спосіб мащення	Умови роботи	Рекомендована кінематична в'язкість (сСт) при 50°С
0-1	Зануренням	Важкі	450
0-2,5	Зануренням	Важкі	270
0-5	Зануренням	Середні	180
5-10	Струменевий або зануренням	Середні	120

У ланцюгових передачах мащення зменшує тертя, величину зносу деталей і шум. Шум тим більше зменшується, чим більша в'язкість оливи. Характер роботи ланцюга такий, що змащувальна рідина недостатньо затримується в його ланках і її проникнення до поверхонь тертя обмежене. Таким умовам задовольняють індустріальні оливи І-20А, І-30А, І-45, Автол 10 тощо.

Густе мастило в ланцюгових передачах застосовують при швидкостях до 5 – 7 м/с. При температурі меншій 60°С застосовують солідоли або графітізоване густе мастило, а при більш високих температурах і за відсутності вологи – консталін. Для особливо важких умов роботи може виявитися ефективним дисульфід молібдену. Перед мащенням густе мастило попередньо нагрівають до 50 ... 55°С і в нього занурюють ланцюг.

Раціональний вибір способу мащення і мастильних матеріалів суттєво підвищує довговічність і надійність ланцюгових передач, покращує тепловідведення, зменшує рівень шуму.

Для змащування напрямних верстатів і технологічного обладнання використовують в основному індустріальну оливу І-20А, І-30А, І-45А. Для підвищення зносостійкості можна використовувати незначні добавки в оливи колоїдного графіту. Для важконавантажених напрямних застосовують густі мастила, наприклад, солідол.

Для мащення металополімерних пар, в яких одна з деталей неметалева, можуть використовуватись мінеральні оливи, емульсії, мазі і вода. Ефективність дії мащення при різних режимах роботи визначається не тільки характеристика мастильної речовини, але і природою та властивостями неметалевої поверхні.

Вибираючи мащення для неметалів необхідно враховувати їхню низьку теплопровідність, недостатню теплостійкість, старіння, обмежену стійкість в деяких технологічних середовищах.

19.7. Покращення експлуатаційних властивостей

мастильних матеріалів

Високі експлуатаційні характеристики сучасних мастильних матеріалів вдалося досягти завдяки використанню функціональних присадок. Присадки – складні органічні або металоорганічні сполуки, які вводяться в оливи для поліпшення їх експлуатаційних властивостей. Застосовують їх в трансмісійних, гідравлічних, індустриальних, трансформаторних та інших оливах, пластичних мастилах, але особливо широко в моторних оливах, які без присадок взагалі не випускаються.

За функціональним призначенням розрізняють присадки: антиокислювальні (їх вміст 0,5-3,5%), протикорозійні (0,1-1%), мийно-диспергуючі (3-20%), антизношувальні (0,1 -2%), протизадирні (5-10%), антифрикційні (1-2%), депресорні (0,1-1%), протипінні (0,001-0,003%).

Значна кількість сучасних присадок покращує одночасно декілька властивостей оливи, зв'язаних з основним напрямком дії присадки. Наприклад, антиокислювальні присадки затримують процеси окислювальної полімеризації олив і, одночасно, поліпшують протикорозійні і антизношувальні їх властивості.

Протиокислювальні присадки підвищують стабільність оливи в двигунах внутрішнього згорання і запобігають окисленню при високих температурах. Вони поділяються на низькотемпературні інгібітори, які уповільнюють процес окислення вуглеводнів при відносно невисоких температурах (100-130°C), і термоокислювальні, що уповільнюють процес окислення олив в тонких шарах при високих температурах.

Протикорозійні присадки підвищують відповідні властивості моторних олив, які без них не забезпечують надійну і тривалу роботи укладок підшипників, виготовлених із мідно-свинцевих сплавів.

Мийно-диспергуючі присадки призначені для запобігання відкладенням на поршнях, поршневих кільцях, стінках та інших деталях двигуна. Крім того, вони мають диспергують продукти забруднення, що накопичуються в моторній оливі при роботі двигуна.

Антифрикційні присадки призначені зменшити втрати потужності на тертя. Особливістю антифрикційних присадок є їх переважна ефективність в умовах граничного мащення. У зв'язку з цим їх найбільш раціонально додавати до малов'язких олив.

Антизношувальні присадки містять ПАР, які при підвищенні температури можуть утворювати плівки, що запобігають зчепленню поверхонь тертя.

Протизадирні присадки застосовуються для запобігання, обмеження та гальмування схоплювання деталей в трибосистемах ковзання при високих контактних температурах і навантаженнях. Продукти розкладання присадок хімічно взаємодіють з металом при високих температурах тертя, внаслідок цього утворюються сполуки, які чинять менший опір тертю і мають більш низьку температуру

плавлення, ніж чисті метали, що і запобігає зчепленню поверхонь тертя.

В'язкісні присадки використовують для поліпшення в'язкісно-температурних властивостей оливи, наприклад, прокачуванні при низьких температурах.

Депресорні присадки додають до оливи, які мають високу температуру застигання. Депресори стримують утворення в оливі суцільних кристалічних ґраток при зниженні температури, завдяки чому олива зберігає свою текучість.

Протипінні присадки запобігають спіненню оливи за рахунок зниження міцності поверхневих плівок, які розділяють газові бульбашки і рідину. Ці присадки вводять разом з мийними, тому що останні підвищують спінення оливи.

Багатофункціональні присадки застосовують для одночасного покращення декількох властивостей оливи. Це, наприклад алкіл-фенольні присадки, які характеризуються протикорозійними, мийними, антиокислювальними властивостями; фенолсульфіди, які мають протикорозійні та мийні властивості і знижують температуру застигання оливи.

Композиції присадок. Постійно зростаючі вимоги до якості моторних оливи призвели до необхідності створення композицій багатофункціональних присадок, які при введенні в оливу покращують її експлуатаційні властивості. При виготовленні композицій присадки не просто змішуються, а хімічно взаємодіють, в результаті чого підсилюються існуючі або проявляються нові якості.

19.8. Газове мащення механізмів

Зі збільшенням швидкості обертання в гідродинамічних підшипниках підвищується їхня несуча здатність, але, одночасно, зростає теплоутворення. Для особливо швидкохідних підшипників необхідні спеціальні охолоджувальні пристрої. Це вказує на доцільність переходу при великих швидкостях ковзання на малов'язке мащення, зокрема на газове, для якого найчастіше використовують повітря, вуглекислий газ, азот, інертні та інші гази. В'язкість повітря у сто разів менша найменш в'язкого з рідких мастил за нормальних умов. Газове мащення можна застосувати і для тихохідних опор, в яких треба забезпечити особливо малий опір руху. Повітря також може використовуватися для утворення аерозолів оливи, які подаються під тиском у зону тертя.

Газове мащення підшипників має такі переваги: можливість реалізувати практично необмежені швидкості; малий опір руху, незначна витрата потужності, відсутність необхідності в охолоджувальних пристроях; забезпечення високої точності роботи механізму завдяки малим температурним деформаціям; безшумна робота рухомих деталей; можливість роботи в несприятливих умовах і широкому діапазоні температур можливість мащення технологічним

газовим середовищем, зокрема водяною парою; екологічна безпечність; економія мастил і відсутність пристроїв для їх подачі, очищення та охолодження пари тертя; відмова від складних ущільнень.

Газове мащення має і певні недоліки, зокрема, неприпустимість навіть короточасних значних динамічних перевантажень вузла тертя та необхідність високої точності виготовлення підшипників.

При дуже високих швидкостях (десятки тисяч обертів за хвилину) застосовують газодинамічні підшипники, при малих швидкостях – газостатичні, в які газ подається під значним тиском. Галузі практичного використання газодинамічних підшипників такі: швидкохідні внутрішньошліфувальні і свердлильні шпинделі верстатів, гіроскопи, центрифуги, швидкохідні високотемпературні газові турбіни, турбокомпресори.

Газостатичні підшипники застосовують для шпинделів кругло – плоско – шліцешліфувальних верстатів, у ряді точних приладів.

Аеродинамічні підшипники можуть змащуватись самозасмоктуванням повітря з навколишнього середовища, але кращі умови створюються при подачі стисненого повітря із пневмопроводу, яке проходить через спеціальний відстійник, де декілька разів змінює напрямок руху й очищується від пилу, води і залишків оливо.

Укладки підшипників рекомендують виготовляти з матеріалу, що допускає короточасне ковзання при відсутності мащення без зчеплення. Добрі результати дає насичений бронзою або бабітом вуглеграфіт.

Високі технічні можливості аеродинамічних опор підтверджуються створенням електрошпинделів для внутрішнього шліфування з частотою обертання 96...144 обертів тисяч за хвилину і пневмошпинделів з частотою обертання до 150 .. 300 тисяч обертів за хвилину.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Назвіть основні вимоги до мастильних матеріалів.
2. Як класифікують оливи за призначенням?
3. Дайте характеристику змащувальним службовим властивостям оливо. Які з них є допоміжними?
4. Від яких чинників залежить ефективність змащувальної дії оливи?
5. В яких одиницях оцінюють в'язкість оливо?
6. Від яких чинників залежить стабільність і корозійна активність оливо?
7. Дайте класифікацію моторних оливо.
8. У яких випадках застосовують індустріальні оливи?
9. Назвіть антифрикційні мазі, які застосовуються на харчових підприємствах.
10. Перерахуйте мастила, які застосовують при підвищених температурах.

11. Які ви знаєте багатоцільові пластичні змащувальні матеріали?
12. Назвіть комплексні кальцієві і морозостійкі мастила.
13. Перерахуйте тверді мастильні і самозмащувальні матеріали.
14. Які чинники впливають на вибір змащувальних матеріалів для підшипникових вузлів?
15. У яких випадках для змащування підшипникових вузлів застосовують тільки пластичні матеріали?
16. Як розрахувати в'язкість оливи для забезпечення рідинного режиму тертя у підшипнику ковзання?
17. Які мастильні матеріали застосовують для підшипників кочення?
18. Якими видами мастил змащують зубчасті передачі технологічного обладнання?
19. Опишіть особливості мащення черв'ячних і гвинтових передач.
20. Які оливи застосовують для змащування ланцюгових передач?
21. Чи застосовують густі мастила (мазі) для змащування ланцюгових передач?
22. Які мастила використовують для змащування металополімерних пар тертя?
23. Які присадки застосовують для покращення експлуатаційних властивостей олив?
24. Поясніть сутність газового мащення механізмів.
25. Як змащуються аеродинамічні підшипники?

[перейти до змісту](#)

20. Прогнозування довговічності обладнання

20.1. Моделювання корозійно-механічного зношування матеріалів в технологічних середовищах

Процес зношування матеріалів супроводжується необоротними втратами механічної енергії та її перетворенням в інші види енергії. Механізм корозійно-механічного зношування матеріалів в агресивних харчових середовищах - електролітах може бути розглянутий на основі аналізу термодинамічної системи, яка зв'язує макроскопічні параметри пари тертя з електрохімічними характеристиками взаємодії і руйнування матеріалів в конкретному технологічному середовищі.

При аналізі постійного процесу корозійно-механічного зношування металів і сплавів в технологічних середовищах харчових виробництв, термодинамічну систему можна визначити сукупністю деформованих об'ємів металу і продуктів зносу, які знаходяться в контакті з технологічним середовищем. Ця система може бути поділена на дві частини: в першій протікають лише деформаційні процеси, а друга, крім цього, зв'язана з хімічними реакціями і зміною площі вільних поверхонь внаслідок руйнування.

При корозійно-механічному зношуванні величина розсіяної енергії визначається не лише пластичною деформацією, але й інтенсивністю електрохімічних процесів та величиною зміни площі вільних поверхонь. Сумісний кількісний аналіз різнорідних процесів можливий при введенні універсальних енергетичних критеріїв з використанням методів термодинаміки необоротних процесів. Такі процеси можна описати за допомогою дисипативної функції:

$$\bar{\psi} = T \frac{diS}{dt} = \sum \frac{d\bar{W}_{ouc}^i}{dt} + \bar{I}_C A_C, \quad (20.1)$$

де $\bar{\psi} = \psi/S_K$ - дисипативна функція (швидкість розсіювання енергії в системі) віднесена до одиниці поверхні контакту S_K ; T - температура системи; $di\bar{S}/dt = diS/S_K dt$ - зміни ентропії системи; $d\bar{W}_{ouc}^i/dt$ - швидкість розсіювання енергії для i - процесу, який реалізується в системі; $\bar{I}_C A_C = \frac{I_C}{S_K} A_C$ - потужність хімічної реакції; \bar{I}_C - швидкість хімічної реакції; A_C - хімічна спорідненість реакції.

Швидкість розсіювання енергії, пов'язана з пластичним деформуванням і утворенням нових поверхонь, складає

$$\sum_i \frac{dW}{dt} = \frac{d\bar{W}_{nl}}{dt} + \sum \frac{d\bar{W}_S^i}{dt} \quad (20.2)$$

Дисипативна функція процесу пластифікації має вигляд:

$$\bar{\psi}_{nl} = \frac{dW_{nl}}{dt} = \bar{I} dA_\alpha \quad (20.3)$$

де $\bar{I}_\alpha = I_\alpha / S_K$ - густина потоку дислокацій; $A_\alpha = \Delta\tau / \alpha$ - хімічна спорідненість процесу утворення і переміщення дислокацій; $\Delta\tau$ - знеміцнення матеріалу; α - кількість дислокацій в одиниці деформованого матеріалу.

Уявляючи процес зношування поверхні як відокремлення частинок по дислокаційних межах, дисипативну потужність процесу можна виразити таким чином:

$$\sum_j \frac{d\bar{W}_s^j}{dt} = I_{S_0} \Delta\sigma_0 + \bar{I}_{sm} \Delta\sigma_m, \quad (20.4)$$

де $I_{S_0} = dS_0 / S_K \cdot dt$ і $I_{sm} = d_{sm} / S_K \cdot dt$ - швидкості зміни площі вільної поверхні оксидів і неокисленого матеріалу; ΔS_0 і σ_m - робота утворення одиниці нової вільної поверхні оксидів і вихідного матеріалу.

З урахуванням виразів (20.2), (20.3) і (20.4) вираз (20.1) можна записати у вигляді

$$\bar{\psi} = \bar{I}_\alpha \frac{\Delta\tau}{\alpha} + \bar{I}_{S_0} \Delta\sigma_0 + I_{sm} \Delta m + \bar{I}_C A_C \quad (20.5)$$

На основі лінійного закону і співвідношень взаємності Онзагера з рівняння (20.5) отримуємо систему лінійних феноменологічних рівнянь:

$$\bar{I}_\alpha = C_1 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_2 A_C + C_3 \Delta\sigma_0 + C_4 \Delta\sigma_m, \quad (20.6)$$

$$\bar{I}_c = C_2 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_5 A_C + C_6 \Delta\sigma_0 + C_7 \Delta\sigma_m, \quad (20.7)$$

$$\bar{I}_{S_0} = C_3 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_6 A_C + C_8 \Delta\sigma_0 + C_9 \Delta\sigma_m, \quad (20.8)$$

$$\bar{I}_{sm} = C_4 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_7 A_C + C_9 \Delta\sigma_0 + C_{10} \Delta\sigma_m, \quad (20.9)$$

де $C_1 \dots C_{10}$ - феноменологічні коефіцієнти.

Приведена швидкість зношування \bar{I} повинна визначитися сумою густини потоків маси окислених \bar{I}_0 та неокислених I_m продуктів зносу:

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{I}_m \quad (20.10)$$

Потоки I_0 та I_m можна отримати з рівнянь (20.5) - (20.9). Враховуючи, що $\bar{I}_0 = \bar{I}_c \nu_0$ з рівняння (20.7) можна визначити величину потоку окисленого металу:

$$\bar{I}_0 = I_c \nu_0 = \nu_0 (C_2 A_\alpha + C_5 A_C + C_6 \Delta\sigma_0 + C_7 \Delta\sigma_m) \quad (20.11)$$

де ν_0 - стехіометричний коефіцієнт окислу в рівнянні хімічної реакції.

Підставляючи рівняння (20.6) і (20.7) у (20.8) і, враховуючи, що $I_m = \bar{I}_{sm} / C_{11}$ (де C_{11} - коефіцієнт, який залежить від властивостей зношуваного матеріалу), отримуємо :

$$\bar{I}_m = \frac{1}{C_{11}\Delta\sigma_m} \left[\bar{\psi} - C_1 \left(\frac{\Delta\tau}{\alpha} \right)^2 - (2C_3\Delta\sigma_0 + 2C_2A_C + C_4\Delta\sigma_m) \frac{\Delta\tau}{\alpha} - (C_5A_C + C_8\Delta\sigma_0^2 + 2C_6\Delta\sigma_0A_C + C_7\Delta\sigma_mA_C + C_9\Delta\sigma_0\Delta\sigma_m) \right] \quad (20.12)$$

Вся зовнішня робота, виконана над системою тертя, дорівнює:

$$W = P \cdot f_{mp} \cdot L, \quad (20.13)$$

де P - питоме навантаження; f_{mp} - коефіцієнт тертя ковзання; L - шлях тертя.

Тоді розсіяна енергія (дисипативна функція) визначається так:

$$\psi = K \cdot P \cdot f_{mp} \cdot V, \quad (20.14)$$

де K - стала, яка характеризує долю розсіяної енергії при зношуванні; V - швидкість відносного ковзання частинок зношуючого середовища по поверхні тертя.

З виразів (20.11), (20.12) і (20.14) можна отримати швидкість зношування, яка приведена до одиниці поверхні :

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{I}_m = K_1 \cdot P \cdot V + K_2 \Delta\tau + K_3 (-\Delta\tau)^2 \quad (20.15)$$

де K_1, K_2, K_3 - постійні, які включають в себе величини $C_i, f_{mp}, v_0, \Delta\sigma_0, \Delta\sigma_m, \alpha$.

З рівняння (20.15) видно, що швидкість корозійно-механічного зношування лінійно залежить від навантаження і швидкості ковзання і параболічно від знеміцнення матеріалу корозійно-активним середовищем.

З електрохімії відомо, що

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M}, \quad (20.16)$$

де $\Delta\varphi_0$ - зміна рівноважного електродного потенціалу при зношуванні; n - валентність металу; F - стала Фарадея; V_M - мольний об'єм речовини.

Підставляючи вираз (20.16) в (20.15) отримаємо:

$$\bar{I} = K_1 \cdot P \cdot V - K_2 \frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M} + K_3 \left(\frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M} \right)^2 \quad (20.17)$$

В формулі (20.17) величини P і V характеризують зовнішню дію на зношувану поверхню, а зміна потенціалу залежить від властивостей матеріалів пари тертя та характеристик корозійного середовища. Якщо пара тертя буде складатися з різнорідних металів або покриттів, то кожен з них має свій електродний потенціал, внаслідок чого пара буде мати змішаний електродний потенціал.

Зміщуючи потенціал тертя пари з використанням зовнішнього джерела струму в катодну або анодну область, можна керувати процесом корозійно-механічного зношування в певних межах, не змінюючи при цьому умов навантаження вузла тертя. Це зміщення

також можна здійснити зміною складу матеріалів, що труться, шляхом нанесення захисних покриттів, зміною режимів тертя та інгібуванням технологічного середовища, що підтверджено багатьма дослідженнями.

Для перевірки правильності вибору термодинамічної моделі корозійно-механічного зношування провели розрахунок коефіцієнтів в формулі (20.17) з використанням методом найменших квадратів. При розрахунках були вибрані довірчі інтервали для рівня імовірності 0,95. Паралельно були проведені випробування бронзових зразків (Бр ОЦС 5-5-5) по схемі "втулка-втулка" на установці торцевого тертя. Досліди проводились в середовищах пиво-безалкогольного виробництва (табл. 20.1). Швидкість ковзання складала 0,2 м/с, питоме навантаження 0,92 МПа. Швидкість розгортання потенціалу при зніманні поляризаційних кривих дорівнювала 2 мВ/с.

Таблиця 20.1.

Триботехнічні і електрохімічні характеристики бронзових зразків, які отримані розрахунковим та експериментальним методами

Технологічне середовище	Зміна потенціалу при зношуванні, мВ	Знос зразків в мг на 10 км шляху тертя			
		верхнього	нижнього	середній	розрахований
Вода жорстка (питна)	100	11.20	10.70	10.95	11.80
Пиво світле (пивзавод "Оболонь", м.Київ)	15.0	0.32	0.28	0.30	0.24

Знос зразків визначали гравіметричним методом. Результати аналітичних і експериментальних досліджень підтверджують адекватність вибраної математичної моделі. Вони також свідчать, що технологічне середовище може в десятки разів змінювати інтенсивність зношування матеріалів. Причому, електродний потенціал металу в технологічному середовищі і його зміщення при терті відіграє визначальну роль. Таким чином, корозійно-механічне зношування поверхонь в агресивних технологічних середовищах харчових виробництв не може розглядатися як просте сумування механічного і електрохімічного факторів. Це більш складний процес, в якому електрохімічне розчинення служить каталізатором втомного руйнування. Тертя ж, в свою чергу, активує електрохімічну корозію. У всіх цих процесах суттєву роль відіграє потенціал системи.

20.2. Розрахунок ресурсу трибосистем харчового бладнання

Обладнання і машини харчових і переробних виробництв в більшості випадків контактують з перероблюваною сировиною, напівпродуктами і продуктами, що є основною причиною зниження експлуатаційної надійності їх трибо спряжень через інтенсивне корозію-механічне спрацювання. Тому, найчастіше, довговічність пар

тертя забезпечують нанесенням захисних покриттів, які формують на деталях з застосуванням різних технологічних методів.

В роботах А. Андрейківа, В. Голубця, М. Кіндрачука, В. Панасюка, М. Пашечка, М. Чернеця та ін. описана кінетика зношування електролітичних, хімічних, дифузійних, евтектичних та інших покриттів і зроблена спроба оцінити ресурс деталей, захищених ними, в різних умовах експлуатації. Разом з тим ці дослідження не стосуються умов роботи обладнання харчової промисловості і скористатися ними для оцінки показників надійності трибо-спряжень технічних об'єктів галузі (без належного доопрацювання) не можна.

Існує практичний інтерес застосувати згадані напрацювання для оцінки фрикційно-контактної стійкості і довговічності захисних покриттів на деталях обладнання, що працює в агресивних середовищах харчових і переробних виробництв.

Більша кількість експериментальних досліджень показує, що в більшості випадків причиною фрикційного руйнування покриттів є втома. І.Крагельський обґрунтував загальні принципи теорії втомного спрацювання і отримав фундаментальні результати при встановленні закономірностей зношування, як втомного процесу.

При терті та зношуванні фрикційній контактній дії піддається тонкий поверхневий шар матеріалу. Тому, розглядаючи захисне покриття (газополуменеве, плазмове та ін.), як шар достатньої товщини у порівнянні з глибиною його деформування, приймаємо механізм його руйнування втомним. Враховуємо також, що покриття, наприклад, газотермічні - це міцний і достатньо крихкий шар на поверхні основи. При надійному зчепленні покриття з основою неможливе його руйнування розшаруванням і сколом. Сприймаючи циклічне поверхнєве навантаження силами тертя покриття, що деформується, схильне до зародження і росту в ньому мікротріщин, які спричиняють крихке руйнування. Умовно покриття можна поділити на товсті та тонкі. Тонкі покриття деформуються по всій товщині і руйнуються з утворенням локальних сколів. Причому, внаслідок різних причин (різна товщина покриття, ліквіація його структури, дефекти поверхні) знос може локалізуватися на частині поверхні, призводячи в подальшому до появи надзвичайно інтенсивного спрацювання. У товстих покриттях деформації поширюються лише на частину їх товщини, а тому зношування в результаті втоми, виникає через зростання тріщин зсуву в деформованому об'ємі. Причому, втомне руйнування може бути багатоцикловим, або малоцикловим. Реалізація конкретного виду втоми залежить від умов зношування.

Нехай у спряженні знаходяться два тіла (наприклад, вал і укладка підшипника ковзання) з захисними покриттями товщиною h_1 і h_2 . Функції лінійного зносу під дією сили тертя можна записати так:

$$\delta_K(P, F, I_K) \quad (2.18)$$

де $\kappa=1,2$ - номер тіла, P - тиск на контакт, F - сила тертя, l_K - шлях тертя.

Вони кількісно оцінюють знос по нормалі до поверхні тертя за деякий час на шляху тертя l_K .

Виходячи з теорії об'ємної втоми, причиною появи дефектів структури матеріалу є зсувні напруження. Допускаючи подібність механізмів об'ємної і фрикційної втоми, можна прийняти гіпотезу, що величина зносу залежить від рівня виникаючої при терті питомої сили тертя f . Лінійний знос оцінюється швидкістю α або інтенсивністю I :

$$\alpha = \delta/t; \quad I = \delta/l, \quad (20.19)$$

де l - шлях тертя, t - час зношування, δ - величина зносу

Функції $\alpha=\alpha(t)$ та $I=I(f)$ при постійних зовнішніх умовах процесу однозначно описують знос кожного з елементів трибопари. Функції I та α зв'язані між собою так:

$$I = V^{-1} \cdot \alpha, \quad (20.20)$$

де V – швидкість ковзання.

Відомо, що фундаментальною характеристикою при оцінці тріщиностійкості матеріалів є кінетична діаграма втомного руйнування (КДВР) (рис. 20.1,а). Аналогічну можна побудувати для фрикційного втомного руйнування (КДФВР) за результатами експериментальних досліджень (рис.20.1,б). Ці діаграми підтверджені експериментально і мають ділянки, де спостерігаються подібні фізичні явища. На них існують граничні значення характеристик, які причетні до тріщиноутворення: для КДВР це K_0 (рис.20.1,а), для КДФВР – $f(0)$ (рис.20.1,б). При $K_I < K_0$ і $f < f(0)$ тріщини відсутні. Коли коефіцієнт інтенсивності напружень $K_I = K_{Ic}$, то швидкість росту тріщин $V_m \rightarrow \infty$, а при $f = f(e)$ спостерігається руйнування зношеного матеріалу по всьому деформованому об'єму шляхом макрорізання і, таким чином, $\alpha \rightarrow \infty$.

Залежності V_m від K_I в діапазоні $K_0 \dots K_{Ic}$ і α від f в діапазоні $f(0) \dots f_1(e)$ мають подібні ділянки. На ділянці 1 значення V_m і α малі. Тут лише для K_I і f , значно більших за K_0 і $f(0)$, спостерігається збільшення і зародження мікротріщин. На ділянці 2 трибоспряження руйнуються шляхом накопичення пошкоджень. Тривалість процесу залежить від умов роботи. Для КДФВР тут суттєву роль відіграє середовище. Якщо воно грає пасивуючу роль (різні мастила, гліцерин, цукроза та ін.), то процес нормального зношування реалізується в області великих тисків. Деякі середовища дозволяють значно збільшити навантаженість трибоспряження, наприклад, цукроза в технологічних середовищах цукрової промисловості. А наявність в зоні тертя ПАР може призвести до зменшення зони 2 нормального зношування. На ділянці 3 реалізується циклічне доломлювання матеріалу при об'ємній втомі, задир, зрив або розшарування покриття, перенесення матеріалу

контртіла на зразок при фрикційній втомі. Тому для практичних цілей доцільно розглядати неповну КДФВР, яка має лише ділянки 1 та 2.

Результати досліджень закономірностей зношування матеріалів, врахування особливостей трибоконтактної взаємодії покриттів і викладена вище гіпотеза про наявність функціонального зв'язку зносу і питомих сил тертя дозволяє записати таку систему кінетичних рівнянь зношування:

$$[d\delta_k(P, F, I_k)/dl_k] \cdot \psi(f) = 1 \quad (20.21)$$

де $dl_k = V \cdot dt_k$; $\psi_k(f)$ - базисний параметр математичної моделі зношування (характеристична функція зносостійкості покриття).

Початкові умови будуть такими:

$$\delta_1 = \delta_2 = 0, \text{ при } l = 0; \psi_k(f) = 0, \text{ при } l = 0; l > 0, V = \text{const} > 0 \quad (20.22)$$

Для процесу нормального зношування функція зносостійкості визначається так:

$$\psi_k(f) = \frac{l_k}{\delta_k}, \text{ або } \psi_k(f) = \frac{Vt_k}{\delta_k} \quad (20.23)$$

де δ_k - лінійний знос тіла на шляху тертя l_k .

Для розрахунку ресурсу трибоспряження систему доцільно записати у вигляді:

$$V^{-1} \cdot [d\delta_k(P, F, t_k)/dt_k] \psi_k(f) = 1 \quad (20.24)$$

Сили тертя в трибоспряженні можна визначити за формулою:

$$F = f_c \cdot G, \quad (20.25)$$

де F, f_c, G - відповідно сила, коефіцієнт тертя та навантаження на пару тертя.

Оскільки характеристикою навантаження трибоконтакту є тиск, то співвідношення (20.25) запишеться у вигляді закону Амонтона-Кулона:

$$f(P, F, l, \delta_k) = f_c p(P, F, l, \delta_k), \quad (20.26)$$

де f_c - визначається експериментально, або відшукується у довідниках.

Функція зносостійкості $\psi_k(f)$ - це інваріанта розглянутих вище швидкості α і інтенсивності I лінійного зношування. Співставлення формул (20.19), (20.20) і (20.24) свідчить, що $I = \psi_k^{-1}(f)$ і $\alpha = V \psi_k^{-1}(f)$. Тому, подібно до КДФВР (рис.20.1,б), можна побудувати кінетичну діаграму зносостійкості матеріалу або покриття (КДЗМ) (рис.20.1,в), яка є дзеркальним відображенням S - подібної КДФВР. КДЗМ є характеристикою порівняльної зносостійкості покриттів, тому що її наявність для декількох покриттів дозволяє наглядно, при однакових рівнях f , оцінити їх стійкість проти зношування. На ділянці 1 спостерігається знос внаслідок багатоциклової втоми, на ділянці 2 знос збільшується і, відповідно, зменшується кількість циклів навантаження, а на ділянці 3 спостерігається малоциклове втомлювальне

зношування.

Для побудови діаграм зносостійкості необхідно підрахувати значення функції $\psi(f)$. У відповідності з (20.23) шлях тертя ковзання l_k визначається з кінематичного аналізу силової схеми тертя, а лінійний знос встановлюється або безпосереднім вимірюванням, або (при рівномірному розподілі зносу) по першому з співвідношень (20.19):

$$\delta_k = \frac{M_k}{\rho_k A_a K_n}, \quad (20.27)$$

де $K_n = A_a / A_m$, $K_n = 0 \dots 1$ і визначається, з геометрії трибо спряження (коефіцієнт перекриття вала укладкою підшипника ковзання).

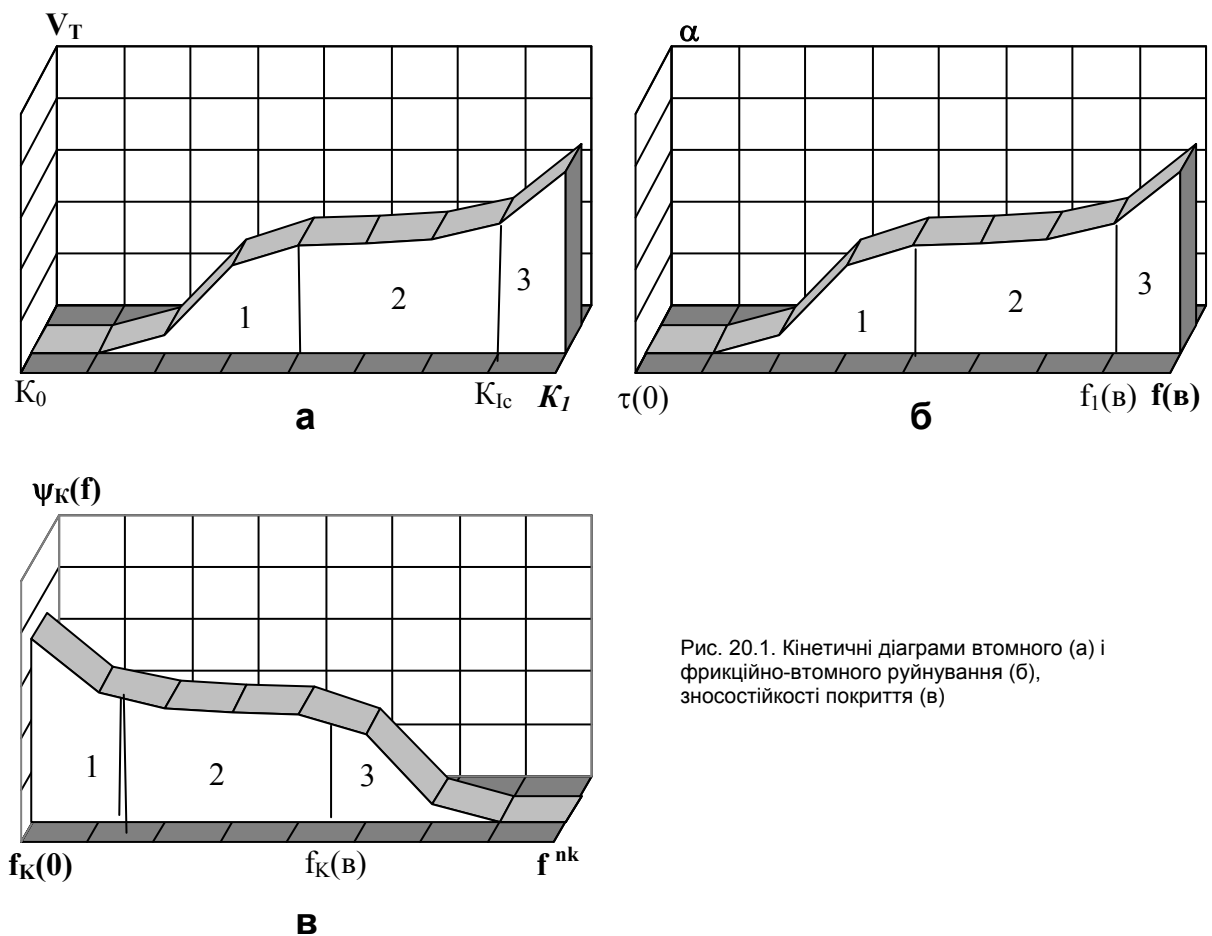


Рис. 20.1. Кінетичні діаграми втомного (а) і фрикційно-втомного руйнування (б), зносостійкості покриття (в)

Значення $\psi = \psi_k(f)$ для побудови КДЗМ апроксимується такими функціями:

$$\psi_k(f) = A_k \{ [f_k(\epsilon) - f_k(0) / f - f_k(0)]^{n_k} - 1 \} \quad (20.28)$$

$$\psi_k(f) = B_k / [f - f_k(0)]^{n_k} \quad (20.29)$$

$$\psi_k(f) = C_k / f^{n_k} \quad (20.30)$$

де A_k , B_k , C_k , n_k , $f_k(\epsilon)$, $f_k(0)$ - характеристики зносостійкості трибопарі; $f(0)$ - нижня межа зношування, при якій $\delta \rightarrow 0$; $f(\epsilon)$ - верхня

межа зношування; f^{nk} - межа міцності на зріз.

Визначення вказаних характеристик для побудови функцій (20.28)...(20.30) проводиться на ПЕОМ методом найменших квадратів. Кожна з функцій дозволяє побудувати свою КДЗМ: (20.28) - повну, а (20.29) і (20.30) - неповну.

Розв'язанням системи (20.21) або (20.24), з врахуванням (20.26) і використанням будь-якого із співвідношень (20.28)...(20.30) при встановлених величині і розподілі контактних навантажень, характеристиках зносостійкості і коефіцієнтові тертя ковзання, проводиться дослідження трибоконтактної взаємодії захисних покриттів.

Величину функції зносостійкості у відповідності з (20.23) і (20.27) можна визначити так:

$$\psi_{\kappa}^i(f_i) = \frac{l \rho_{\kappa} A_a K_n}{M_{\kappa}^i} \quad (20.31)$$

де $K_n=1$ для укладки, $K_n=A_a/A_m < 1$ для вала, $A_m=A_a^6$ - площа контакту укладки з валом, i - порядковий номер навантаження.

Для побудови КДЗМ покриттів і матеріалів необхідно визначити діючі в області контакту питомі сили сили тертя f_i . У використаній схемі тертя (вал-укладка підшипника) після припрацювання тиск на контакті буде постійним і тоді питома сила тертя з врахуванням (20.26), запишеться:

$$f_i = f_c \frac{G_i}{A_T} \quad (20.32)$$

коефіцієнт тертя ковзання f_c визначається експериментально за допомогою тензOMETричного пристрою, а шлях, пройдений поверненнями трибо спряжень розраховується за формулою:

$$l = \omega \cdot R \cdot T, \quad (20.33)$$

де R – радіус вала, ω - кутова швидкість, t – час роботи пари.

На машині тертя СМЦ-2 за схемою «укладка підшипника з плазмовим покриттям – контр тіло з сталі 45» були випробувані плазмові покриття ПГ-10Н-01 (Ni-Cr-B-Si) з ФМІ-14 (Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr) у середовищі дифузійного соку бурякоцукрового виробництва з домішками оксиду кремнію (піску). Оцінювалась довговічність самофлюсованих плазмових покриттів різного хімічного і фазового складу.

Результати дослідження навантаженості фрикційного контакту f [МПа] наведені в чисельнику, а функція $\psi(f) \cdot 10^8 (\text{МПа})^{nk}$ - в знаменнику таблиці 20.2.

За критерій порівняльної зносостійкості покриттів брали діаграми зносостійкості. Для їх побудови використане співвідношення (20.29). Характеристики зносостійкості $B_{\kappa}, f_{\kappa}(0), n_{\kappa}$ досліджуваних матеріалів і

покриттів визначені методом найменших квадратів за даними таблиці 20.2. Їх значення наведені в таблиці 20.3.

Таблиця 20.2

Навантаженість фрикційного контакту і характеристики зносостійкості трибопар в дифузійному соці бурякоцукрового виробництва (модельний розчин)

Трибо-з'єднання	Середовище	Вал				Укладка			
		P, МПа				P, МПа			
		4	7	10	13	4	7	10	13
ФМІ14 – сталь 45	Дифузійний сік	$\frac{0.24}{190}$	$\frac{0.56}{96.0}$	$\frac{1.3}{18.6}$	$\frac{2.2}{11.2}$	$\frac{0.24}{400}$	$\frac{0.56}{60}$	$\frac{1.3}{39.6}$	$\frac{2.2}{10.4}$
ПГ-10Н-01 – сталь 45	Те ж	$\frac{0.36}{16.6}$	$\frac{1.53}{4.46}$	$\frac{2.0}{4.7}$	$\frac{3.7}{1.2}$	$\frac{0.36}{75}$	$\frac{1.53}{23.68}$	$\frac{2.0}{13.43}$	$\frac{3.7}{10}$
ФМІ14 – сталь 45	Дифузійний сік+2%SiO ₂	$\frac{0.16}{25.95}$	$\frac{0.49}{8.7}$	$\frac{1.6}{9.57}$	$\frac{2.73}{3.8}$	$\frac{0.16}{47.36}$	$\frac{0.49}{48}$	$\frac{1.6}{27.27}$	$\frac{2.73}{15}$
ПГ-10Н-01–сталь 45	Те ж	$\frac{0.2}{12.0}$	$\frac{1.12}{3.09}$	$\frac{2.3}{2.0}$	$\frac{3.64}{2.02}$	$\frac{0.2}{60}$	$\frac{1.12}{28.12}$	$\frac{2.3}{22.5}$	$\frac{3.64}{13.0}$
ФМ 14 – сталь 45	Абразив(SiO ₂) змочений дифузійним соком	$\frac{0.8}{0.029}$	$\frac{1.4}{0.024}$	$\frac{1.93}{0.016}$	–	$\frac{0.8}{0.148}$	$\frac{1.4}{0.093}$	$\frac{1.95}{0.056}$	–
ПГ-10Н-01–сталь 45	Те ж	$\frac{0.96}{0.039}$	$\frac{1.5}{0.01}$	$\frac{1.95}{0.014}$	–	$\frac{0.96}{0.071}$	$\frac{1.52}{0.079}$	$\frac{1.93}{0.052}$	–

Примітка: В чисельнику приведені f (МПа), а в знаменнику $\psi(f) \cdot 10^8$ (МПа)^{n_к} матеріалів (покриттів)

Таблиця 20.3

Характеристики зносостійкості покриттів*

Матеріали трибоспряження	Середовище	Характеристики зносостійкості		
		$V_k \cdot 10^8$, (МПа) ^{n_к}	$f_k(0)$, МПа	n _к
ПГ-10Н-01	Дифузійний сік	6,5	0,1	0,82
ФМІ-14		2,668	0,1	1,17
ПГ-10Н-01	Дифузійний сік + абразив	3,66	0,1	0,68
ФМІ-14		6,17	0,1	0,57
ПГ-10Н-01	Абразив	0,0208	0,2	0,56
ФМІ-14		0,0208	0,2	0,56

*Примітка: За констртіло при трибовипробуваннях вибрана сталь 45.

На рис.20.2 наведені діаграми зносостійкості випробуваних покриттів. Їх аналіз вказує, що при зношуванні в середовищі дифузійного соку і в соці з домішками абразиву зберігається однаковий характер кривих зносостійкості досліджуваних матеріалів. Наявність абразиву в технологічній рідині приводить до деякого спаду їх зносостійкості. В середовищі "сік-абразив" більшу зносостійкість має покриття ФМІ-14. В абразивному ж середовищі зносостійкість покриттів приблизно однакова.

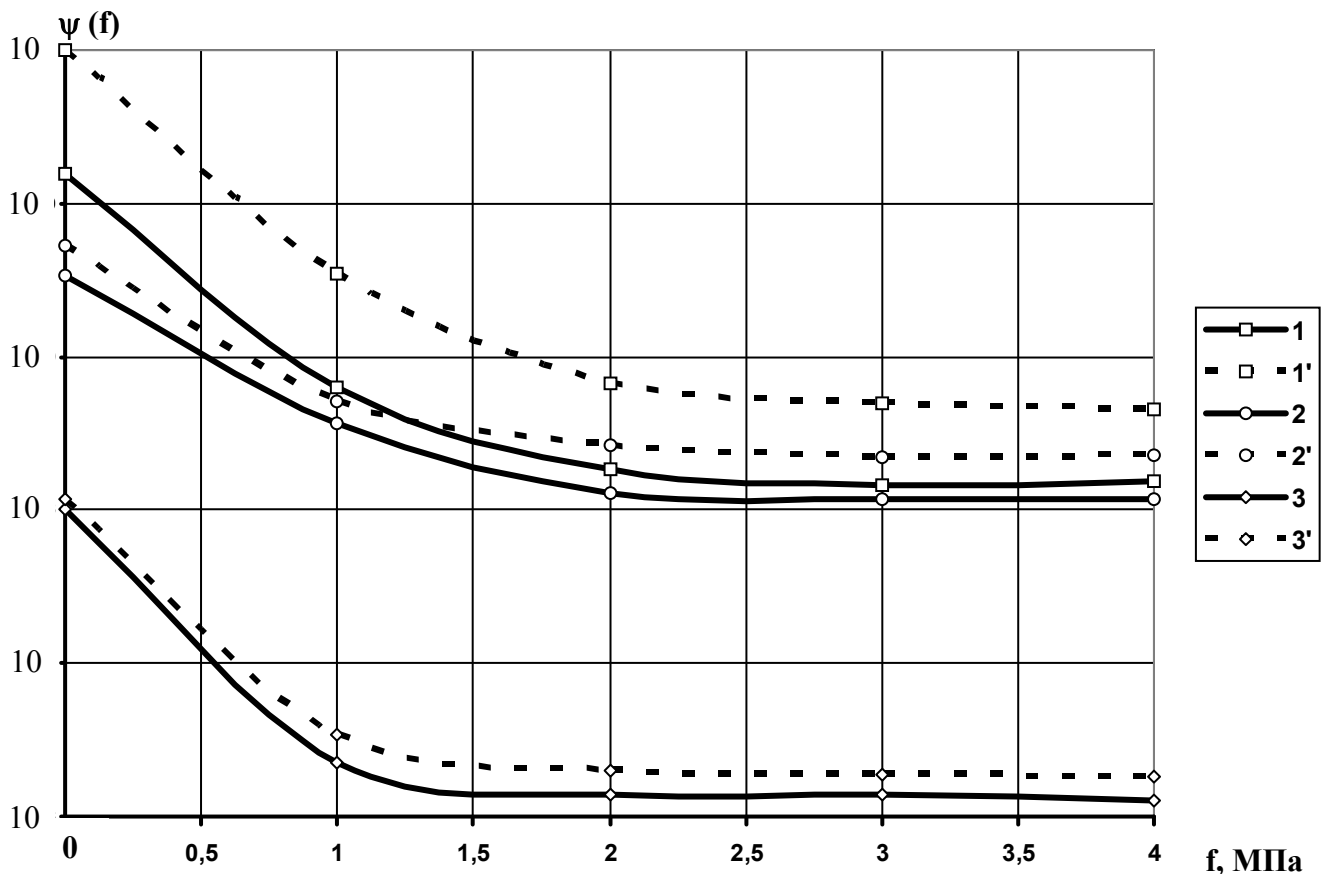


Рис. 20.2. Діаграми зносостійкості захисного покриття ПГ-10Н-01 (1,2,3) і ФМІ-14 (1',2',3') в дифузійному сокові (1,1'), дифузійному сокові, наповненому 2%-ми SiO₂ (2,2'), абразиві (SiO₂), що змочений дифузійним соком (3,3')

Приклад: Розрахувати ресурс покриттів ПГ-10Н-01 і ФМІ-14 в парі тертя зі сталлю 45. Вихідні дані для розрахунку: $f(0)=0,1$ МПа, $f=4$ МПа. Граничний знос $\delta_k=0,1; 0,5; 1,0$ мм; $V=0,4$ м·с⁻¹.

Розв'язок: Інтегруючи (20.24) з врахуванням (20.29), отримаємо рівняння для визначення максимального часу напрацювання пари t_{max} :

$$t_{max} = \frac{\delta_k}{V} \frac{B_k}{[f - f_k(0)]^{n_k}} \quad (20.34)$$

Результати розрахунку довговічності (год) приведені в таблиці 20.4.

Таблиця 20.4

Ресурс (годин) захисних покриттів при зношуванні в середовищі "дифузійний сік +2%SiO₂"

Покриття	δ_k		
	0,1	0,5	1,0
ПГ-10Н-01 (Ni-Cr-B-Si)	80	390	780
ФМІ-14 (Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr)	165	815	1625

Таким чином, виконані розрахунки показують, що покриття самофлюсованим сплавом ФМІ-14 є більш зносостійким у середовищі дифузійного соку з домішками абразивних частинок порівняно з

покриттям сплавом ПГ-10Н-01. Тому його можна рекомендувати для зміцнення і відновлення опор ковзання транспортної системи дифузійних апаратів цукрових заводів, валів в місцях сальникових ущільнень відцентрових насосів, які транспортують середовища близькі за складом до дифузійного соку. Крім того, застосовуючи викладену методику, можна спрогнозувати ресурс пар тертя, які експлуатуються в інших агресивних технологічних середовищах харчових і переробних виробництв.

20.3. Оцінка показників довговічності та безвідмовності обладнання за критеріями корозії та зносу

Закономірності зношування і корозії деталей в технологічних середовищах харчових виробництв є функціями випадкових аргументів, тому що зовнішні фактори (стан середовища, навантаження, швидкість ковзання), характеристики матеріалів (твердість, межа міцності) і умови експлуатації є випадковими величинами. Тому прогнозування надійності машин і апаратів повинно зводитись до визначення імовірності безвідмовної роботи і строку служби. При вирішенні цієї задачі необхідно спиратися на закономірності теорій імовірності та надійності.

Можна припустити, що корозія або зношування (зміна параметру виробу) відбуваються за лінійним законом:

$$X = K \cdot t, \quad (20.35)$$

де K - швидкість протікання процесу (корозії або зношування), t - час.

Найбільш характерний випадок, коли швидкість зношування або корозії підпорядковується нормальному закону, тому що вона залежить від великої кількості випадкових факторів: навантаження, швидкості ковзання, температури, складу технологічного середовища тощо. Виходячи з цього можна записати:

$$f_0(K) = \frac{1}{\sigma_K \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K-K_{cp})^2}{2\sigma_K^2}}, \quad (20.36)$$

де $f_0(K)$ - густина імовірності; K_{cp} - середнє значення швидкості зношування або корозії (зміни вихідного параметру X); σ_K - середнє квадратичне відхилення швидкості зносу або корозії. При $X=X_{max}$ настає граничний стан, який визначає строк служби виробу $t=T$, як функцію випадкового аргументу K :

$$T = \varphi(K) = \frac{X_{max}}{K} \quad (20.37)$$

Середній строк служби виробу

$$T_{cp} = \frac{X_{max}}{K_{cp}} \quad (20.38)$$

Задача полягає в знаходженні імовірності безвідмовної роботи $P(T)$ по заданій функції $f_0(K)$. Для функцій випадкового аргументу в теорії імовірностей використовується формула:

$$f(T) = f_0(\psi(T)) \cdot (\psi'(T)) \quad (20.39)$$

де $\psi(T)$ - обернена функція $\varphi(K)$, і $\psi(T) = X_{max}/T$, $\psi'(T) = -(X_{max}/T^2)$ - похідна цієї функції. Підставляючи ці значення в (20.39) і здійснюючи перетворення, отримуємо :

$$f(T) = \frac{T_{cp}}{\gamma_K \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{T^2} \cdot e^{-\frac{(T_{cp}-T)^2}{2\gamma_K^2 T^2}}, \quad (20.40)$$

де $\gamma_K = \sigma_K / K_{cp}$ - коефіцієнт варіації (безрозмірна величина).

Для зручності розрахунків введемо безрозмірний час (в долях від T_{cp}):

$$\tau = T / T_{cp} \quad (20.41)$$

Тоді формула прийме вигляд:

$$f(\tau) = \frac{1}{\gamma_K \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\tau^2} \cdot e^{-\frac{(1-\tau)^2}{2\gamma_K^2 \tau^2}}, \quad (20.42)$$

де $f(\tau) = f(T)$; $T = \tau \cdot T_{cp}$. Ця формула зручна тим, що густини імовірності є функцією лише одного безрозмірного параметру γ_K . Для визначення імовірності відмови $F(T)$ необхідно проінтегрувати функцію густини імовірності :

$$F(T) = \int_0^T f(T) dT = \int_0^\tau f(\tau) d\tau = F(\tau) \quad (20.43)$$

Якщо ввести перемінну $Z = \frac{1-\tau}{\gamma_K \cdot \tau}$, то даний інтеграл зводиться до функції Лапласа і, враховуючи, що імовірність безвідмовної роботи визначається $P_u(T) = 1 - F(t)$, отримуємо :

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{1-\tau}{\gamma_K \cdot \tau}\right), \quad (20.44)$$

де Φ - нормована функція Лапласа.

Формулу (20.44) можна записати в іншому вигляді, виразивши через параметри X_{max} , K_{cp} і σ_K , які є вихідними в розв'язанні поставленої задачі.

Враховуючи залежності (20.38) і (20.41) отримуємо:

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{X_{max} - K_{cp} T}{T \cdot \sigma_K}\right) \quad (20.45)$$

Запропонована схема розрахунку є дещо ідеалізованою, тому що не враховує розсіювання початкового параметру виробу (точність

виготовлення, твердість матеріалу тощо). З врахуванням цих чинників рівняння (20.35) запишеться так:

$$X = a + Kt, \quad (20.46)$$

де a - початковий параметр виробу.

Термін служби є функцією двох незалежних випадкових аргументів a і K :

$$T = \frac{X_{\max} - a}{K}, \quad (20.47)$$

У випадку розподілу аргументів a і K за нормальним законом параметр X для кожного значення $t=T$ буде розподілений за таким же законом з параметрами:

$$X_{cp} = a_0 + K_{cp}T; \quad \sigma_K = \sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \cdot \sigma_K^2}, \quad (20.48)$$

де a_0 - математичне сподівання, а σ_a - середнє квадратичне відхилення випадкового параметру a .

$P_u(T)$ можна визначити, враховуючи, що імовірність безвідмовної роботи виробу дорівнює імовірності того, що параметр X при заданому $t=T$ не вийде за межі максимально допустимого значення X_{\max} :

$$P_u(T) = I_{\text{мов}}(X \leq X_{\max}) \quad (20.49)$$

Тому імовірність безвідмовної роботи кількісно дорівнює площі під кривою густини розподілу $f(x)$ в межах від $-\infty$ до X_{\max} :

$$P_u(T) = \int_{-\infty}^{X_{\max}} \frac{1}{\sigma_K \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - x_{cp})^2}{2\sigma_K^2}\right) dx = 0,5 + \Phi\left(\frac{x_{\max} - x_{cp}}{2\sigma_K}\right) \quad (20.50)$$

Підставляючи в цю формулу (20.48) отримаємо:

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left[\frac{X_{\max} - a_0 - K_{cp}T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_K^2 \cdot T^2}}\right] \quad (20.51)$$

При $a_0=0$ і $\sigma_a=0$ ця формула перетворюється в формулу (20.45).

Деталі машин і апаратів, які працюють в технологічних середовищах харчових і переробних виробництв, одночасно з поступовими відмовами мають і раптові. Причини виникнення останніх пов'язані не лише зі зміною стану деталей, але й з небажаним співвідношенням діючих факторів.

Побудова моделі раптової відмови пов'язана з аналізом умов експлуатації машини, режимів її роботи, можливістю виникнення екстремальних навантажень і активного впливу навколишнього середовища. Імовірність безвідмовної роботи у цьому випадку описується експоненціальним законом:

$$P_e(T) = e^{-\lambda T} \quad (20.52)$$

де λ - інтенсивність відмов (кількість відмов за одиницю часу).

При сумісній дії поступових і раптових відмов імовірність безвідмовної роботи може бути визначена за теоремою множення імовірностей:

$$P(T) = P_u(T) \cdot P_r(T) \quad (20.53)$$

Використовуючи (20.51) і (20.52) отримуємо:

$$P(T) = \left[0,5 + \Phi \left(\frac{X_{\max} - a_0 - K_{cp} \cdot T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_K^2 \cdot T^2}} \right) \right] \cdot e^{-\lambda T} \quad (20.54)$$

Таким чином, якщо відомі параметри законів розподілу T_{cp} , σ , λ , то можна розрахувати імовірність безвідмовної роботи деталі або вузла.

В початковий період роботи машини або апарата на імовірність безвідмовної роботи в основному впливають раптові відмови, а потім все більшого значення набувають поступові. В деяких випадках фізика відмов настільки складна, що включає елементи різних видів відмов. Наприклад, вихід з ладу деталей від втоми пов'язаний з розвитком тріщин в зоні місцевої концентрації напружень, технологічного дефекту або початкового пошкодження. При цьому період часу до зародження мікротріщини характеризується ознаками поступової відмови, а процес руйнування – раптової.

Приклад. Розрахувати показники надійності дифузійного апарата бурякоцукрового виробництва, який працює в корозійно-активному середовищі - дифузійному сокові. Якщо відомі наступні вихідні дані:

– середня швидкість корозійно-механічного зношування корпусу $K_{cp}=1$ мм/рік;

– середнє квадратичне відхилення швидкості корозії $\sigma_K = 0,07$ мм/рік ;

– середнє квадратичне відхилення початкового параметру $\sigma_a = 0,2$ мм ;

З умов функціонування апарата визначена допустима величина корозійно-механічного зносу $X_{\max}=2$ мм (товщина захисного покриття на корпусі).

Необхідно розрахувати ресурс дифузійного апарата по базовій деталі (корпусу) при заданій імовірності безвідмовної роботи $P(T)$ від 0,9 до 0,9999.

Розв'язок. З формули (20.51) отримуємо для визначення T квадратне рівняння:

$$U_\alpha \cdot \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_K^2 \cdot T^2} = X_{\max} - a_0 - K_{cp} \cdot T \quad (20.55)$$

Порядок розрахунку полягає в тому, що для заданого значення $P(T)$ за таблицями для квантилей нормального розподілу випадкових величин знаходимо відповідні значення U_α та з рівняння (20.55) визначаємо ресурс T . Наприклад, прийнявши імовірність безвідмовної роботи $P(T) = 0,5$, знайдемо квантиль $U_\alpha = 0$, і з врахуванням (20.38) і (20.47), отримуємо середній строк служби корпусу a :

$$T_{cp} = \frac{X_{\max} - a_0}{K_{cp}} \quad (20.56)$$

Таким чином, якщо прийняти $a_0 = 0$, то середній строк служби корпусу дифузійного апарата дорівнює

$$T_{cp} = \frac{2-0}{1} = 2 \text{ роки}$$

Підставивши у формулу (20.55) значення вихідних даних і, розв'язавши квадратне рівняння відносно Т, отримуємо формулу для розрахунку ресурсу по даній квантилі:

$$T = \frac{K_{cp} X_{\max} + \sqrt{K_{cp}^2 X_{\max}^2 + (U_{\alpha}^2 \sigma_K^2 + K_{cp}^2) \cdot (U_{\alpha}^2 \sigma_a^2 - X_{\max}^2)}}{K_{cp} - U_{\alpha}^2 \sigma_K^2} \quad (20.57)$$

Результати розрахунків зведемо в табл. 20.5.

Таблиця 20.5.

Залежність ресурсу корпусу дифузійного апарата від імовірності його безвідмовної роботи

Імовірність безвідмовної роботи P(T)	Квантиль	Ресурс T, років
0,9	1,282	1,701
0,99	2,326	1,476
0,999	3,090	1,319

З наведених розрахунків виходить, що вибір ресурсу корпусу повинен бути достатньо точним, тому що невеликі його зміни можуть значно вплинути на імовірність безвідмовної роботи дифузійного апарата тому що його корпус є базовою деталлю.

Запропонована методика розрахунку дозволяє на основі апріорної вихідної інформації про стан машин чи апаратів і можливі умови їх експлуатації розрахувати ресурс при заданій імовірності безвідмовної роботи, визначити які заходи будуть мати найбільший ефект для підвищення надійності і зробити кількісну оцінку значимості кожного з чинників. Разом з тим, ця методика може уточнюватись по мірі накопичення статистичних даних по кожному зразку технологічного обладнання.

Запитання і завдання для самоперевірки

1. Якими параметрами можна описати термодинамічну систему при зношуванні металів і сплавів в технологічних середовищах харчових виробництв?
2. Запишіть дисипативну функцію, за допомогою якої можна оцінити швидкість розсіювання енергії при зношуванні деталей в агресивних середовищах.
3. Як визначити приведену швидкість зношування твердих тіл в технологічних середовищах?
4. Як визначити зовнішню роботу, виконану над системою тертя і дисипативну функцію, яка визначає розсіюну енергію при зношуванні?
5. Як впливає рівноважний електродний потенціал металевої поверхні на швидкість її зношування в агресивному технологічному розчині?
6. Як керувати корозійно-механічним зношуванням деталей за рахунок зміни електродного потенціалу контактуючих поверхонь пари тертя?

7. Поясніть основні положення, на яких ґрунтується побудова кінетичних діаграм зносостійкості матеріалів.
8. Як скористатися кінетичними діаграмами зносостійкості для визначення перспективних захисних покриттів?
9. Як визначити строк служби деталі з захисним покриттям за середнім значенням швидкості його зношування?
10. Опишіть порядок розрахунку ресурсу і корпусу дифузійного апарата цукрового заводу, якщо відома середня швидкість його корозійно-механічного зношування і її середнє квадратичне відхилення, товщина протикорозійного покриття на корпусі і її середнє квадратичне відхилення за умови забезпечення заданої імовірності безвідмовної роботи апарата.

[перейти до змісту](#)

ПІСЛЯМОВА

Завершуючи курс „Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв”, автори ще раз звертають увагу читача на те, що підвищення якості продукції підприємств галузі – головна з основних задач сучасного економічного розвитку України. Якість продукції харчового машинобудування, яка базується на підґрунті його надійності і довговічності, визначає не лише конкурентоздатність вироблених машин і апаратів, але і продукції, виготовленої з їх використанням.

Методи підвищення надійності і довговічності технічних об'єктів і систем харчових виробництв різнопланові і не можуть бути запозичені з загального машинобудування, радіотехніки, авіації, зв'язку тощо. Ця особливість пов'язана зі специфічними умовами роботи обладнання, деталі якого перебувають у безпосередньому контакті з агресивними харчовими технологічними середовищами, що мають широкий спектр фізичних, хімічних та реологічних властивостей.

Нами розглянуті основні показники надійності машин та апаратів, фізичні процеси, що обумовлюють їх відмови, методи випробувань на надійність, особливості визначення показників надійності і довговічності обладнання харчових і переробних, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв, пакувальної техніки і холодильних машин та різноманітні способи їх підвищення.

Наука про надійність і довговічність таких технічних об'єктів розвивається порівняно недавно, а тому її потрібно постійно доповнювати, спираючись на результати виробничих, аналітичних і експериментальних досліджень. Основними об'єктами цих досліджень повинні бути такі:

1. Методи технічної кібернетики та їх використання для підвищення надійності і довговічності виробів.
2. Нові методи конструювання машин на базі уніфікованих і стандартизованих вузлів.
3. Методи прискорених випробувань на надійність і довговічність.
4. Процеси руйнувань і зміни початкових властивостей елементів технічних об'єктів і систем.
5. Вплив методів обробки поверхонь і поверхневого захисту на експлуатаційні характеристики деталей.
6. Методи розрахунку надійності та довговічності машин і апаратів з урахуванням корозії, зносу та особливостей експлуатації.
7. Способи підвищення надійності і довговічності технічних об'єктів та систем.

Розвивати ці напрямки досліджень потрібно новій кагорті інженерів-механіків з тим, щоб Україна мала своє, надійне і довговічне, конкурентоздатне на внутрішньому та зовнішньому ринках обладнання для переробки сільськогосподарської сировини у високоякісні продукти харчування.

Додатки

Додаток 1

Параметри потоку відмов деталей і вузлів обладнання харчових і переробних виробництв

№ п/п	Назва деталі (вузла)	Параметр потоку відмов, $\omega(t) \times 10^{-6}$, I/год		Примітка
		Інтервал	Середнє значення	
1	2	3	4	5
I. Механічне обладнання				
1.	Абразивні круги	-	13,4	Використовується в шліфувально-обдирочних машинах
2.	Амортизатори: пружинні гумові	- -	44,05 35,9	
3.	Болти фундаментні		0,12	На один болт
4.	Вали: колінчасті редукторні відкритих передач	68-230 " " 1,5-6,2	147 " " 2,0	
5.	Вальці рифлені	460-2000	1200	На пару вальців
6.	Варіатори клинопасові	-	1481	Для важких умов роботи
7.	Вентилятори витяжні	-	0,225	
8.	Вібратори	-	0,875	
9.	Повітрорудвки	-	2,4	
10.	Вентилятори лопатні осьові	-	1,22	
11.	Пара тертя: втулка-палець	-	650	Важкі умови роботи: удари, вібрація, наявність абразиву
12.	Деки молоткових дробарок	26,8-171	-	
13.	Дозатори: вагові об'ємні	- -	2000 1000	Для сипких матеріалів Для сиру, паст
14.	Діафрагми	-	0,6	
15.	Деталі типу повзуни	-	0,35	
16.	Грузові блоки	-	0,83	
17.	Зірочки ланцюгових передач	0,01-0,04	0,02	
18.	Канати сталеві навантажені	-	222	Критерій відмови: обривання кількості ниток більше допустимого
19.	Кожухи	0,04-1,2	0,6	
20.	Копри	-	1000	
21.	Корпуси: узагальнені значення механічно оброблені підшипників	- 0,021-1,87 0,16-9,1	1,45 - 2,4	При значних радіальних зусиллях
22.	Кронштейни	0,01-0,04	0,02	
23.	Колодки фрикційних муфт: сепараторів ОМЕ-С сепараторів ОСН-С	- -	154 1059	
24.	Робочі колеса відцентрових насосів при: роботі в інертному середовищі в агресивному середовищі	- -	12,3 36,6	
25.	Розтискні кулачки гальмівних пристроїв	-	800	Важконавантажені
26.	Кондукторні втулки	-	0,565	
27.	Клеми	-	0,0006	
28.	Кришки підшипників	-	0,0875	
29.	Кожухи запобіжні	-	0,038	
30.	Коробки передач	-	0,68	
31.	Корпуси	-	1,1	

Продовження додатку 1

1	2	3	4	5
32.	Корпуси підшипників відлиті з механічною обробкою	-	0,4	
33.	Колодочний тормоз	-	1,2	
34.	Канати звичайні	-	0,59	
35.	Металоконструкції	-	0,8	
36.	Магніти постійні	2,02-7,11	5,65	
37.	Механічні роз'ємні з'єднання	0,01-0,1	0,05	
38.	Змішувачі	-	50	Робота в агресивному середовищі
39.	Муфти: пасові зчеплення механічні пружинні тертя	85-314 435-71 2,7-13,5 -	130 453 3,9 658	Важкоавантажені Важкоавантажені
40.	Кінцевики гумові	-	54,3	Інтенсивна робота
41.	Направляючі з паралельними площинами	-	2,5	Робота з мастилом
42.	Нагрівачі з камерою згоряння	-	4,9	
43.	Обмежувачі	0,1-0,35	0,27	
44.	Осі: робота з мастилом робота без мастила	0,15-1,2 -	0,57 95,0	
45.	Пальці	-	62,5	Інтенсивна робота, удари, абразив
46.	Передачі: гвинт-гайка гвинтові диференційні зубчасті редукторів малонавантажени зубчасті редукторів важкоавантажені Ременні: важкоавантажені легкоавантажені черв'як-зубчастий сектор черв'ячні ланцюгові	0,14-1,59 - 10-194 12-20,1 71,5-222 - 3,6-40 - - 4,95-120	0,86 164 120 10 120 21,3 81,9 22,5 43,6 -	В сепараторах Важкоавантажені Важкоавантажені
47.	Дозатори молоткових дробарок	-	72,50,76	
48.	Підшипники кочення: гольчасті (легка серія) роликові (легка серія) кулькові (важка серія) (легка серія) (молоткових дробарок)	- - 2,7-100 - 170-327	0,75 3,35 25,7 8,6 247	На сепаратор "-" "-"
	відцентрових сепараторів: кульковий дворядний горловий сепаратора ОМБ-3С кульковий дворядний горловий сепаратора ОСТ-3 кульковий однорядний горизонтального вала сепаратора ОСН-С кульковий однорядний вертикального вала горлової опори сепаратора ОСН-С кульковий однорядний вертикального вала горлової опори сепаратора ОСН-С кульковий вертикального вала (нижній) сепаратора ОСН-С	- - - - - -	322 170 203 370 245 210	
49.	Підшипники ковзання: (по зносу шийки)	-	25,0	Важкоавантажені

Продовження додатку 1

1	2	3	4	5
50.	Пристосування для фіксації і затискування металевих заготовок в автоматичних лініях: (заготовки середньої складності): при 100 цикл/год при 500 цикл/год при 1000 цикл/год	- - -	13900 71400 139000	
51.	Противаги регульовані: малі великі	- 0,13-0,54	0,1 0,44	
52.	Пружини: узагальнені значення горлової опори сепаратора ОСН-С калібровані клапанів	0,46-11,0 - - -	4,52 144 0,22 95,2	
53.	Пари типу ролик-кулачок	-	0,21	
54.	Паз для штифта	-	0,025	
55.	Приводи зі шківками фрикційні	-	0,16	
56.	Прокладки ущільнюючі (шайби)	-	0,01	
57.	Пружини калібровані	-	0,22	
58.	Пружини прості зворотні	-	0,012	
59.	Литі конструкції основних деталей	-	0,175	
60.	Пасові приводи	-	3,6	
61.	Різальний апарат багатоніжковий	31200-36000	34000	Для косарок
62.	Різьбові з'єднання	-	0,05	
63.	Ресори: важконавантажені малонавантажені розвантажені	250-500 - -	375 0,11 0,11	
64.	Ролики: кулачкових механізмів: термічного зварювання сталі органічних матеріалів	5,25-25,0 - -	15,1 5000 653	
65.	Решета	-	653	
66.	Скоби	0,01-0,04	0,02	
67.	Змішувачі	-	1631	Агресивне середовище
68.	Собачки	0,1-0,4	0,2	
69.	З'єднання: механічні (болтами, гвинтами) шарнірні шліцьові	0,01-0,1 2,5-15,0 15-166	0,05 8,0 70,0	
70.	Стакани	0,05-0,2	0,08	
71.	Лічильники механічні	-	2,5	
72.	Зубчасті муфти	-	0,063	
73.	Зірочка	-	0,08	
74.	Тахометри	-	0,3	
75.	Теплообмінники	-	15	
76.	Накладки колодкових гальм	25-41,6	28,5	Крім рідинних сепараторів
77.	Транспортні пристрої	-	20000	
78.	Гальма колодкові	-	78,0	Крім рідинних сепараторів
79.	Транспортери ланцюгові	1530-5710	2770	Довжина транспортера до 3 м
80.	Тяги	0,01-0,04	0,03	
81.	Ущільнювачі, що обертаються	-	0,7	
82.	Ущільнювачі ковзання	-	0,3	
83.	Хомути	-	0,03	
84.	Храповики	-	0,01	
85.	Фіксатори кулькові	2,0-10,0	6,0	
86.	Кулькові опори	-	500	Важконавантажені

Продовження додатку 1

1	2	3	4	5
87.	Шкворні	-	50	
88.	Шпильки	0,2-0,8	0,4	
89.	Шпоночні з'єднання	-	7,5	Важконавантажені
90.	Шплінти	0,03-0,4	0,18	
91.	Шнекові пристрої	-	5347	З чорних металів
92.	Штанги плунжерів	-	0,68	
93.	Штифти: загального призначення направляючі запобіжні	0,4-7,5 - -	3,2 2,25 426	
94.	Штоки	0,8-8,5	2,0	
95.	Фіксуючі штифти	-	0,94	
96.	Шестерні	-	0,12	
97.	Шків, колеса ведучі	-	0,025	З чорних металів
98.	Ексцентрики	0,01-0,02	-	
II.	Гідравлічне обладнання			
1.	Гідродатчики	-	10,0	
2.	Гідродвигуни	4,3-6,0	5,15	
3.	Гідропідсилювачі	-	519	
4.	Датчики тиску мастила	-	100	
5.	Демпфери	-	0,15	
6.	Діафрагми	0,6-1,5	1,1	
7.	Диски гідромуфти: ведучі відомі	- -	0,2 1,1	
8.	Дроселі: узагальнені значення з регулятором і запобіжним клапаном	1,4-16,4 -	8,77 2,2	
	з регулятором і зворотним клапаном	-	1,8	
9.	Засувки	3,48-9,07	-	
10.	Золотники: напорні реверсивні з гідроправлінням реверсивні з е/м управлінням	- - -	3,6 8,0 4,5	
11.	Клапани: запірні запірні штуцерні золотникового типу зворотні переключення потоку молока запобіжні перепусні редукторні е/м сепаратора AI-ОУМ-70 при: промиванні розвантаженні	0,75-11,0 - - 5,1-6,0 - - - - - - -	5,8 3,0 1,5 5,55 200 5,7 4,0 8,5 8,64 85,6	
12.	Манометри	-	3,7	
13.	Мембрани: гумові металічні з тканини	3,0-6,6 0,4-2,0 1,0-2,0	4,5 1,2 1,5	
14.	Мірники	-	1,0	
15.	Насоси аксиально-поршневі: нерегульовані що регулюються діафрагмові водяні відцентрові шестеренні: заг. призначення для густого мастила для ацетатних розчинів	- - - 12,0-326 13-18,0 - -	9,0 20,0 388 209 14,7 18,0 99,0	
16.	Подавачі двохлінійні централізованого мащення	9,65-53,4	17,7	
17.	Пластини охолоджувача молока AI- ОСЛ 2-5	-	4,6	

Продовження додатку 1

1	2	3	4	5
18.	Пластини пастеризаторів: П2 П3	- -	6250 1058	
19.	Поршні	0,2-0,65	0,34	Без кілець і втулок
20.	Регулятори: тиску витрат рівня (поплавкові)	3,55-5,25 - 5,25-102	4,35 3,0 53,5	
21.	Прокладки кільцеві	-	0,02	
22.	Прокладки коркові	-	0,04	
23.	Прокладки гумові	-	0,02	
24.	Резервуари: високого тиску низького тиску для зберіг. агрес. середовища	1,03-6,8 0,15-0,28 -	4,87 0,22 416	
25.	Реле тиску	3,5-10,0	6,7	
26.	Сопло-шторка	-	1,5	
27.	Штовхачі електрогідрравлічні	62,5-275	132	
28.	Ущільнювачі: ведучого валу компресора промислових холод. агрег. що обертаються, без обтискування що обертаються, з кільцевим обтискуванням пружиною поступальні нерухомі: малі пластин охолоджувача АІ- 00Л-2Б сальникова набивка	17,0-56,0 6,25-90,9 - 0,3-4,25 0,2-0,3 - -	30,5 47,0 10,0 1,2 0,26 3,12 40,0	
29.	Фільтри механічні: узагальнені значення пластинчасті приймально-сітчасті магнітно-сітчасті	3,21-5,6 - - -	- 3,5 4,0 5,6	
30.	Циліндри	0,01-4,5	1,5	
III.	Пневматичне обладнання			
1.	Автомат вмикання компресора	5,1-15,3	10,5	
2.	Вентилі	8,0-10,5	9,3	
3.	Розподільники повітря: трьохпозиційні: В76-21 ІВ76-21 МВ76-21 ГВ76-21 БВ76-21 КВ76-21 ОВ76-21 ДВ76-21 І71-33М	- - - - - - - - -	- 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0	
4.	Датчики тиску: узагальнені знач. диференційні	11,0-112 -	50,0 30,9	
5.	Золотники	5,0-10,0	-	3 мідних сплавів

Продовження додатку 1

1	2	3	4	5
6.	Клапани: високого тиску запірні тарільчасті: з рідкою посадкою з пивною посадкою з капронов. ущільнювачем з гумовим ущільнювачем періодичної дії: швидкого вихлопу проміжні редукторні редукційні за ГОСТ 18468-79 з е/м приводом запобіжні: узагальнені значення по ССТ2858-1-78 граничного тиску пускові	- - 66-600 12-220 - 2,62-11,7 - - - - 3-40 - - -	260 5,8 333 70 16,3 8,0 - 5,8 783 400 8,6 - 40 33 10	В сепараторі AI-ОУМ-10
7.	Командний електропневм. прилад	7,9-25,7	15	
8.	Манометри	1,3-26	7,4	
9.	Мастилорозпилювачі за ГОСТ25531-82	-	40	
10.	Мембрани	2-3	-	
11.	Насоси: вакуумні нагнітальні (компресори): аксиально-поршневі холод. машин з відкр. компресор -//- з герметичним компресор	- 9-26,71 50,2-98,0 750-830	70 42,6 72,4 790	
12.	Ніпелі	0,11-2,0	0,2	
13.	Перемикачі багатопозиційні	-	-	
14.	Пневмоблоки: підготовки повітря	-	3,33	
15.	Пневмодвигуни: шиберні, реверсивні	-	550	
16.	Пневмогідродроселі: вихлопні	-	50	
17.	Присоски вакуумні: круглі дрібні прямокутні	- -	40000 10900	
18.	Резервуари: вакуумні під тиском	- 1,25-12	2,0 6,41	
19.	Реле часу	1,15-6,8	3,51	Електромеханічні
20.	Сільфони	2,2-8	4,16	
21.	Уніфіков. система автоматики (УСЭППА): ПІР.1, ПІР.2 П2ПІ (п-І) П2ЭС.3 (ЭС-5), П2П.7 (ПУ) П2Д.4 (Д) П2Д.2 (ПД) П2ЗД.4 (ЗУ) П3К5 (К або С) ПІКн (Пк) ПІПр4 (ПЭ) ПІПр5 (ПЭ)	- - - - - - - - - - -	2,12 12,4 12,4 22,2 4,14 16,5 3,39 30,3 20,0 38,1	
22.	Ущільнювачі торцьові, що обертаються, апаратів харчових і хім.. виробництв: ТТ ТСК ТСД ТД ТДФ	- - - - -	50,0 50,0 50,0 70,0 70,0	
23.	Шатунно-поршнева група компресорів холодильних машин	-	70,0	Робота на хладачах 12 і 22
24.	Шланги пневматичні	-	3,66	
IV.	Трубопроводи і арматура трубопроводів			
1.	Трійники, хрестовини, коліна, муфти	1,1-2,9	2,0	

Продовження додатку 1

1	2	3	4	5
34.	Тумблери	-	10	
35.	Автоматичні електронні мости	-	0,1	
36.	Електромагніти з поворотним якорем змінного струму	8,61-17,2	10,04	

Додаток 2
Таблиця Д 2.1

Значення функції $\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] dz$

u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0.0000	.00399	.00789	.01197	.01595	.01994	.02392	.02790	.03188	.03586
0.1	0.03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535
0.2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409
0.3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173
0.4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439	18793
0.5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240
0.6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490
0.7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524
0.8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327
0.9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891
1.0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214
1.1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298
1.2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973	40147
1.3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41309	41466	41621	41774
1.4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189
1.5	43319	43448	43547	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408
1.6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449
1.7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327
1.8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062
1.9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670
2.0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169
2.1	48214	48257	48300	48371	48382	48422	48641	48500	48537	48547
2.2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899
2.3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158
2.4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361
2.5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506	49520
2.6	49534	49647	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643
2.7	49563	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736
2.8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807
2.9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861
3.0	.04986		3.1	49903	3.2	49931	3.3	49952	3.4	4996
3.5	49977		3.6	49984	3.7	49980	3.8	49993	3.9	49995
4.0	499968									
4.5	499997									
5.0	499999									

Таблиця Д 2.2

Значення гамма-функцій $\Gamma(x)$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1.00	1.00000	1.25	0.90640	1.50	0.88623	1.75	0.91906
1	0.99433	6	0.90440	1	0.88659	6	0.92137
2	0.98884	7	0.90250	2	0.88704	7	0.92376
3	0.98355	8	0.90072	3	0.88757	8	0.92623
4	0.97844	9	0.89904	4	0.88818	9	0.92877
1.05	0.97350	1.30	0.89747	1.55	0.88887	1.8	0.93138
6	0.96874	1	0.89600	6	0.88964	1	0.93408
7	0.96415	2	0.89464	7	0.89049	2	0.93685
8	0.95973	3	0.89338	8	0.89142	3	0.93369
9	0.95546	4	0.89222	9	0.89243	4	0.94261
1.10	0.95135	1.35	0.89115	1.60	0.89352	1.85	0.94561
1	0.94740	6	0.89018	1	0.89352	6	0.94869
2	0.94359	7	0.88931	2	0.89592	7	0.95184
3	0.93993	8	0.88854	3	0.89724	8	0.95507
4	0.93642	9	0.88785	4	0.89864	9	0.95838
1.15	0.93304	1.40	0.88726	1.65	0.90012	1.90	0.96177
6	0.92980	1	0.88676	6	0.90167	1	0.96523
7	0.92670	2	0.88636	7	0.90330	2	0.96877
8	0.92373	3	0.88604	8	0.90500	3	0.97240
9	0.92089	4	0.88581	9	0.90678	4	0.97610
1.20	0.91817	1.45	0.88566	1.60	0.90864	1.95	0.97988
1	0.91558	6	0.88560	1	0.91057	6	0.98374
2	0.91311	7	0.88503	2	0.91258	7	0.98768
3	0.91075	8	0.88575	3	0.91467	8	0.99171
4	0.90852	9	0.88595	4	0.91683	9	0.99581
						2.00	1.00000

Квантилі розподілу хі-квадрат

Додаток 3

К-сть ступенів вільності, К	Імовірність P															
	0.999	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900	0.800	0.700	0.300	0.200	0.100	0.075	0.050	0.010	0.005	0.001
1	0.16x 10 ⁻⁵	0.39x 10 ⁻⁴	0.16x 10 ⁻³	0.98x 10 ⁻³	0.39x 10 ⁻²	0.016	0.064	0.148	1.07	1.64	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88	10.8
2	0.20x 10 ⁻²	0.010	0.020	0.051	0.103	0.211	0.446	0.713	2.14	3.22	4.61	5.99	7.38	9.21	10.6	13.8
3	0.024	0.072	0.115	0.216	0.352	0.584	1.00	1.42	3.67	4.64	6.25	7.81	9.35	11.3	12.8	16.3
4	0.091	0.207	0.297	0.484	0.711	1.06	1.65	2.19	4.88	5.99	7.78	9.49	11.1	13.3	14.9	18.5
5	0.210	0.412	0.554	0.831	1.15	1.61	2.34	3.00	6.06	7.29	9.24	11.1	12.8	15.1	16.7	20.5
6	0.381	0.676	0.872	1.24	1.64	2.20	3.07	3.83	7.23	8.56	10.6	12.6	14.4	16.8	18.5	22.5
7	0.598	0.989	1.24	1.69	2.17	2.83	3.82	4.67	8.38	9.80	12.0	14.1	16.0	18.5	20.3	24.3
8	0.857	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	4.59	5.53	9.52	11.0	13.4	15.5	17.5	20.1	22.0	26.1
9	1.15	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	5.38	6.39	10.7	12.2	14.7	16.9	19.0	21.7	23.6	27.9
10	1.48	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	6.18	7.27	11.8	13.4	16.0	18.3	20.5	23.2	25.2	29.6
11	1.83	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	6.99	8.15	12.9	14.6	17.3	19.7	21.9	24.7	26.8	31.6
12	2.21	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	7.81	9.03	14.0	15.8	18.5	21.0	23.3	26.2	28.3	32.9
13	2.62	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	8.63	9.93	15.1	17.0	19.8	22.4	24.7	27.7	29.8	34.5
14	3.04	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	9.47	10.8	16.2	18.2	21.1	23.7	26.1	29.1	31.3	36.1
15	3.48	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	10.3	11.7	17.3	19.3	22.3	25.0	27.5	30.6	32.8	37.7
16	3.94	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	11.2	12.6	18.4	20.5	23.5	26.3	28.8	32.0	34.3	39.3
18	4.90	6.26	7.01	8.23	9.39	10.9	12.0	14.4	20.6	22.8	26.0	28.9	31.5	34.8	37.2	42.3
20	5.92	7.43	8.26	9.59	10.9	12.4	14.6	16.3	22.8	25.0	28.4	31.4	34.2	37.6	40.0	45.3
22	6.98	8.64	9.54	11.0	12.3	14.0	16.3	18.1	24.9	27.3	30.8	33.9	36.8	40.3	42.8	48.3
24	8.08	9.89	10.9	12.4	13.8	15.7	18.1	19.9	27.1	29.6	33.2	36.4	39.4	43.0	45.6	51.2
26	9.22	11.2	12.2	13.8	15.4	17.3	19.8	21.8	29.2	31.8	35.6	38.9	41.9	45.6	43.3	54.1
28	10.4	12.5	13.6	15.3	16.9	18.9	21.6	23.6	31.4	34.0	37.9	41.3	44.5	48.3	51.0	56.9
30	11.6	13.8	15.0	16.8	18.5	20.6	23.4	25.5	33.5	36.3	40.3	43.8	47.0	50.9	53.7	59.7
35	14.7	17.2	18.35	20.6	22.5	24.8	27.8	30.2	38.9	41.8	46.1	49.9	53.2	57.3	60.3	66.6
40	17.9	20.7	22.2	24.4	26.5	29.1	32.3	34.9	44.2	47.3	51.8	55.8	59.3	63.7	66.8	73.4
45	21.3	24.3	25.9	28.4	30.6	33.4	36.9	39.6	49.5	52.7	57.5	61.7	65.4	70.0	73.2	80.1
50	24.7	28.0	29.7	32.4	34.8	37.7	41.4	44.3	54.7	58.2	63.2	67.5	71.4	76.2	79.5	86.7
55	28.2	31.7	33.6	36.4	39.0	42.1	46.0	49.1	60.0	63.6	68.8	73.3	77.4	82.3	85.7	93.2
60	31.7	35.5	37.5	40.5	43.2	46.5	50.6	53.8	65.2	69.0	74.4	79.1	83.3	88.4	92.0	99.6
65	35.4	39.4	41.4	44.6	47.4	50.9	55.3	58.6	70.5	74.4	80.0	84.8	89.2	94.4	98.1	106.0
70	39.0	43.3	45.4	48.8	51.7	55.3	59.9	63.3	75.7	79.7	85.5	90.5	95.0	100.4	104.2	112.3
75	42.8	47.2	49.5	52.9	56.1	59.8	64.5	68.1	80.9	85.1	91.1	96.2	100.8	106.4	110.3	118.6
80	46.5	51.2	53.5	57.2	60.4	64.3	69.2	72.9	86.0	90.4	96.6	101.9	106.8	112.3	116.3	124.8
85	50.3	55.2	57.6	61.4	64.7	68.8	73.9	77.7	91.3	95.7	102.1	107.5	112.4	118.2	123.3	131.0
90	54.2	59.2	61.8	65.6	69.1	73.3	78.6	82.5	96.5	101.1	107.6	113.1	118.1	124.1	128.3	137.2
95	58.0	63.2	65.9	69.9	73.5	77.8	83.2	87.3	101.7	106.4	113.0	118.8	123.9	130.0	134.2	143.3
100	61.9	67.3	70.1	74.2	77.9	82.4	87.9	92.1	106.9	111.7	118.5	124.3	129.6	135.8	140.2	149.4

Квантилі розподілу Стюдента

К-сть ступенів вільності, к	Імовірність Р									
	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.975	0.990	0.995	0.999	0.9995
1	0.325	0.727	1.376	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.3	636.6
2	0.289	0.617	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.33	31.60
3	0.277	0.584	0.978	1.638	2.353	3.182	3.541	5.841	10.22	12.94
4	0.271	0.569	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.267	0.559	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.803	6.859
6	0.265	0.553	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.263	0.549	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.490	4.885	5.405
8	0.262	0.546	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.261	0.543	0.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.260	0.542	0.879	1.372	1.812	2.228	2.784	3.169	4.144	4.587
11	0.260	0.540	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.259	0.539	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.259	0.538	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.258	0.537	0.868	1.234	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.258	0.536	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.258	0.535	0.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.257	0.534	0.863	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.257	0.534	0.862	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.611	3.965
19	0.257	0.533	0.861	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.257	0.533	0.860	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.257	0.532	0.859	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.256	0.532	0.858	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.256	0.532	0.858	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.767
24	0.256	0.531	0.857	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.256	0.531	0.856	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.256	0.531	0.856	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.256	0.531	0.855	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.256	0.530	0.855	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.256	0.530	0.854	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.256	0.530	0.854	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.255	0.529	0.851	1.303	1.984	0.021	2.423	2.704	2.307	2.551
50	0.255	0.528	0.849	1.298	1.676	2.002	2.403	2.678	2.262	2.495
60	0.254	0.527	0.848	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.232	2.460
80	0.254	0.527	0.846	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.415
100	0.254	0.526	0.845	1.290	1.660	1.984	2.365	2.626	3.174	3.389
200	0.254	0.525	0.843	1.286	1.653	1.972	2.345	2.601	3.131	3.339
500	0.253	0.525	0.842	1.283	1.648	1.965	2.334	2.586	3.106	3.310
∞	0.253	0.524	0.842	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
$\alpha 1$	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.998	0.999
$\beta 1, \%$	40	30	20	5	5	2.5	1	0.5	0.1	0.05
$\beta 2, \%$	80	60	40	10	10	5	1	1	0.2	0.1

Список літературних джерел

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский С.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.- 279 с.
2. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – 356 с.
3. Бурлаков В.И., Германчук Ф.К., Комарович В.Н. и др. Анализ надежности авиационной техники. Методические указания. – К.: КИИГА, 1982. – 40 с.
4. Вайнберг А.А., Котляр Л.И. Эксплуатационная надежность оборудования зерноперерабатывающих предприятий.–М.: Колос, 1971. -207 с.
5. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности.- М.: Наука, 1965.- 524 с.
6. Голубец В.М., Пашечко М.И. Износостойкие покрытия из эвтектики на основе системы Fe – Mn – C – V. – К.: Наукова думка, 1989. – 150 с.
7. Гутман З.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. - М.: Металлургия, 1974. – 250 с.
8. 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.
9. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 536 с.
10. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення.
11. ДСТУ 2864-94. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. – Введ. 01.01.96.
12. ДСТУ 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. Введ. 01.-1.95.
13. Елизаветин М.А. Повышение надежности машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.
14. Иванов Е.С. Ингибиторы коррозии металлов в кислых средах: Справочник. – М.: Металлургия. 1986. – 175 с.
15. Интенсификация процессов и защита оборудования пищевых производств / Г.П. Тищенко, Н.Д. Хоменко, В.Ю. Сухенко и др. // Под ред. Ю.Г. Сухенко. – К.: «ДІЯ», 2006. – 224 с.
16. 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..
17. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов.- Киев, 1976.- 126 с.

18. Кваско М.З., Аверіна Т.В. Надійність систем автоматики. К.: Політехніка, 2001. – 196 с.
19. Конторович В.И. Надежность малых холодильных машин. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 222 с.
20. Коррозия. Справ./Под ред. П.П. Шрайера; Пер. с англ.- М.: Металлургия, 1981. – 300 с.
21. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
22. Лутковский В.В. Повышение надежности работы холодильных установок.- Л.: Машиностроение, 1978.- 166 с.
23. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие в 4 т. /Под ред. В.В. Панасюка. – К.: Наукова думка, 1988. – 700 с.
24. Милованов В.И. Повышение долговечности малых холодильных компрессоров. - М.: Пищевая промышленность, 1980.-200 с.
25. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В10 т. – М.: Машиностроение, 1986.
26. Носовский И.Г. Влияние газовой среды на износ металлов. – К.: Техника, 1968. – 181 с.
27. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості: Підручник. / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. – Вінниця: Нова книга, 2001. – 576 с.
28. 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.
29. Поморский Ю.Л. Методы статистического анализа экспериментальных данных: Методическое руководство для научных работников и аспирантов. – Л.: ГУУЗ Наркомплеса СССР, 1940. – 174 с.
30. Половко А.М. Основы теории надежности.- М.: Наука, 1964.- 442 с.
31. Прейс Г.А. О природе коррозионно-механического изнашивания металлов // Трени и износ, 1987. - Т.3. - №5. – С. 792-797.
32. Прейс Г.А., Сологуб Н.А., Некоз А.И. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности.- М.: Машиностроение , 1979.- 208 с.
33. 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.
34. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 591 с.
35. Проников А.С. Основы надежности и долговечности машин. – М.: Машгиз, 1960. – 250 с.

36. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. І.Ф. Малєжика. – К.: НУХТ, 2003. – 400 с.
37. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
38. Слынько А.И., Науменко В.Д. Анализ причин вынужденных остановок сахарных заводов // Сахарная промышленность.- 1986.- № 10.- С.27-28.
39. 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.
40. Структурутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів /Кіндрачук М.В., Куницький Ю.А., Сухенко Ю.Г. та ін.. – К.: Вища школа, 1997. – 120 с.
41. 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.
42. 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.
43. Сухенко Ю.Г. Корозійна стійкість газотермічних покриттів на деталях харчового обладнання // Харчова промисловість.- К.: УДУХТ.- 1988.- Вип.43-44.-С.197-199.
44. 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.
45. 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
46. Сухенко Ю.Г., Некоз О.І., Стечишин М.С. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості.- Київ: Елерон, 1993.- 107 с.
47. Тищенко Г.П. , Трофимович А.Н. Повышение долговечности пищевого оборудования: Монография. – М.: Агропромиздат, 1985.-208 с.
48. Формальчук Є.Ю., Орискевич М.С., Мاستикаш О.Л., Пельо Р.А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів. – Львів: «Афіша», 2004. – 492 с.
49. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. – М.: Мир, 1967. – 250 с.

50. Хасуй А. Техника напыления /Пер. С яп. – М.: Машиностроение, 1975. – 250 с.
51. Холодильные компрессоры: Справочник / Под ред. А.В. Быкова.- М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981.- 279 с.
52. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки: Навч. Посібник. – К.: Кондор, 2004. – 166 с.
53. Чернец М.В. К вопросу об исследовании кинетики изнашивания материалов при некоторых видах трения скольжения //Трение и износ, 1987. - №4. – С. 662-670.
54. Чернець М., Невчас, Скварок Ю. Дослідження і підвищення зносостійкості матеріалів та оцінка довговічності і надійності триботехнічних систем . – Дрогобич-Люблін. 2000. – 320 с.
55. Чупахин Н.М. Монтаж, эксплуатация и ремонт холодильных установок. М.: Пищевая промышленность, 1988. – 150 с.
56. Шакалов В.М., Сухенко В.Ю., Таран В.М. Протикорозійні інгібітори для котлоагрегатів //Харчова і переробна промисловість. - №8. – 2002. – С. 27-28.
57. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Сухенко Юрій Григорович, докт. техн. наук, проф.

Литвиненко Олександр Анатолійович, канд. техн. наук, доц.

Сухенко Владислав Юрійович, канд. техн. наук, доц.

НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ УСТАТКУВАННЯ ХАРЧОВИХ І ПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ

Підручник

Редактор _____

Верстка _____

Технічний редактор _____

Коректор _____

Оформлення художника _____

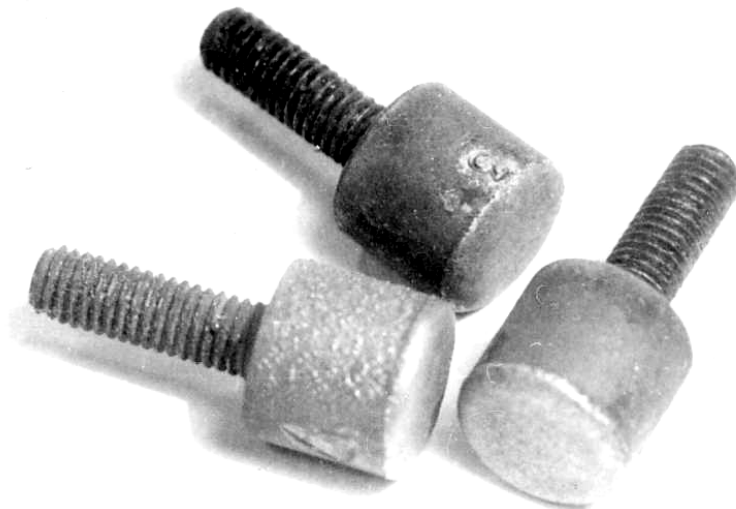
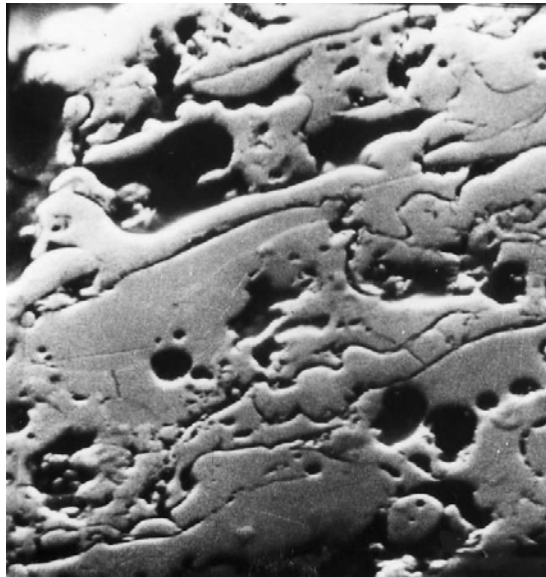
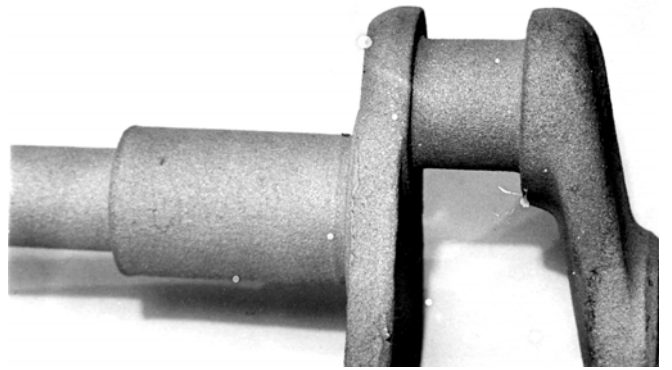
Видавництво РВЦ НУХТ

Здана в набір _____ Підписана до друку _____

Формат _____. Друк офсетний.

Умовн. друк. листів 25. Заказ _____. Ціна договірна.

Тираж 500 прим.



Видавництво
РВЦ НУХТ

