

Є.І. Шифрін, Є.І. Сокол, В.Л. Чухліб,
С.О. Губський, Р. Lechner, W. Volk

Якість металопродукції



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Є. І. Шифрін, Є. І. Сокол, В. Л. Чухліб, С. О. Губський, Р. Lechner, W. Volk

ЯКІСТЬ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ

Навчальний посібник
для студентів технічних спеціальностей
усіх форм навчання

Рекомендовано Вченою радою НТУ «ХП»

Харків
НТУ «ХП»
2025

УДК 621.78
Я 45

Рецензенти:

В. В. Кухар, доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи,
Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»;
О.І. Тришевський, доктор технічних наук, професор, Державний
біотехнологічний університет

Рекомендовано Вченою радою НТУ «ХПІ» як навчальний посібник
для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання,
протокол № 1 від 24.01.2025 року

Я 45 **Якість** металопродукції : навчальний посібник / Є. І. Шифрін, Є. І. Сокол,
В. Л. Чухліб, С. О. Губський, Р. Lechner, W. Volk. – Харків : НТУ «ХПІ»,
2025. – 415 с.

ISBN 978-617-05-0533-0

Визначено основу поняття якості металопродукції, її оцінки, засобів і методів контролю та управління. З урахуванням сучасних вимог стандартів якості та стрімкого розвитку технологій розглянуто напрями розвитку й організації контролю якості металопродукції на підприємствах. Викладено основи комплексного системного підходу до вирішення проблем якості продукції.

Призначено для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання технічних спеціальностей, при курсовому та дипломному проектуванні, а також може бути корисним для викладачів, науковців та працівників підприємств, які пов'язані з виробництвом, контролем та управлінням якістю продукції.

Іл. 175. Табл. 3. Бібліогр. 139 назв.

УДК 621.78

ISBN 978-617-05-0533-0

© Шифрін Є. І., Сокол Є. І.,
Чухліб В. Л., Губський С. О.,
Lechner P., Volk W., 2025
© НТУ «ХПІ», 2025

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	3
ПЕРЕДМОВА	7
ВСТУП	8
1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ.....	12
1.1. Продукція, виріб, життєвий цикл та технології виробництва металопродукції.	12
1.2. Якість металопродукції, показники якості, дефекти	30
1.3. Контроль якості металопродукції, система забезпечення якості, акредитація, сертифікація	40
2. ХАРАКТЕРНІ ДЕФЕКТИ ПРОДУКЦІЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ. ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ТА СПОСОБИ УСУНЕННЯ	47
2.1. Класифікація дефектів металопродукції.....	47
2.2. Основні дефекти злитків і заготовок.....	48
2.3. Дефекти продукції прокатного виробництва	76
2.4. Дефекти продукції ковальсько-штампувального виробництва	86
2.5. Дефекти безшовних і зварних труб.....	104
2.6. Дефекти, що утворюються під час термічної обробки металопродукції	133
2.7. Дефекти, що виникають під час виконання оздоблювальних операцій.	136
2.8. Основні дефекти, що виникають під час експлуатації металовиробів.....	144
3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ. СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ ЯКОСТІ.	146
3.1. Система контролю якості продукції.	146
3.1.1. Контрольовані стадії життєвого циклу продукції (ЖЦП)	147
3.1.2. Об'єкти і суб'єкти технічного контролю якості.....	150
3.1.3. Види технічного контролю	152
3.1.4. Елементи системи контролю якості	156
3.2. Система забезпечення якості	158
3.2.1. Міжнародні стандарти ІСО 9000 система якості.....	159
3.2.2. Японський досвід забезпечення якості продукції.	161
3.2.3. Досвід забезпечення якості на американських підприємствах	165

3.2.4. Розвиток систем забезпечення якості на підприємствах України	168
3.3. Розвиток систем забезпечення якості в сучасних умовах. Основні принципи побудови систем забезпечення якості	170
3.3.1. Побудова системи менеджменту якості. Застосування принципу відображення якості та петля якості.....	174
3.3.2. Напрями розвитку функціональних можливостей систем менеджменту якості.....	180
4. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА ВИПРОБУВАНЬ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ.....	196
4.1. Руйнівні методи технічного контролю	196
4.1.1. Механічні випробування	197
4.1.2. Металографічні дослідження	210
4.1.3. Корозійні випробування	212
4.1.4. Спеціальні види механічних випробувань.....	218
4.2. Неруйнівні методи технічного контролю (НК).....	224
4.2.1. Гідравлічні випробування.	227
4.2.2. Візуально-оптичні методи неруйнівного контролю	227
4.2.3. Капілярний і магнітопорошковий методи неруйнівного контролю	229
4.2.4. Теплові (термографічні) методи неруйнівного контролю.....	233
4.2.5. Радіаційні та рентгенографічні методи неруйнівного контролю	235
4.2.6. Ультразвукові методи неруйнівного контролю	241
4.2.7. Електромагнітні методи неруйнівного контролю	268
4.2.8. Резонансні випробування та оцінка геометричних відхилень ..	277
5. ОСНОВИ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ.....	280
5.1. Загальна характеристика статистичних методів аналізу та контролю якості технологічних процесів і продукції.....	281
5.2. Елементарні (стандартні) інструменти статистичного аналізу та контролю.....	285
5.2.1. Контрольний листок	286
5.2.2. Гістограма якості.....	287

5.2.3. Діаграма розкиду.....	289
5.2.4. Метод стратифікації.....	294
5.2.5. Аналіз (діаграма) Парето.....	298
5.2.6. Діаграма Ісікави	304
5.2.7. Контрольна карта	306
5.3. Проміжні (спеціальні) методи статистичного аналізу.....	314
5.3.1. Метод порівняння середніх значень параметрів із номінальними	317
5.3.2. Статистичний приймальний контроль виробів	321
5.3.3. Статистична компенсація геометричних відхилень у серійному виробництві.....	327
5.4. Передові (аналітичні) статистичні методи	330
5.4.1. Планування експерименту і метод вибіркового обстежень.....	330
5.4.2. Вибір параметрів оптимізації.....	335
5.4.3. Методи факторного аналізу	337
5.4.4. Методи дисперсійного аналізу.....	338
5.4.5. Методи регресійного аналізу	340
6. ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА ПІДПРИЄМСТВІ	344
6.1. Завдання, функції та шляхи вдосконалення діяльності служб контролю якості підприємств	344
6.2. Функції та склад служб контролю якості на підприємствах.....	346
6.3. Основні недоліки в роботі служб контролю якості підприємств	347
6.4. Система профілактики виробництва дефектної продукції та браку на підприємстві	350
6.4.1. Контроль якості нових розробок	352
6.4.2. Вхідний контроль якості продукції, одержуваної за кооперацією.....	354
6.4.3. Контроль дотримання технологічної дисципліни у виробництві	355
6.4.4. Самоконтроль якості у виробництві.....	356
6.5. Економічні аспекти контролю якості продукції	357
6.5.1. Витрати на якість і моделі вартості якості.....	358

6.5.2. Класифікація та облік витрат підприємства на контроль якості.....	361
6.5.3. Шляхи оптимізації витрат на оцінку та контроль якості.....	364
6.5.4. Внутрішньовиробничі та зовнішні непродуктивні витрати і втрати при незадовільному контролі якості.....	368
6.5.5. Результативність витрат на якість	370
6.5.6. Методи аналізу витрат на якість.....	373
Список джерел інформації	403

ПЕРЕДМОВА

У навчальному посібнику «Якість металопродукції» на основі сучасних уявлень розглянуто основні складові поняття якості металопродукції, її оцінки, засобів і методів контролю та управління. Викладено необхідний обсяг інформації, що дає змогу фахівцям вільно орієнтуватися в термінах і визначеннях, класифікації та природі утворення дефектів на всіх стадіях створення металопродукції. Наведено деякі історичні дані, пов'язані з розвитком технологій виробництва і вимог до якості металопродукції та її контролю.

У контексті сучасних вимог стандартів якості та стрімкого розвитку технологій розглянуто напрями розвитку й організації контролю якості металопродукції на підприємствах. Під час підготовки видання враховано існуючий досвід контролю якості, що регулює організацію роботи підприємств.

Класифіковано і докладно наведено засоби і методи руйнівних і неруйнівних видів контролю якості продукції, у тому числі статистичні методи контролю й аналізу якості. Проаналізовано функціональний склад служб контролю якості на підприємствах та недоліки їх роботи, що підкреслює актуальність впровадження ефективних підходів до забезпечення високої якості продукції.

Викладено основи комплексного системного підходу до вирішення проблем якості продукції. Розглянуто існуючі та перспективні напрями в організації на підприємствах роботи з організації випуску бездефектної продукції та сучасні методології, що застосовуються для досягнення цієї мети. Запропоновано методи оцінки втрат від незадовільної якості продукції та витрат на організацію ефективного контролю, а також шляхи оптимізації витрат на оцінку та контроль якості, що визначається як невід'ємні складові організації системної роботи з якості на підприємствах, які прагнуть до досягнення конкурентоспроможності через ефективний контроль якості.

Видання призначене для студентів, викладачів, науковців та працівників підприємств, які пов'язані з виробництвом, контролем та управлінням якістю продукції.

ВСТУП

Єдиною запорукою розвитку - є ефективна та стабільна економіка, що насамперед залежить від випуску конкурентоспроможної продукції. Це є, у свою чергу, показником діяльності не лише окремих підприємств, але й економіки країни загалом. Одним із найважливіших факторів, що визначають успішність діяльності підприємства та забезпечення конкурентоспроможності його продукції є її висока якість, що має відповідати не лише вітчизняним, а й міжнародним стандартам. Якість металопродукції, без якої неможливе існування сучасної цивілізації і яка є однією з важливіших галузей економіки країни, залежить від значної низки факторів, які охоплюють усі сторони існування металевих виробів: від видобування сировини і виготовлення відповідної продукції до її експлуатації, ремонту й утилізації. На кожному з цих етапів маємо основні складові, які впливають на якість продукту. Це кваліфікація виробничого персоналу, якість устаткування і технологічних процесів, всебічний контроль якості продукції та організаційна складова, що має охоплювати усі сторони створення якісних виробів. Саме тому для завоювання міжнародних ринків і забезпечення відповідної конкурентоспроможності металопродукції на вітчизняному та міжнародних ринках необхідно постійно слідкувати за підвищенням її якості, що є запорукою успішного функціонування підприємств. Покращення якості продукції є одним із найважливіших напрямів інтенсивного розвитку економіки країни, джерелом економічного зростання, ефективності суспільного виробництва. У ринковій економіці проблема якості є найважливішим чинником підвищення рівня життя, економічної, соціальної й екологічної безпеки.

Конкурентоспроможність металевих виробів являє собою сукупність властивостей, що показує міру задоволення конкурентної потреби щодо аналогічної продукції, репрезентованої на ринку. У найширшому розумінні це визначає можливість продажу товару на конкретному ринку з певними технічними параметрами і техніко-економічними показникам в конкретний проміжок часу.

Важливою умовою конкурентоспроможності економіки країни, регіону, підприємства є забезпечення відповідної якості та

конкурентоспроможності продукції. Таким чином, конкурентоспроможність продукції підприємства необхідно оцінювати, як щодо регіональних підприємств-конкурентів, так і згідно з міжнародними стандартами та вимогами якості продукції.

Соціально-економічна ефективність підвищення якості продукції, що виготовляється підприємствами, полягає передусім у тому, що високоякісна та конкурентоспроможна продукція завжди повніше й ліпше задовольняє суспільно-соціальні потреби в ній; підвищення якості продукції є специфічною формулою виявлення закону економії робочого часу; конкурентоспроможна продукція забезпечує постійну фінансову стійкість підприємства та сприяє покращенню кінцевих фінансових результатів діяльності підприємства.

Проте поняття якості є одним із найскладніших серед тих, що досліджуються вченими-науковцями, тому досить важко однозначно сформулювати її визначення та значення, оскільки це поняття можна віднести до різноманітних об'єктів.

Якість продукції найчастіше розуміють як сукупність її властивостей, що зумовлюють рівень здатності задовільняти певні потреби споживачів відповідно до їх призначення. Також якість можливо охарактеризувати як сукупність характерних форм, зовнішнього вигляду й умов застосування, якими повинні бути наділені товари відповідно до свого призначення. Вищеперелічені елементи визначають вимоги до якості виробу, які конкретно закладені на етапі проектування в технічній характеристиці виробу, в конструкторській документації, в технічних умовах, що передбачають якість сировини, розміри, хімічні і механічні властивості, відсутність дефектів, гарантії якості, тощо.

Недостатня дослідженість сутності і значення якості продукції продовжує бути однією з основних причин низької ефективності виробництва продукції та її низької конкурентоспроможності на внутрішньому й зовнішньому ринках.

Основними причинами, що визначають необхідність забезпечення і підвищення якості є: безперервне і кількісне зростання потреб (особистих, суспільних, виробничих), їх якісний розвиток і видозміна; зростання ролі та темпів науково-технічного прогресу в розвитку науки, техніки, виробництва,

економіки; удосконалення й ускладнення конструкцій виробів, що випускаються; підвищення значущості функцій, які виконуються ними; наслідок - можливе зростання вартості браку; посилення вимог до інтенсифікації виробництва та підвищення його ефективності; посилення конкуренції на внутрішніх і світових ринках.

Для виробника продукція без дефектів, які б негативно впливали на її продаж, має найвищу цінність. Для споживача найвища цінність з'являється лише тоді, коли властивості продукції максимально відповідають його інтересам. Тому виробник завжди повинен усю свою увагу приділяти задоволенню попиту споживача. Саме ця проблема задоволення попиту існує зараз, оскільки відбулося насичення ринку продукцією, і нові потреби традиційними формами обслуговування не можуть бути забезпечені, що призводить до негативних результатів діяльності підприємства.

Розглядаючи питання забезпечення якості, слід урахувати й те, що поліпшення якості продукції на підприємстві потребує додаткових виробничих витрат, отже, зростає собівартість продукції і, відповідно, її ціна. Проте додаткові витрати повністю відшкодовуються у вищій ціні більш якісного товару, що забезпечує зростання рівня рентабельності й обсягу прибутку.

Аналіз роботи японських, американських і європейських підприємств свідчить, що випуск високоякісної продукції дозволяє отримати потрібну вигоду у вигляді більш низьких виробничих витрат, більш високих чистих доходів, більшої частки ринку. Високоякісна продукція приносить приблизно на 40 % більше прибутку на інвестований капітал, ніж продукція низької якості.

Розглядаючи питання забезпечення якості, справедливим можна вважати вислів, що немає такого явища, як проблема якості, а є проблема організації управління і кваліфікації персоналу, який працює з урахуванням вимог ринку або без такого врахування.

Рівень якості покращується при зацікавленій участі працівників усіх підрозділів підприємства, адже 80–90 % заходів, спрямованих на підвищення якості, не контролюється відділом технічного контролю; для підвищення рівня якості продукції важливим є процес постійного навчання персоналу й підвищення мотивації його праці.

У зв'язку із цим необхідно відзначити роль вищої ланки управління в розробці системи, що стимулює якісну роботу персоналу. Роль керівництва пояснюється тим, що воно повністю відповідає за ключові питання роботи підприємства – виділення ресурсів, створення організаційної структури, підбір і навчання кадрів, визначення політики якості, розробку стандартів, правил і процедур, аналіз змісту й методів роботи, оцінку та стимулювання результатів діяльності, розвиток управлінської команди.

Забезпечення необхідної якості продукції повинно мати постійний характер і контролюватися на всіх стадіях виробництва та споживання продукції. Для цього необхідно створити відрегульовану систему дій, що сприятиме задоволенню потреб споживачів як на вітчизняних, так і на міжнародних ринках, і покращенню процесу виробництва.

Отже, якість металопродукції є одним з основних факторів підвищення конкурентоспроможності на вітчизняних та міжнародних ринках. Тому підприємствам необхідно приділяти першочергову увагу цьому питанню, хоча воно і потребує додаткових витрат. Проте ці витрати повністю компенсуються через отримання додаткових прибутків, оскільки існує високий попит на високоякісну та екологічно безпечну металопродукцію.

1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

1.1. Продукція, виріб, життєвий цикл та технології виробництва металопродукції.

Всі основні поняття та визначення, які пов'язані з виробництвом, властивостями, показниками якості металопродукції, а також методи їх визначення стандартизовані і нормовані у відповідних міжнародних та національних стандартах [1–5] та ін.

Далі зупинимось на основних поняттях та визначеннях, на яких базується подальше розглядання процесів, що дозволить всебічно розглянути якість металевих матеріалів.

Продукція (англ. *production*) – це матеріальний результат трудової діяльності або виробничих процесів, що має корисні властивості і призначений для використання споживачем. Її виробництво є результатом діяльності підприємства (фірми), яке може бути представлений виробами, продуктами (що мають дійсну форму) і послугами (що не мають дійсну форму). Послуги виробничого характеру (ремонт тощо) називають роботами. Інакше кажучи, продукція – це результат праці, отриманий у певному місці за певний час і призначений для використання споживачами з метою задоволення їхніх матеріальних або духовних потреб.

Свою чергою, промислову продукцію поділяють на вироби і продукт.

Виріб – це промислова продукція, кількість якої може бути охарактеризована дискретною величиною, яку обчислюють у штуках або примірниках.

Промислову нештучну продукцію, а також штучну сільськогосподарську продукцію відносять до продуктів. Так, зливки, прокат, труби – це вироби, а кавуни, молоко – це продукти; генератори електроенергії – вироби, генерована енергія – продукт.

Металургія (від грец. – видобуваю руду, обробляю метали) – галузь науки і техніки, що охоплює процеси добування металів із руд або інших видів сировини, а також процеси, пов'язані зі зміною хімічного складу, структури та властивостей металевих сплавів і виробництвом різноманітних металевих виробів із них. У первісному, вузькому значенні – мистецтво видобування металів із руд.

До металургії належать: виробництво металів із природної сировини та інших металовмісних продуктів; отримання сплавів; оброблення металів у гарячому і холодному стані; зварювання; нанесення покриттів із металів; галузь матеріалознавства, що вивчає фізичну і хімічну поведінку металів, інтерметалідів і сплавів.

До металургії примикає розробка, виробництво та експлуатація машин, апаратів, агрегатів, які використовуються в металургійній промисловості.

На умовній межі між металургією і гірничою справою перебувають процеси окускування (підготовка збагаченої сировини до подальшої пірометалургійної переробки). З металургією тісно пов'язані коксохімія, виробництво вогнетривких матеріалів і хімія (наприклад, коли йдеться про металургію рідкоземельних металів).

У світовій практиці історично склався поділ металів на чорні (англ. *ferrous metals* – залізо, марганець, хром і сплави на їхній основі) і всі інші – нечорні (англ. *non-ferrous metals*) або кольорові метали. Відповідно, металургія поділяється на чорну і кольорову.

Чорна металургія включає видобуток і збагачення руд чорних металів, виробництво чавуну, сталі та феросплавів. До чорної металургії відносять також виробництво прокату чорних металів, сталевих, чавунних та інших виробів із чорних металів.

До кольорової металургії належать видобуток, збагачення руд кольорових металів, виробництво кольорових металів та їх сплавів. За фізичними властивостями та призначенням кольорові метали умовно поділяють на важкі (мідь, свинець, цинк, олово, нікель) і легкі (алюміній, титан, магній).

За основним технологічним процесом металургія поділяється на пірометалургію і гідрометалургію.

Пірометалургія (від грец. *πῦρ* – вогонь) – металургійні процеси, що протікають за високих температур. Різновидом пірометалургії є плазмова металургія.

Гідрометалургія (від грец. *ὕδωρ* – вода) – процес отримання металів із руд, концентратів і відходів різних виробництв за допомогою води та різних

водних розчинів хімічних реактивів (вилуговування) з подальшим виділенням металів із розчинів (наприклад, цементацією та електролізом).

Поширення та сфери застосування металопродукції.

Виробництво і споживання металів у світі постійно зростає [6]. Частка продукції, виготовленої з використанням чорних і кольорових металів, нині становить 72...74 % валового національного продукту промислово-розвинених держав.

Метали в ХХІ ст. залишаються основними конструкційними матеріалами, оскільки за своїми властивостями, економічністю виробництва і споживання не мають собі рівних у більшості сфер застосування. З металів, які споживають щорічно, понад 90 % припадає на сталь, приблизно 3 % – на алюміній, по 1,5 % – на мідь, цинк, свинець, решта – менш як 1 %. Наразі основну масу металів виробляють і споживають у таких країнах, як США, Японія, Китай, Індія, Німеччина, Україна, Франція, Італія, Велика Британія та інші [7].

Завдяки своїм фізичним властивостям (твердість, висока щільність, температура плавлення, теплопровідність, електропровідність, звукопровідність, зовнішній вигляд тощо) метали і сплави набувають застосування в різних галузях.

Слід зазначити, що в чистому вигляді метали застосовуються незначно. Набагато більше застосування знаходять сплави металів, оскільки вони мають особливі індивідуальні властивості. Найчастіше використовують сплави заліза, хрому, міді, алюмінію, магнію, нікелю, титану, цинку. Найпоширеніші сплави – це сплави заліза і вуглецю (сталі).

Вуглецеві сталі використовуються для створення відносно дешевих, високоміцних виробів, коли маса і корозія не критичні.

Нержавіюча або оцинкована сталь використовується, коли важливий опір корозії.

Алюмінієві та магнієві сплави використовуються, коли потрібні міцність і легкість.

Мідно-нікелеві сплави використовуються в корозійно-агресивних середовищах і для виготовлення немагнітних виробів. Сплави на основі нікелю використовують у виробках, що працюють за високих температур

(теплообмінники, турбонагнітачі тощо). За дуже високих температур використовують монокристалічні сплави.

Будь-яка продукція (виріб) під час її виробництва і споживання проходить доволі тривалий шлях, який загалом може бути представлений у вигляді життєвого циклу продукції (ЖЦП).

Життєвий цикл продукції – це послідовність етапів, через які проходить кожен випущений товар від моменту своєї появи на ринку до моменту відходу з ринку (у разі припинення його виробництва або реалізації). Іншими словами, - це сукупність взаємопов'язаних процесів створення та послідовної зміни стану продукції від формування до неї вихідних вимог до закінчення її експлуатації або споживання [8-10].

Життєвий цикл умовно можна розділити на стадії: розроблення продукту на основі маркетингових досліджень, виготовлення, обіг і реалізація, експлуатація (споживання) продукції, за потреби, утилізація (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Життєвий цикл продукції.

Технології виробництва металопродукції. Стадія життєвого циклу «Виробництво» для продукції чорної металургії поділяється на кілька етапів, що включають виробництво вихідних матеріалів (збагачення руди, виплавлення чавуну, виробництво сталі та сталевих злитків або безперервнолитих заготовок), виробництво блямів і слябів, виробництво прокату (гаряча й холодна прокатка та оздоблення сортового прокату, листа,

труб). Для виробництва металопродукції також можуть використовуватися процеси зварювання, кування, штампування.

До основних технологічних процесів у металургії заведено відносити отримання чавуну, сталі та сплавів, процеси гарячої та холодної обробки металів тиском.

Залізо в природі міститься в руді у вигляді оксидів Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , карбонатів $FeCO_3$, гідроксиду $Fe_2O_3 \times H_2O$ та інших. Тому відновлення заліза та отримання сплавів на його основі здійснюється в кілька стадій, що включають підготовку сировини до доменного плавлення (окускування), доменне виробництво та виробництво сталі [11].

Виробництво чавуну – металургійний процес відновлення заліза з руди. На першій стадії отримання залізовмісних сплавів відбувається вивільнення заліза і виплавлення чавуну з руди або окускованої сировини (попередньо збагаченої руди) в доменній печі за температури понад 1000 °С. Властивості одержуваного чавуну залежать від перебігу процесу в доменній печі. Тому, задаючи процес відновлення заліза в доменній печі, можна отримати два види чавуну: передільний, який йде в подальший переділ для виплавки сталі, і ливарний чавун, з якого отримують чавунні виливки.

Передільний чавун служить сировиною для виробництва сталі. Сталь – це сплав заліза з вуглецем і легуючими елементами. Вона більш придатна для будівельних конструкцій і виробництва деталей машин. Виплавка сталі відбувається в сталеплавильних печах, де метал перебуває в рідкому стані.

Виробництво сталі – металургійний процес отримання залізо-вуглецевих сплавів. Розрізняють кілька способів виплавлення сталі: конверторний, мартенівський, електрометалургійний, прямого відновлення.

Першим способом масового виробництва рідкої сталі був бесемерівський процес. Цей спосіб виробництва сталі в конвертері з кислим футеруванням розробив англієць Г. Бессемер у 1856–1860 роках. У 1878 році С. Томас розробив схожий процес у конвертері з основним футеруванням, що отримав назву томасівський процес. Сутність конвертерних процесів (бесемерівського і томасівського) на повітряному дутті полягає в тому, що залитий у плавильний агрегат (конвертер) чавун продувають знизу повітрям: кисень, який міститься у повітрі, окиснює домішки чавуну, в результаті чого він перетворюється на сталь. Під час томасівського процесу, крім того,

видаляються фосфор і сірка, які переходять в основний шлак. Під час окислення виділяється тепло, що забезпечує нагрівання сталі до температури близько 1600 °С.

Сутність способу отримання сталі за допомогою мартенівського процесу полягає у веденні плавлення у полум'яній відбивній печі, яка обладнана регенераторами для попереднього підігріву повітря (іноді газу). У 1856 році брати Сіменс запропонували використовувати для підігріву повітря тепло відхідних гарячих газів, встановлюючи для цього регенератори. Принцип регенерації тепла був використаний П'єром Мартеном для плавлення сталі. Початком існування мартенівського процесу можна вважати 8 квітня 1864 року, коли П. Мартен на одному із заводів Франції випустив першу партію металу.

Для виплавлення сталі в мартенівську піч завантажують шихту, що складається з чавуну, скрапу, металевого брухту та інших компонентів. Під дією тепла від факела спалюваного палива шихта поступово плавиться. Після розплавлення у ванну вводять різні добавки для отримання металу заданого складу і температури. Готовий метал із печі випускають у ковші та розливають. Завдяки своїм якостям і невисокій вартості мартенівська сталь набула масове застосування. Уже на початку XX століття в мартенівських печах виплавили половину загального світового виробництва сталі [6].

В основній мартенівській печі можна переплавляти чавун і скрап будь-якого складу і в будь-якій пропорції та отримувати при цьому якісну сталь хімічного складу (крім високолегованих сталей і сплавів, які отримують в електропечах). Склад застосовуваної металевій шихти залежить від складу чавуну і скрапу і від витрати чавуну і скрапу на 1 т сталі. Нині, у зв'язку з підвищенням вимог до якості сталі, особливо за вмістом шкідливих домішок і неметалевих включень, мартенівську сталь витісняє конверторне та електросталеплавильне виробництво.

Для масового виплавлення високоякісної сталі застосовують дугові сталеплавильні електропечі, що живляться змінним струмом, індукційні печі та дугові печі постійного струму, що набули поширення в останні роки.

Основною перевагою дугових електропечей є те, що в них протягом багатьох десятиліть виплавають основну частину високоякісних легованих і високолегованих сталей, які важко або неможливо виплавити в конвертерах

і мартенівських печах. Завдяки можливості швидко нагріти метал, можна вводити великі кількості легуючих добавок і забезпечувати в печі відновлювальну атмосферу з безокиснювальними шлаками (у відновлювальний період плавлення), що забезпечує мале вигорання легуючих елементів, які вводяться у піч. Крім того, є можливість більш повно, ніж в інших печах, розкислювати метал, отримуючи його з більш низьким вмістом оксидних неметалевих включень, а також отримувати сталь із більш низьким вмістом сірки і фосфору. Також є можливість плавно і точно регулювати температуру металу.

Для надання сталі різноманітних властивостей використовується процес легування сталі. Легування – це процес зміни складу сплавів шляхом введення певних концентрацій додаткових елементів. Залежно від їхнього складу та концентрації змінюється склад і властивості сплаву. Основними легуючими елементами для сталі є: хром (*Cr*), нікель (*Ni*), марганець (*Mn*), кремній (*Si*), молібден (*Mo*), ванадій (*V*), бор (*B*), вольфрам (*W*), титан (*Ti*), алюміній (*Al*), мідь (*Cu*), ніобій (*Nb*), кобальт (*Co*) тощо.

Найважливішою технологічною операцією одержання сталей високої якості є вакуумування (англ. - *steel vacuum treatment (processing)*), що являє собою обробку рідкої сталі під вакуумом із метою зменшення в ній вмісту газів (H_2 , N_2 , O_2) і неметалевих включень.

Під час вакуумування зазвичай видаляють 30–85 % кисню (O_2), 30–70 % водню (H_2) і 5–25 % азоту (N_2) від їх початкового вмісту.

При розкисленні та легуванні вакуумованої сталі, крім того, досягається економія феросплавів внаслідок зменшення їх угару. В середньому у світовій практиці піддається вакуумуванню ~10–15 % усієї виплавленої сталі. Розрізняють порційне, циркуляційне і струменеве вакуумування.

Порошкова металургія ґрунтується на застосуванні порошків металів з розмірами частинок від 0,1 мкм до 0,5 мм, які спочатку спресовуються, а потім спікаються.

Прокаткою називають процес деформації металу, здійснюваний обтисненням вихідної заготовки між привідними обертовими валками, з метою зменшення площі поперечного перерізу заготовки при одночасному збільшенні довжини заготовки і надання їй заданої форми.

Прокатка – це вид обробки металів тиском, який вирізняється високою продуктивністю і меншою порівняно з іншими видами обробки тиском вартістю одержуваних виробів. Цей вид обробки тиском застосовують не тільки для зміни форми металів, а й для отримання структури, що забезпечує підвищення експлуатаційних властивостей виробів. Тому існує багато технологічних схем обробки металів і сплавів, що включають прокатку спільно з термічною обробкою (термомеханічна обробка). Нині також широко використовується поєднання прокатки з ливарним виробництвом. Прикладом може служити високопродуктивний спосіб безперервного лиття суміщений з прокаткою.

Залежно від напрямку обробки розрізняють поздовжній *a*, поперечний *б* і поперечно-гвинтовий *в* способи прокатки (рис. 1.2).

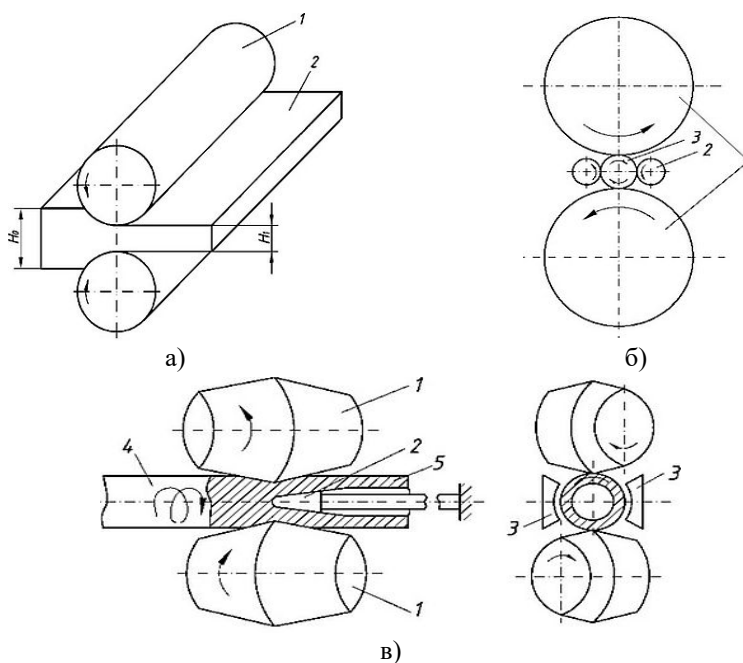


Рис. 1.2. Способи прокатки: а - поздовжня: 1 – валки; 2 – заготовка-виріб; б – поперечна: 1 – валки, 2 – ролики, 3 – заготовка-виріб; в – поперечно-гвинтова: 1 – валки, 2 – оправка, 3 – лінійки, 4 – заготовка; 5 – гільза

Під час поздовжньої прокатки (див. рис. 1.2, а), яка найпоширеніша (листова, сортова тощо), деформування заготовки здійснюється між валками, що обертаються в різні напрямки, зазор між якими менший за вихідну товщину заготовки. Процес прокатки вважають простим, або симетричним, якщо виконуються такі умови. По-перше, валки повинні мати гладкі валки однакового діаметра з паралельними осями, розташованими в одній площині. По-друге, обидва валки мають бути приводними й обертатися в різних напрямках з однією коловою швидкістю. По-третє, необхідно, щоб стан поверхні обох валків був однаковий, тобто коефіцієнти і сили тертя, що виникають під час прокатки між заготовкою і валками, були однаковими. І передбачається, що прокатці піддають смугу прямокутного перерізу з однорідними фізико-механічними властивостями по всьому об'єму і на неї діють сили тільки з боку валків. Теорія простого процесу прокатки є основою для аналізу інших, складніших випадків прокатки [12, 13].

Принцип поперечної прокатки (рис. 1.2, б) полягає в тому, що вісь оброблюваної заготовки 3 розташована паралельно до осі валків 1, а обидва валки обертаються в один і той самий бік. Під час прокатки валки поступово зближуються, внаслідок чого зменшується діаметр виробу, який також обертається, але в бік, протилежний обертанню валків, бічні ролики 2 виконують допоміжну функцію: вони утримують виріб між валками. Поперечну прокатку використовують для виробництва валів, осей, втулок, шестерень та інших виробів типу тіл обертання.

Поперечно-гвинтова прокатка (рис. 1.2, в) займає проміжне положення між поперечною і поздовжньою прокатками. Цей вид прокатки ще називають косою прокаткою. Осі валків стану гвинтової прокатки розташовуються під кутом одна до одної і до осі прокатуваної заготовки круглого перерізу. Завдяки такому розташуванню валків 1, заготовка 4 у процесі прокатки здійснює не тільки обертальний, а й поступальний рух, а точки на поверхні заготовки описують у просторі гвинтову лінію. Оскільки кут нахилу валків щодо осі оброблюваного тіла зазвичай не великий і становить $12...18^\circ$, то поперечно-гвинтова прокатка за своїм характером ближча до поперечної, ніж до поздовжньої. Процес косої прокатки широко застосовують під час виробництва заготовок безшовних труб, зокрема на прошивних станах, де із суцільної круглої заготовки отримують чорнову трубу 5, що називається

гільзою. Для утворення в заготовці отвору правильної форми між валками 1 встановлюється оправка 2, закріплена на стрижні. Лінійки 3 служать для утримання заготовки у валках.

На відміну від розглянутих видів прокатки при періодичній прокатці в процесі деформації висота зазору між валками змінюється. Це досягається шляхом надання валкам спеціальної некруглої форми, зміною зазору між валками в процесі прокатки, використанням бандажа на валках тощо. У такий спосіб отримують прокатну продукцію, форма перерізу якої періодично змінюється за її довжиною або отримують прокат постійного перерізу, але деформацію під час прокатки подрібнюють і кожен ділянку заготовки прокатують по черзі. При зміні обтиску відбувається зміна всіх параметрів прокатки, тому періодичну прокатку можна характеризувати як нестационарну. Принцип періодичної прокатки покладено в основу роботи деяких розкатних станів, планетарних станів, тощо.

У виробничій практиці якщо заготовку перед прокаткою нагрівають вище за температуру рекристалізації, то прокатку називають гарячою, якщо нагрівають, але нижче за температуру рекристалізації, то теплою. Прокатку, яку ведуть без нагрівання заготовки, називають холодною прокаткою.

Режим роботи прокатних станів може бути нереверсивним, коли валки обертаються тільки в один бік, і реверсивним, коли заготовку можна прокатувати в обидва боки, змінюючи напрямок обертання валків.

Процес прокатки може бути симетричним і асиметричним. Процес прокатки у двох валках називається симетричним, коли є повна аналогія схеми дії сил на смугу, що прокатується, умов на контакті, напружено-деформованого стану і швидкісних умов у зонах обтиснення, які стосуються кожного з валків.

Важливою умовою процесу прокатки є наявність або відсутність зовнішніх сил, прикладених до кінців заготовки.

За цією ознакою розрізняють вільну і невільну прокатку. Вільною називають прокатку тоді, коли на заготовку діють сили тільки з боку валків. Невільна прокатка здійснюється з натягом або підпором кінців смуги (рис. 1.3), причому натяг (підпір) може здійснюватися як з одного боку, так і з двох сторін.

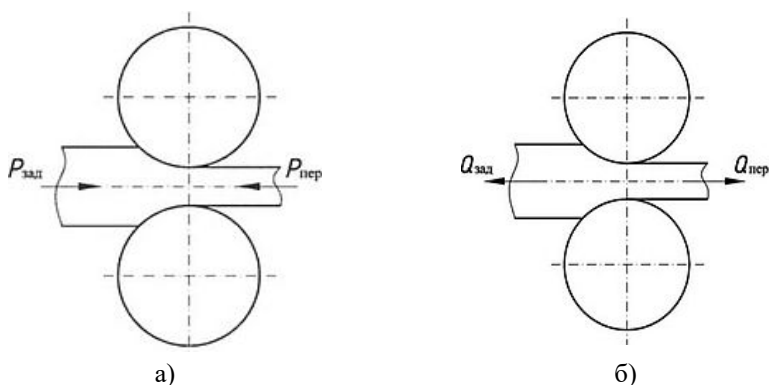


Рис. 1.3. Схема прокатки: а – з підпором; б – з натягом

Натягнення, або підпір, можуть виникати, наприклад, під час безперервної прокатки в той момент, коли смуга перебуває одночасно у двох сусідніх прокатних клітках, які здатні за розрахунком пропустити за одиницю часу різний об'єм металу.

Серед великої різноманітності продукції прокатного виробництва основними видами продукції є плоский і сортовий прокат [14]. Загальну схему отримання плоского і сортового прокату зі сталі наведено на рис. 1.4.

Заготовку для сортового прокату називають блюм, а для листового прокату – сляб.

Блюм - це чорнова заготовка квадратного перерізу зі стороною від 140 до 450 мм і завдовжки 6...10 м, яку отримують прокаткою великих злитків (до 25 т) на блюмінгах.

Для виготовлення блюма використовують дві технології. Першу застосовують для злитків з вуглецевих сталей масою від 7 до 13 т. У легованих і високолегованих сталей маса злитка значно нижча, і прокатку можуть вести не на блюмінгу, як для вуглецевих сталей, а відразу на заготівельному стані. Для другої технології отримання блюмів використовують машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), в яких з кристалізатора необхідного перерізу безперервно виходить заготовка, яку розрізають потім на мірні блюми.

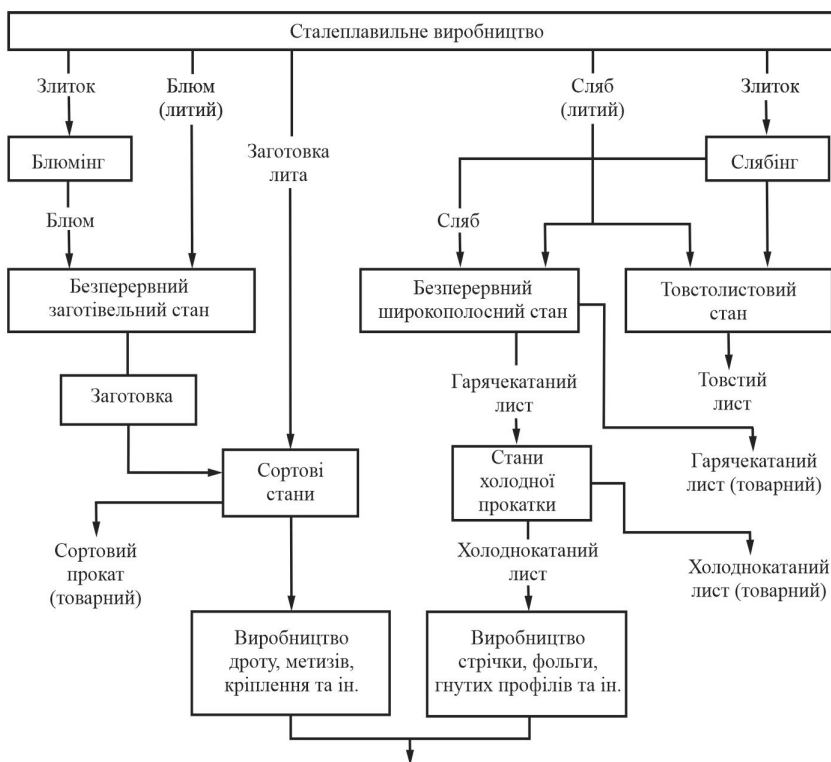


Рис. 1.4. Технологічна схема виробництва листового і сортового прокату

Литі блюми, отримані за другою технологією, дешевші, але зазвичай містять домішки, неметалеві включення, які розкатуються у вигляді дефекту, що отримав назву «доріжка». Цей вид дефекту не усувається в готовому прокаті, знижуючи його властивості. Очищення рідкого металу перед розливанням призводить до подорожчання процесу. Крім того, площа поперечного перерізу литого блюма, особливо для дрібних вихідних перерізів, не забезпечує якісного опрацювання литої структури, що також негативно позначається на властивостях готового прокату. Блюми, одержувані прокаткою злитків, дорожчі, але вищі за властивостями, ніж литі, оскільки домішки в них концентруються в прибутковій частині злитка, яка під час прокатки на блюмінгу відрізається.

Останнім часом нові технології очищення рідкого металу, а також застосування дешевших МБЛЗ радіального і особливо горизонтального виду розширюють можливості застосування литих блюмів. Підтвердженням цього є те, що вже в багатьох країнах основна частина сортового прокату виробляється з безпереволитої заготовки.

Сляб – чорнова заготовка для листового прокату, має прямокутний переріз завтовшки 150...300 мм, завширшки 1000...2000 мм і завдовжки до 18 м. Маса сляба коливається від 5 до 40 т. При цьому відношення ширини поперечного перерізу сляба до його висоти становить від 3 до 12. Сляби можуть бути литими і катаними з тими самими перевагами і недоліками, які розглядалися для блюмів. Нині сляби є основними напівфабрикатами для виробництва листа. Спостерігається також тенденція відливання не тільки великих слябів, а й тонких слябів товщиною близько 50 мм, які призначені для прокатки листів на мінізаводах.

Виробництво сталевих прокату (див. рис. 1.4) умовно розбивають на два етапи. На першому етапі отримують блюм або сляб.

Виробництво блюмів і слябів полягає в наступному. Зі сталеплавильного цеху зливки надходять до обтискного цеху, потім їх завантажують у нагрівальні колодязі для нагріву до потрібної температури та вирівнювання температури за перерізом злитка. Потім нагріті зливки краном поміщають на робочі ролики рольганга прокатного стану і піддають прокатці в кілька проходів у робочій клітині блюмінга або слябінга, що працюють в реверсивному режимі. Як правило, одночасно прокатують два зливки.

Після прокатки блюми або сляби подають у машину вогневої зачистки, в якій за допомогою газових пальників спалюється поверхневий шар на заготовці разом із поверхневими дефектами (тріщинами тощо).

Наступною операцією є різання прокату на прес-ножицях, під час якого від злитка відрізають головну і донну частини, потім решту (тіло злитка) ріжуть на частини завдовжки не більше ніж 700 мм і піддають прокатці на заготовочному стані. Після прокатки блюми (сляби) розділяють на мірні довжини, передають на приймальні стелажі і далі направляють на охолодження, режим якого залежить від марки сталі.

Прокатку блюмів і слябів здійснюють за кілька проходів, кількість яких залежить від розмірів вихідного злитка і кінцевих розмірів блюма

(сляба). Зазвичай зливок прокатують до заданих розмірів блюма за 11...15 проходів. Під час прокатки на блюмінгу доводиться переміщати заготовку між проходами від калібру до калібру вздовж осі валків.

Особливості сортової прокатки сталі.

Отримання гарячекатаного сортового прокату зазвичай завершує металургійне виробництво. Для сучасних сортопрокатних цехів характерною особливістю є потоковість технологічного процесу, основними операціями якого є підготовка заготовки до прокатки; нагрівання заготовки перед прокаткою; прокатка металу на сортовому стані; оздоблення готового прокату. Заготовка перед прокаткою на сортових станах проходить візуальний огляд або використовують прилади для виявлення дефектів. Виявлені дефекти видаляють у потоці або поза ним на гарячому або холодному металі.

Під час прокатки на сортовому стані із заготовки отримують задані розміри і форму готового профілю. Після прокатки заготовку (розкат) розрізають у потоці на задані довжини, охолоджують, піддають виправленню, оздобленню поверхні, укладають у пакети і маркують.

Сортові профілі залежно від розмірів прокатують на крупносортних, середньосортних, дрібносортних і дротяних станах. Для надання сортовому прокату заданої структури і властивостей залежно від призначення і хімічного складу сталь на металургійних заводах піддають різним видам термічної обробки: відпалу, нормалізації, загартуванню, відпуску. З названих видів термічної обробки сортовий прокат найчастіше піддають відпалу, який забезпечує зняття внутрішніх напружень у металі та зниження його твердості, усунення структурної неоднорідності та підвищення деформованості під час подальшого холодного оброблення, формування потрібної структури і властивостей. Для цього застосовують різні види відпалу: пом'якшувальний, структурний, рекристалізаційний тощо.

У практиці металургійних заводів обробку сортового прокату здійснюють в ад'юстажах і на поточкових лініях. На ад'юстажі прокатного цеху виконують весь комплекс операцій оздоблення: правлення, видалення окалини, зачищення дефектів, видалення задирок, нанесення захисних покриттів, контроль якості, маркування, пакування та зважування.

Особливості гарячої та холодної прокатки безшовних труб

Сталеві безшовні та зварні труби є одним із найважливіших видів металургійної продукції. Основними споживачами сталевих труб є: нафто- і газовидобувна промисловість, будівництво, машинобудування (зокрема авіація, автомобілебудування, суднобудування), хімічна, харчова промисловість тощо.

Загальну технологічну схему виробництва сталевих безшовних і зварних труб представлено на рис. 1.5 [15].

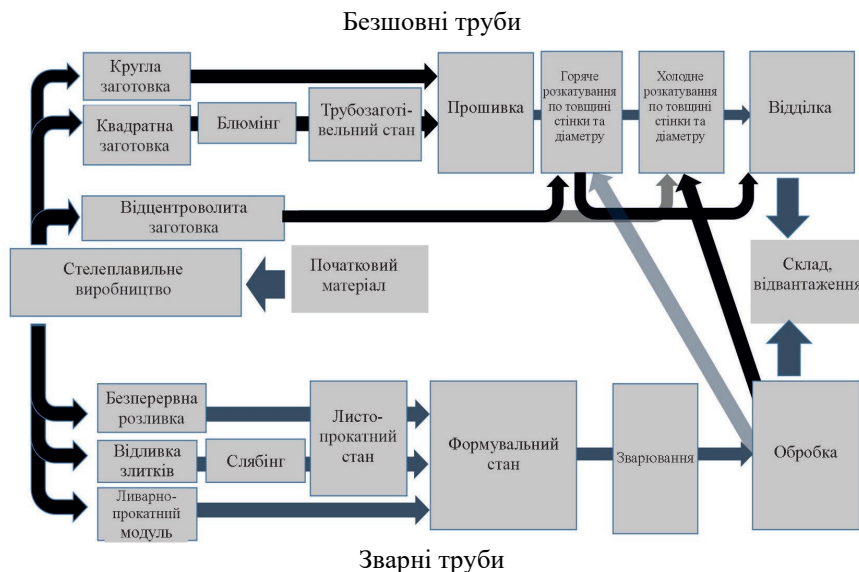


Рис. 1.5. Технологічна схема виробництва сталевих безшовних і зварних труб

У загальному обсязі виробництва сталевих труб частка зварних труб безперервно зростає завдяки високій технологічності та економічності в поєднанні з високою якістю цієї продукції. Основними способами отримання зварних труб є прокатка (формування) сталевих смуг і наступні такі види зварювання, як пічне зварювання, електрозварювання і зварювання в захисному газі.

Виробництво безшовних сталевих труб здійснюється гарячою прокаткою на спеціальних станах, які називаються трубопрокатними агрегатами. Цей спосіб прокатки труб полягає у виконанні трьох основних і декількох допоміжних операцій. Перша операція (прошивання) - виконується для отримання поздовжнього отвору в заготовці або злитку, в результаті чого формується товстостінна труба, звана гільзою. Друга операція (розкочування на оправці) - полягає в подовженні прошитої заготовки і зменшенні товщини її стінки приблизно до необхідних у готовій трубі розмірів. Обидві операції здійснюються з одного нагрівання. Після розкочування труби калібрують без оправки (третя операція) на спеціальних калібрувальних (редукційних) станах. Першу операцію виконують на прошивних станах гвинтової прокатки між бочкоподібними або грибоподібними валками на короткій оправці або прошивних пресах, другу - на розкатних станах різних типів.

Найбільшого поширення для прошивання набули стани з бочкоподібними валками (рис. 1.6, *a*). За допомогою цих станів прошивають заготовки діаметром 80...270 мм і зливки діаметром 35...600 мм. У робочій клітці таких станів осі валків у вертикальній площині нахилені одна до одної під кутом 5...17°. Завдяки косому розташуванню валків заготовка під час прокатки отримує одночасно обертальний і поступальний рух. Тому кожна точка деформованої частини заготовки здійснює гвинтовий рух, а в центрі її створюються напруження, близькі за схемою до всебічного розтягування. Останнє сприяє розпушенню центральних шарів заготовки, що значно знижує зусилля її прошивання конічною оправкою.

Отримані прошиванням гільзи надходять на розкочування в труби. Процес розкочування гільзи полягає в прокатці її стінки між введеною в її порожнину оправкою і зовнішніми валками [16]. При цьому залежно від типів станів і розмірів одержуваних труб використовують короткі та довгі оправки. Для проведення розкочування застосовують стани поздовжньої прокатки (автоматичний і безперервний), періодичної прокатки (пілігримовий стан) і тривалковий стан поперечно-гвинтової прокатки.

Надання остаточних розмірів трубі по діаметру проводиться на калібрувальному, редукційному або редукційно-розтяжному стані з двовалковими або тривалковими клітками. Після калібрувального стану труби передають на правильний стан для оздоблювальних операцій.

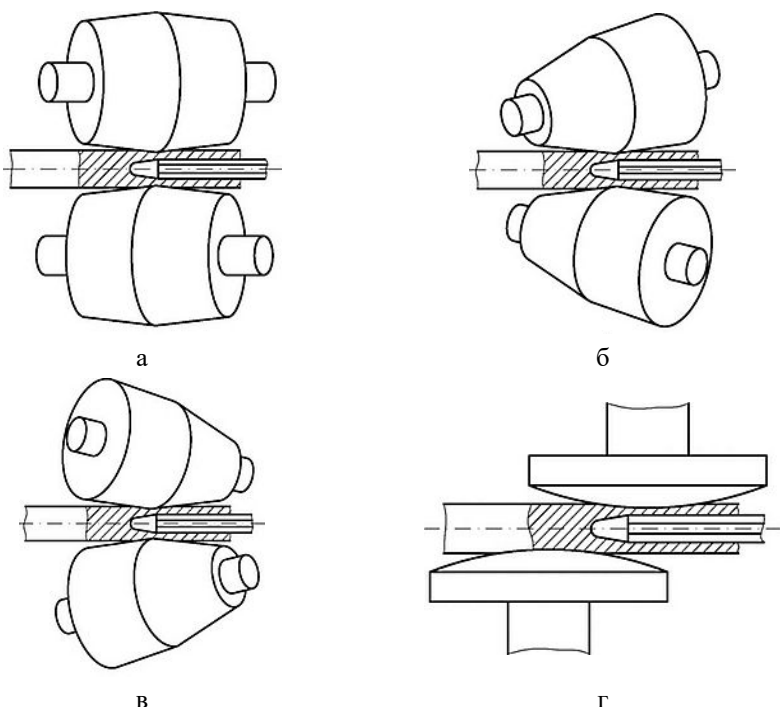


Рис. 1.6. Схеми прошивання заготовок:

а – у станах з бочкоподібними валками; б – у станах з грибоподібними валками; в – у станах з чашоподібними валками; г – у станах з дисковими валками

Волочіння – процес пластичної деформації, здійснюваний протягуванням прутка через отвір в інструменті (волоку), площа перерізу отвору в якому менша за площу поперечного перерізу вихідної заготовки. Волочінням обробляють сталі різного хімічного складу, прецизійні сплави і кольорові метали. Шляхом волочіння отримують вироби малих перерізів і великої довжини. До них належать дроти, тонкостінні труби малого діаметру, прутки, профілі. Волочінням досягаються висока точність геометричних розмірів виробів і підвищена якість поверхні. Волочіння здійснюється найчастіше за кімнатної температури. Волочіння з нагріванням застосовують під час обробки важкодеформованих металів і сплавів.

Процес волочіння полягає в наступному. Передній кінець заготовки загострюють, вводять у конічний отвір волоки меншого діаметру, ніж заготовка, захоплюють кліщами і протягують через волоку. Коефіцієнт витягування під час волочіння за один перехід обмежується міцністю кінця вихідного виробу, і становить 1,3...1,5.

Волочіння порожнистих виробів можуть проводити на оправці і без оправки. Обладнання, що застосовується для волочіння металів і сплавів, називається волочильними станами.

Гаряче пресування – це процес пластичної деформації металу, здійснюваний видавлюванням заготовки через отвір у матриці. Пресування знаходить широке застосування під час обробки пластичних і малопластичних металів і сплавів, металевих порошків і гранул, а також неметалевих матеріалів. Пресуванням виготовляють вироби складної форми поперечного перерізу, які не вдається виготовити іншими методами пластичної деформації металів. Пресуванням виготовляють прутки, порожнисті профілі складного перерізу, з кількома каналами, періодичні профілі, тощо. Отримання різних виробів на одному і тому ж обладнанні із заміною тільки матриці ставить пресування поза конкуренцією з іншими процесами обробки тиском. Пресовані вироби зі сталей і сплавів можуть бути заготовками для отримання виробів волочінням, холодною прокаткою та іншими способами обробки. Розрізняють метод прямого і зворотного пресування. При прямому методі напрямок течії металу збігається з напрямком руху інструменту, при зворотному – вони мають зворотний напрямок.

Кування – це процес обробки тиском з використанням можливо отримання будь-якого металевого виробу але з невеликою партією (одиничне виробництво).

Для кожного металу існує своя кувальна температура, що залежить від фізичних (температура плавлення, температура кристалізації) і хімічних (наявності легуючих елементів) властивостей. Для сталі температурний інтервал для гарячого кування: 800...1250 °С, для міді 650...1000 °С, для титану 900...1600 °С, для алюмінієвих сплавів 400...480 °С.

Розрізняють два основні способи кування: ручне та машинне.

Вироби і напівфабрикати, одержувані куванням, називають «поковка». При вільному куванні (ручному і машинному) метал не обмежений зовсім або ж обмежений з одного боку. Кування виконують на спеціальному обладнанні – ковальських молотах або гідравлічних ковальських пресах.

Кування застосовують також для поліпшення якості та структури металу. Під час кування підвищується якість поковки, заварюються так звані несущальності та подрібнюється структура і стає дрібнозернистою, набуває волокнистої будови.

Під час кування використовують набір ковальського інструменту, за допомогою якого заготовкам надають потрібної форми та розмірів.

Зварювання – технологічний процес отримання нероз’ємних з’єднань матеріалів шляхом встановлення міжатомних зв’язків між зварюваними частинами під час їхнього нагрівання та плавлення в місці зварювання або шляхом пластичної деформації. Зварюванням можна з’єднувати однорідні та різномірні метали та їхні сплави, метали з деякими неметалевими матеріалами (керамікою, графітом, склом), а також пластмаси.

Остаточною стадією виготовлення будь-якої металопродукції часто є **обробка різанням**, яка полягає у знятті із заготовки ріжучим інструментом шару матеріалу у вигляді стружки. У результаті цього заготовка набуває необхідної форми, розмірів, необхідної якості поверхні.

1.2. Якість металопродукції, показники якості, дефекти

Поняття якості є більше філософським і включає крім різних технічних також соціальні та економічні аспекти. Існує ціла низка різних визначень поняття «якість».

Відповідно до міжнародного стандарту ISO 8402-94 поняття якості сформульовано так: **«Якість – це сукупність характеристик об’єкта, що стосуються його здатності задовольняти встановлені та передбачувані потреби»**. Це формулювання на сьогодні є офіційним визначенням поняття якості.

На якість продукції/виробу (послуг) впливає значна кількість найрізноманітніших чинників, характерних для конкретних виробництв. Практично всі аспекти організації роботи підприємства чинять той чи інший вплив на якість продукції, що випускається (рис. 1.7) [17].



Рис. 1.7. Фактори, що визначають якість продукції (послуг)

Рівень якості визначається відповідними показниками, що являють собою кількісну характеристику однієї або декількох властивостей матеріалів, які визначають їхню якість стосовно конкретних умов виготовлення і використання. Показники якості вельми різноманітні та їх можна класифікувати за низкою характерних ознак, зокрема: за кількістю властивостей, що характеризуються, за характерними властивостями, за способом вираження, за етапами визначення (рис. 1.8).

Для кількісної характеристики якості продукції використовують показники якості. Одиначний показник якості продукції характеризує кількісно одну з її властивостей, комплексний показник якості - кілька властивостей продукції, що входять до її якості. Інтегральний показник якості Q продукції – є співвідношення сумарного корисного ефекту G від експлуатації або споживання продукції до сумарних витрат E_{Σ} , завдяки яким досягнуто цього ефекту:

$$Q = G/E_{\Sigma} \quad (1.1)$$

Кількість показників якості не піддається вимірюванню (колір, запах, форма, ергономічні характеристики тощо). У цьому разі кожному i -му одиничному показнику методом експертних оцінок установлюють коефіцієнт

вагомості, що є кількісною характеристикою значущості цього показника якості продукції серед інших показників її якості.



Рис. 1.8 - Класифікація показників якості продукції.

Комплексний показник якості G , що містить i_0 одиничних показників, знаходять у такий спосіб: m експертів оцінюють у балах j кожний одиничний показник i ($j = 3$ – відмінно, $j = 2$ – добре, $j = 1$ – задовільно, $j = 0$ – незадовільно). Потім середні результати j_i оцінки для показника i ($j_i = \sum j_i m / m_0$) множать на відповідний коефіцієнт вагомості n_i і добутки підсумовують:

$$G = \sum_{i=j}^{i_0} j n \quad (1.2)$$

Під час використання комплексного показника якості можливі випадки, коли одні одиничні показники, що характеризують істотні недоліки продукції, перекриваються іншими одиничними показниками [18]. У цих випадках, якщо хоча б один одиничний показник оцінений балом 0 («незадовільно»), то комплексний показник слід брати рівним нулю, тобто якість продукції має визнаватися незадовільною.

Під час розроблення та виготовлення продукції природним є прагнення забезпечити найвищі показники її якості. Значення показників, прийняті за основу під час порівняльної оцінки якості продукції, називають базовими показниками якості. Відношення показника якості оцінюваної продукції до відповідного базового показника визначає рівень якості продукції. Слід розрізняти поняття «рівень якості продукції» і «технічний рівень продукції» [19]. Технічний рівень продукції – це відносна характеристика якості продукції, що ґрунтується на зіставленні значень показників, які характеризують технічну досконалість оцінюваної продукції, з базовими значеннями відповідних показників. У процесі розроблення продукції та технології її виробництва в нормативно-технічній документації (НТД) на продукцію регламентують номінальне значення показників її якості та допустимі відхилення цих показників від номінального значення. Відхилення вважається допустимим, якщо фактичне значення показника якості продукції не виходить за межі, встановлені НТД. Вихід фактичного значення показника за встановлені в НТД межі означає, що розглянута одиниця продукції має дефект.

Базовий показник якості продукції – це такий показник, який беруть як вихідний під час порівняльних оцінок якості.

Як базові показники зазвичай приймаються:

- показники якості продукції, яка відповідає найвищим вимогам і найбільш ефективна в експлуатації;
- показники перспективних зразків продукції, знайдені дослідним або теоретичним шляхом;
- вимоги вітчизняних або міжнародних стандартів і технічних умов;
- показники якості аналогічної продукції, на зміну якій приходить новий виріб.

Структура та механічні властивості металевих матеріалів відносяться до їх найважливіших якісних характеристик [20, 21].

Структуру матеріалу, видиму неозброєним оком або при невеликому збільшенні за допомогою лупи, вивчають за допомогою макроаналізу. Макроаналіз дає змогу виявити різні особливості будови структури, а також дефекти (тріщини, пористість, раковини, великі неметалеві включення тощо).

Мікроаналізом називається вивчення структури за допомогою оптичного мікроскопа при збільшенні до 3000 разів. Електронний мікроскоп дає змогу вивчати структуру за збільшення до 25 000 разів.

Механічні властивості характеризують здатність матеріалів чинити опір дії зовнішніх сил. До основних механічних властивостей належать міцність, твердість, ударна в'язкість, пружність, пластичність, крихкість тощо [20].

Міцність – здатність матеріалу чинити опір руйнівному впливу зовнішніх сил.

Твердість – здатність матеріалу чинити опір впровадженню в нього іншого, більш твердого тіла під дією навантаження.

В'язкістю називається властивість матеріалу чинити опір руйнуванню під дією динамічних навантажень.

Пружність – це властивість матеріалів відновлювати свої розміри і форму після припинення дії навантаження.

Пластичністю називається здатність матеріалів змінювати свої розміри і форму під дією зовнішніх сил, не руйнуючись при цьому.

Крихкість – це властивість матеріалів руйнуватися під дією зовнішніх сил беззалишкових деформацій.

Під час статичних випробувань на розтягнення визначають величини, що характеризують міцність, пластичність і пружність матеріалу. Випробування проводяться на циліндричних (або плоских) зразках із певним співвідношенням між довжиною l_0 і діаметром d_0 . Зразок розтягується під дією прикладеної сили P (рис. 1.9, а) до руйнування.

Зовнішнє навантаження викликає в зразку напруження (σ), МПа і деформацію (ε), %:

$$\sigma = P/F \quad (1.3)$$

де P – прикладена сила; F – площа поперечного перерізу.

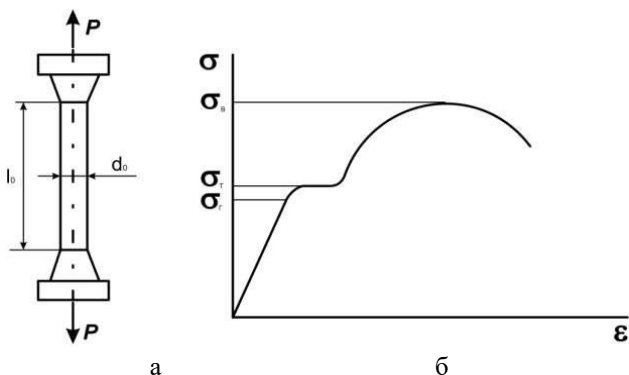


Рис. 1.9. Статичні випробування на розтягнення: а – схема випробування; б – діаграма розтягнення.

Деформація характеризує зміну розмірів зразка під дією навантаження, %:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

де l – довжина розтягнутого зразка.

Деформація може бути пружною (зникає після зняття навантаження) і пластичною (залишається після зняття навантаження).

Відносне подовження і відносне звуження характеризують пластичність матеріалу.

Твердість металів вимірюється шляхом вдавлювання у випробуваний зразок твердого наконечника різної форми. Твердість визначається різними методами.

Метод Брінелля заснований на вдавлюванні в поверхню металу сталеві загартованої кульки під дією певного навантаження. Після зняття навантаження в зразку залишається відбиток. Число твердості за Брінеллем HB визначається відношенням навантаження, що діє на кульку, до площі поверхні отриманого відбитка.

Метод Роквелла заснований на вдавлюванні у випробовуваний зразок загартованої сталеві кульки діаметром 1,588 мм (шкала B) або алмазного конуса з кутом при вершині 120° (шкали A і C). Вдавлювання проводять під

дією двох навантажень – попереднього, що дорівнює 100 Н, і остаточного, що дорівнює 600, 1000, 1500 Н для шкал *A*, *B* і *C* відповідно.

Число твердості за Роквеллом (*HRA*, *HRB* і *HRC*) визначається за різницею глибин вдавнення.

У методі Віккерса застосовують вдавлювання алмазної чотиригранної піраміди з кутом при вершині 136°. Число твердості за Віккерсом (*HV*) визначається відношенням прикладеного навантаження до площі поверхні відбитка.

Ударна в'язкість визначається роботою *A*, витраченою на руйнування зразка, віднесеної до площі його поперечного перерізу *F*, Дж/м² :

$$KC = A/F \quad (1.5)$$

Випробування проводяться ударом спеціального маятникового копра. Для випробування застосовується стандартний надрізаний зразок, що встановлюється на опорах копра. Маятник певної маси завдає удару по стороні, протилежній надрізу.

Технологічні властивості металів – це властивості, які визначають здатність матеріалів піддаватися різним видом обробки.

Ливарні властивості характеризуються здатністю металів і сплавів у розплавленому стані добре заповнювати порожнину ливарної форми і точно відтворювати її обриси (рідинна плинність), величиною зменшення об'єму під час кристалізації (усадкою), схильністю до утворення тріщин і пор, схильністю до поглинання газів у розплавленому стані.

Ковкість – це здатність металів і сплавів піддаватися різним видам обробки тиском без руйнування.

Зварюваність визначається здатністю матеріалів утворювати міцні зварні з'єднання.

Оброблюваність різанням визначається здатністю матеріалів піддаватися обробці ріжучим інструментом.

Фізичні, хімічні та експлуатаційні властивості металів

До фізичних властивостей металів належать густина, температура плавлення, електропровідність, теплопровідність, магнітні властивості, коефіцієнт температурного розширення тощо.

Щільністю називається відношення маси однорідного матеріалу до одиниці його об'єму. Ця властивість важлива під час використання

матеріалів в авіаційній і ракетній техніці, де створювані конструкції мають бути легкими і міцними.

Температура плавлення – це така температура, за якої метал переходить із твердого стану в рідкий. Що нижча температура плавлення металу, то легше протікають процеси його плавлення, зварювання і тим вони дешевші.

Електропровідність називається здатність матеріалу добре і без втрат на виділення тепла проводити електричний струм. Хорошу електропровідність мають метали та їхні сплави, особливо мідь і алюміній.

Більшість неметалевих матеріалів не здатні проводити електричний струм, що також є важливою властивістю, яка використовується в електроізоляційних матеріалах.

Теплопровідність – це здатність матеріалу переносити теплоту від більш нагрітих частин тіл до менш нагрітих. Гарною теплопровідністю характеризуються металеві матеріали.

Магнітними властивостями, тобто здатністю добре намагнічуватися володіють тільки залізо, нікель, кобальт та їхні сплави.

Коефіцієнти лінійного та об'ємного розширення характеризують здатність матеріалу розширюватися при нагріванні. Цю властивість важливо враховувати під час будівництва мостів, прокладання залізничних і трамвайних колій, виготовлення металоконструкцій тощо.

Хімічні властивості характеризують схильність металів до взаємодії з різними речовинами і пов'язані зі здатністю металів протистояти шкідливій дії цих речовин. Здатність металів і сплавів чинити опір дії різних агресивних середовищ називається корозійною стійкістю, а аналогічна здатність неметалевих матеріалів – хімічною стійкістю.

До експлуатаційних (службових) властивостей відносяться жаростійкість, жароміцність, зносостійкість, радіаційна стійкість, корозійна і хімічна стійкість та ін.

Жаростійкість характеризує здатність металевого матеріалу чинити опір окисленню в газовому середовищі за високої температури.

Жароміцність характеризує здатність матеріалу зберігати механічні властивості за високої температури.

Зносостійкість – це здатність матеріалу чинити опір руйнуванню його поверхневих шарів під час тертя.

Радіаційна стійкість характеризує здатність матеріалу чинити опір дії ядерного опромінення.

Поняття міцності має два сенси. Міцність розглядається як опір пластичній деформації (тобто зміні форми) і як опір руйнуванню, але обидва – опір дії зовнішнього навантаження.

Основні сплави заліза – сталі та чавуни, а також сплави на основі алюмінію, титану, магнію, міді, нікелю. Вони дають змогу отримати комплекс властивостей – міцність, пластичність, в'язкість (для деталей машин і конструкцій), твердість, зносостійкість (для інструменту), а також спеціальні властивості: жароміцність і жаростійкість, високу електропровідність, магнітність і немагнітність, стійкість проти корозії в агресивних середовищах тощо.

Фізико-хімічні властивості металевих матеріалів поділяють на структурно-нечутливі (**СНС**) і структурно-чутливі (**СЧС**).

СНС температури плавлення і кипіння, коефіцієнт теплопровідності, температурний коефіцієнт розширення, модулі пружності, вони визначаються здебільшого силою атомного зв'язку (залежать від природи металу, хімічного складу сплаву) і тому перебувають у кореляції одна з одною.

СЧС залежать як від характеру і сили атомних зв'язків, так і від структури, що формується під час різних видів обробки (лиття, пластична деформація, зварювання, термічна обробка).

Металовироби виготовляють або литтям (фасонні виливки), або в технологічному циклі, що охоплює виплавлення злитка, оброблення тиском (прокатку, кування та інші види пластичної деформації), оброблення різанням (холодне механічне оброблення), зварювання та ін.).

Механічні властивості (характеристики) металевих матеріалів і вплив на них різних зовнішніх (температура, швидкість навантажування, геометричні концентратори напружень, масштаб тощо) і внутрішніх (природа металу і сплаву, структурний стан) факторів визначають під час механічних випробувань: на розтягнення, ударну в'язкість, на втому, на тривалу міцність і т. д.

Обладнання, прилади та методики проведення випробувань регламентуються відповідними стандартами.

Металевий матеріал повинен мати набір необхідних не тільки експлуатаційних, а й технологічних властивостей (характеристик). Зокрема, під обробку різанням сталь має бути найменш твердою, а під час експлуатації від тієї ж сталі часто вимагається максимальна твердість і міцність. Різні характеристики однієї й тієї самої сталі можна отримати тільки за рахунок зміни структури.

Хімічний склад під час пластичної деформації, механічної обробки та термічної обробки практично не змінюється, але змінюється структура матеріалу, зумовлена перебудовою і зміною взаємного положення атомів.

Дефекти та дефектна продукція

Дефект (від лат. *defectus* – недолік) – це кожна окрема невідповідність вимогам, встановленим у нормативно-технічній документації (НТД). Якщо продукція має дефект (дефектна одиниця продукції), то це означає, що хоча б один із показників якості вийшов за граничні значення, встановлені НТД.

Дефекти за їхнім розташуванням підрозділяють на зовнішні та внутрішні. Одні поверхневі дефекти (забоїни, вм'ятини тощо) виявляють візуально під час зовнішнього огляду, інші - можна виявити лише за допомогою спеціальних інструментів або приладів (раковини в литих заготовках, непровари та тріщини у зварних швах, розшарування в металі, неметалеві включення, дефекти структури і т.д.).

Залежно від того, на якому етапі виробництва продукції утворилися дефекти, вони поділяються на спадкові (утворені за попередніх технологічних операцій) і дефекти, утворені за цієї технологічної операції виготовлення продукції (поточні). Наприклад, дефекти у вигляді неметалевих включень у готовому металопрокаті з'являються на етапі виплавлення та розливання сталі (спадкові дефекти), а вм'ятини, забоїни та тріщини є поточними дефектами прокату. У низці випадків причиною утворення поточних дефектів, наприклад прокатних плівок, є спадкові дефекти литої заготовки (підкіркова газова бульбашка, литі тріщини).

Дефект, усунення якого технічно можливе й економічно доцільне, називають усувним. Якщо усунення дефекту технічно неможливе або

пов'язане з великими трудовими витратами, то такий дефект вважають непереконливим.

Залежно від впливу на ефективність і безпеку використання продукції всі дефекти поділяють на критичні, значні та малозначні:

- **критичний** – дефект, за наявності якого використання продукції за призначенням практично неможливе або неприпустиме, оскільки вона не відповідає вимогам безпеки або надійності;

- **значний** – дефект, який суттєво впливає на використання продукції за призначенням і на її довговічність, але не є критичним;

- **малозначний** – дефект, який не впливає істотно на використання продукції за призначенням і на її довговічність.

- Термін «дефект» слід відрізняти від термінів «несправність» і «відмова». Якщо термін «дефект» застосовують зазвичай при створенні та ремонті продукції, то останні два терміни – при її експлуатації та транспортуванні.

Несправність, тобто стан об'єкта (продукції), за якого він не відповідає хоча б одній вимозі НТД, – наслідок одного або декількох дефектів у ньому. При цьому, несправність, за якої об'єкт зберігає працездатний стан, називають пошкодженням.

Відмова (на відміну від пошкодження) - це подія, яка призводить до порушення працездатності об'єкта. Працездатність об'єкта може бути відновлена, якщо він ще не досяг граничного стану, за якого його подальше застосування за призначенням є неприпустимим або недоцільним, а відновлення неможливе або економічно не виправдане. При цьому, однак, не виключається повернення об'єкта у справний стан за рахунок ремонту.

1.3. Контроль якості металопродукції, система забезпечення якості, акредитація, сертифікація

Для забезпечення конкурентоспроможності продукція повинна відповідати вимогам замовника або запитам споживачів. Ці вимоги зазвичай включаються в технічні умови або стандарти. Однак самі по собі технічні умови не є гарантією задоволення вимог споживача, оскільки в конструкції виробу, технології або організаційній системі, що охоплює дослідження, проектування, виробництво і реалізацію продукції (послуг), можуть з'явитися

невідповідності. Імовірність того, що створена продукція відповідатиме вимогам споживача, підвищується, якщо на підприємстві (фірмі) діє ефективна система забезпечення якості продукції або послуги.

Спочатку до середини 1960-х років у вирішенні завдань забезпечення якості покладалися виключно на контроль якості та відбраковування дефектної продукції. Усю роботу виконував тільки один спеціалізований підрозділ: або відділ технічного контролю (ВТК), або відділ контролю якості (ВКЯ), і все, що від них вимагали, це стояти «на виході» і не допускати відвантаження дефектних виробів. Але забезпечення якості, засноване тільки на такому контролі, створило низку проблем, що характеризуються деякими важливими моментами.

Перший момент полягає в тому, що контролери – це саме той персонал, який знижує загальну продуктивність праці на фірмі. Вони нічого не виробляють. Їхня частка на багатьох підприємствах, зокрема у США, сягала 15 %.

Другий момент стосується зворотного потоку інформації - від відділу технічного контролю до виробничого підрозділу. На це йде занадто багато часу і, найчастіше, ці дані виявляються марними, оскільки продукція вже відвантажена споживачеві.

Слід зазначити, що виявлення дефектів за допомогою контролю, по суті, не сприяє реальному забезпеченню якості. При виявленні дефектів виробник може тільки внести корективи для майбутнього виробництва, переробити виріб або перетворити його на брухт. У будь-якому разі страждає продуктивність праці та зростають витрати виробництва. Крім того, виправлені або перероблені вироби мають більшу ймовірність виходу з ладу, що є повною протилежністю забезпечення якості.

Вищевказаний підхід характерний для такого управління виробництвом, коли управлінням займалися тільки фахівці і повністю ігнорувалася роль робітників, зі встановленими для них технічними і виробничими нормами і правилами.

У сучасному світі такий підхід виявився неможливим та економічно недоцільним. У Японії (фірма Тойота) наприкінці першої половини ХХ ст. вперше було акцентовано увагу на забезпеченні якості, заснованому на управлінні виробничим процесом [18]. Тут уже більше не покладалися

виключно на відділи технічного контролю та контролю якості. Це означало, що, крім відділу технічного контролю, відповідні обов'язки з управління якістю мали виконувати відділи матеріально-технічного постачання та організації виробництва, виробничі відділення фірми, комерційний відділ і всі субпідрядники, працюючи в тісному контакті один з одним. Це також означало, що в управлінні якістю повинні брати участь усі працівники підприємства (фірми), від керівників вищої ланки до виробничих робітників.

Маючи необхідну підготовку, виробничий персонал (а не тільки ВТК) може ефективно управляти технологічним процесом і самостійно контролювати продукцію, що випускається, до передання її на наступний етап виробничого циклу. За умови самоконтролю до того ж забезпечується миттєвий зворотний зв'язок та оперативне здійснення коригувального впливу. Такий підхід дав змогу не тільки різко скоротити кількість дефектних виробів, а й чисельність персоналу, що контролює, у службах контролю до кількох відсотків.

Цей досвід надалі набув розвитку в США та інших розвинених країнах і зараз поширюється по всьому світу.

Доки існує можливість виникнення дефектів, у принципі всі вироби повинні перевірятися. Така перевірка може набувати форми контролю готової продукції, перш ніж така продукція потрапить до замовників, контролю продукції в процесі виготовлення, самоконтролю, або контролю, що проводиться відділом технічного контролю.

Створення системи внутрішньовиробничих відносин на підприємстві, коли всі функціональні підрозділи і всі його співробітники залучені до процесу випуску бездефектної продукції, має на меті розроблення і впровадження системного підходу до управління якістю.

Система якості (система забезпечення (управління) якості) – це сукупність організаційної структури, відповідальності, процедур, процесів і ресурсів, що забезпечує здійснення загального керівництва в галузі якості. Це соціальна система.

Ефективна система забезпечення (управління) якості продукції дає змогу здебільшого здійснювати своєчасний і цілеспрямований вплив на рівень якості продукції, що випускається, попереджати всілякі недоліки та

збої в роботі, забезпечувати їхнє оперативне виявлення та ліквідацію з найменшими витратами ресурсів.

Система забезпечення якості є частиною системи менеджменту якості. Вона спрямована на підвищення показників якості та безпеки продукції або послуги.

Система менеджменту якості забезпечує здатність організації постійно постачати продукцію або послуги, які задовольняють вимоги замовника, законодавчі та нормативно-правові вимоги. Її мета - постійне підвищення задоволеності споживача.

Акредитація (від лат. *accredo* – довіряти) – процедура офіційного підтвердження відповідності об’єкта встановленим критеріям і показникам (стандарту). Найпоширеніша у сфері надання професійних послуг, для оцінювання якості яких споживач, як правило, не володіє достатніми компетенціями.

До акредитованих послуг належать: послуги з освіти, послуги з проведення випробувань (випробувальні лабораторії), послуги з клінічної діагностики (медичні лабораторії), послуги з калібрування (калібрувальні лабораторії), послуги з сертифікації (органи з сертифікації) тощо. Як правило, акредитацію проводять органи з акредитації, які здійснюють свою діяльність за певними правилами та процедурами.

Акредитація почала розвиватися разом зі становленням масового промислового виробництва, появою стандартів і правил виконання робіт. Перші «види» акредитації в сучасному розумінні з’явилися в XIX столітті. Імпульсом до її розвитку в промисловій сфері стала необхідність забезпечення єдності результатів оцінки та вимірювань.

Щоб забезпечити довіру між виробником і споживачем продукції, потрібна була участь незалежної третьої сторони, якій довірятимуть і споживач, і виробник. Основним інструментом, що забезпечує таку довіру, стала акредитація. Згодом вона набула ширшого спектра діяльності і стала застосовуватися практично в усіх секторах економіки.

Сертифікація (від лат. *sertifico* – засвідчую) продукції та/або процесу – це форма документального підтвердження того, що продукція та/або процес відповідають певним вимогам. Вони можуть міститися в документах зі стандартизації, в умовах договорів або інших нормативно-технічній

документації. Тобто, сертифікація - це підтвердження «третьою стороною» виконання вимог, наприклад, міжнародних стандартів, галузевих специфікацій або технічних вимог і правил. Об'єкти сертифікації: продукція, вироби, проекти, технологічні процеси виробництва, системи забезпечення якості, системи менеджменту.

Документ, що засвідчує відповідність продукції та/або процесу цим вимогам, називається сертифікатом відповідності.

Технічним контролем називається перевірка відповідності продукції або процесу встановленим технічним вимогам, від яких залежить якість продукції.

Сутність технічного контролю зводиться до отримання інформації про фактичний стан об'єкта контролю (матеріалу, виробу, технічної системи загалом), про ознаки і показники його властивостей і подальшого зіставлення отриманої первинної інформації із заданими критеріями (тобто ознаками), нормами і вимогами.

Технічний контроль якості продукції здійснюється на всіх стадіях життєвого циклу продукції.

На етапі розроблення продукції основним завданням контролю якості є виявлення і запобігання явним порушенням встановлених вимог розроблення згідно зі стандартами та іншими нормативними документами, а також механічним помилкам у процесі проєктування виробів і оформлення технічної документації.

Основні причини порушень: недостатньо повне врахування сучасних досягнень науки і техніки, занижені вимоги стандартів, технічних умов та інших нормативних документів під час розроблення нових виробів; недостатня забезпеченість розробників необхідною інформацією про кращі досягнення у сфері проєктування та виробництва аналогічної продукції; незадовільний облік, аналіз та узагальнення відомостей про експлуатацію аналогічної продукції споживачем; неповне врахування думки споживача щодо якості та технічної якості аналогічної продукції; недостатнє врахування думки споживача і т. ін.

Технічна документація (нормативно-технічна документація – НТД) розробляється науково-дослідними, проєктно-конструкторськими та технологічними організаціями, а також відповідними інженерними

підрозділами підприємств (відділ головного конструктора, головного технолога та ін.). Технічна документація також повинна піддаватися різним видам контролю (конструкторському, технологічному, метрологічному, нормоконтролю тощо), оскільки вона відіграє важливу роль у формуванні якості продукції. Підрозділи нормоконтролю зобов'язані не тільки контролювати власну технічну документацію, а й проводити експертизу креслень і проєктів, які надходять з інших організацій, вибірково перевіряти технічну документацію на підприємствах, що постачають за кооперацією напівфабрикати та комплектуючі вироби.

Вхідний контроль на стадії підготовки виробництва включає контроль якості сировини, матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, одержуваних за кооперацією і використовуваних у власному виробництві кінцевої продукції. Головна мета організації вхідного контролю - запобігання використанню у виробництві вихідних компонентів продукції, що не відповідають за якістю вимогам, які пред'являються до них.

Технічний контроль на стадії виготовлення продукції зводиться до контролю якості та стану технологічних процесів. Під час контролю технологічних процесів головна увага приділяється перевірці дотримання технологічної дисципліни в процесі виробництва виробів. Недотримання технологічної дисципліни може бути зумовлене: недотриманням вимог технології з вини безпосередніх виконавців; використанням у власному виробництві недоброякісної сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектувальних виробів тощо, отриманих за кооперацією; несправністю або незадовільним настроюванням технологічного устаткування, несвоєчасною заміною інструменту тощо; невідповідністю устаткування, інструменту, оснащення та контрольно-вимірювальних засобів вимогам конструкторської та технологічної документації; невідповідністю обладнання, інструменту, оснащення та контрольно-вимірювальних засобів вимогам.

Контроль за дотриманням технологічної дисципліни на підприємствах проводять з метою: виявлення порушень вимог стандартів, технічних умов, конструкторської, технологічної та іншої нормативно-технічної документації під час здійснення технологічних процесів; виявлення причин і конкретних винуватців цих порушень; розроблення заходів,

спрямованих на усунення виявлених відступів від технології та запобігання їм у подальшому.

Остаточний (здавальний) контроль є одним з основних видів контролю якості продукції. На етапі остаточного контролю перевіряється відповідність усіх без винятку показників якості продукції, які передбачені вимогами нормативно-технічної документації. За даними остаточного контролю приймається рішення про придатність виготовленої продукції (виробу) до подальшого використання та її відвантаження споживачеві з оформленням відповідного документа, що засвідчує якість (сертифікат якості).

Контроль якості на стадії експлуатації або споживання продукції полягає в контролі відповідності показників якості продукції вимогам нормативно-технічної документації під час зберігання, транспортування до споживача і функціонування цієї продукції, а також у перевірці правильності експлуатації продукції.

Контроль якості на стадії відновлення (ремонту) продукції полягає у перевірці відповідності показників якості продукції вимогам нормативно-технічної документації після ремонту та технічного обслуговування цієї продукції.

Утилізація відходів (від лат. *utilis* – корисний) – використання відходів на різних стадіях їхнього технологічного циклу; забезпечення вторинного використання або перероблення відходів і відпрацьованих або забракованих виробів, які відслужили свій термін, що також потребує спеціалізованих процедур контролю якості.

2. ХАРАКТЕРНІ ДЕФЕКТИ ПРОДУКЦІЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ. ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ТА СПОСОБИ УСУНЕННЯ

2.1. Класифікація дефектів металопродукції

У процесі виготовлення металеві вироби проходять складний технологічний цикл. Він охоплює такі основні операції: плавлення, лиття (розливання), обробка тиском (прокатка, кування, штампування тощо), зварювання, термічна обробка, механічна обробка, з'єднання з іншими деталями. Окремі операції можуть випадати з цього ланцюжка або повторюватися кілька разів. Готові вироби зберігаються й експлуатуються, при цьому їхні параметри можуть зазнавати змін. У процесі виконання технологічних операцій якість металу виробів також змінюється. При цьому, на кожній з безлічі технологічних операцій усього циклу виготовлення металопродукції можливі передумови для виникнення тих чи інших дефектів.

Дефекти розрізняють за: **розташуванням** (зовнішні, внутрішні або приховані); **формою** (об'ємні та плоскі); **розміром** (субмікрокристалічні, мікрокристалічні та макродефекти); **типом невідповідності** (несуцільність, невідповідність геометричним розмірам, механічним властивостям або структурі); **ступенем небезпеки** (критичні, значні та малозначні).

Окремо потрібно відзначити **експлуатаційні дефекти** металу (утворюються під час експлуатації готової металопродукції), які бувають:

- **силовими** від впливу постійного або циклічного навантаження (втома металу тощо);
- **корозійними** від впливу агресивних середовищ (загальна корозія, розтріскування, стрес-корозія, корозійна втома тощо);
- **тепловими** – від впливу температури зовнішнього середовища (холодоламокність, повзучість, термоудари, тріщини тощо);
- **радіаційними**, що утворюються під час опромінення матеріалу потоками частинок або квантів електромагнітного випромінювання (дефекти кристалічної структури). Типові значення порогової енергії $E_{\text{пор}}$, необхідної для утворення радіаційних дефектів, становлять 20...30 еВ.

Дефекти металу під час прокатки умовно поділяють на сталеплавильні та прокатні. При цьому під прокаткою розуміють будь-які процеси, пов'язані з деформацією і формозміною.

- **Сталеплавильні дефекти** – дефекти, що утворюються внаслідок використання неякісної вихідної сировини, порушень технологічного процесу виплавлення і розливання сталі, неправильного охолодження і транспортування тощо. Такі дефекти прокату металу ще називають невідповідностями злитків.

- **Прокатні дефекти** – дефекти, які виникають унаслідок порушень під час нагрівання заготовок, під час деформації та оздоблення виробів.

Частина дефектів, що утворюються під час обробки металів тиском, мають спадковий характер. Оскільки, як правило, процеси деформації є багатоопераційними (складаються зі значної кількості послідовних технологічних операцій, на кожній з яких метал зазнає деформаційного впливу), дефекти можуть утворюватися як на будь-якій з операцій, так і трансформуватися з дефектів, які раніше утворилися на попередньому переділі або на попередній операції даного переділу.

Слід також виділити специфічні дефекти, що утворюються під час виготовлення металовиробів із застосуванням процесів зварювання, а також дефекти термічної обробки.

2.2. Основні дефекти злитків і заготовок

Дефекти (невідповідності) злитків і заготовок, у тому числі безперервнолитих, можна розділити на явні та приховані.

Ці невідповідності видно візуально під час огляду заготовки. Також до явних дефектів належать і ті, які виявляються інструментальними засобами, за умови, що процедура прописана в нормативній документації [21–25].

Приховані дефекти – такі невідповідності не видно неозброєним оком і не виявляються за допомогою відповідної апаратури. Вони можуть виявитися під час подальшої обробки виробу, під час експлуатації або під час проведення дефектоскопії.

Дефекти бувають **внутрішніми і зовнішніми**. Внутрішні небезпечні тим, що важко виявляються. За певних умов під час прокатки вони дробляться, стоншуються, витягуються і закриваються, стаючи безпечними, але буває внутрішні дефекти окислюються, виходять на поверхню і під час прокату збільшуються. Зовнішні дефекти небезпечні завжди, оскільки під час

прокатки не закриваються, тому їх можна і потрібно виявляти й усувати перед наступним переділом.

За природою утворення дефекти сталевих злитків поділяють на природні або неминучі, які виникають під час затвердіння й охолодження злитка, а також технологічні, які виникають через недосконалість технології розливання і виплавлення сталі.

До числа перших належать усадочна раковина, осьова рихлість, хімічна і структурна неоднорідність, внутрішня (осьова) пористість, ендогенні неметалеві включення; до числа других - тріщини, завороти кірки, підкіркові бульбашки в злитках спокійної сталі, високість злитків киплячої сталі, мала товщина здорової поверхні в них і деякі інші.

Прийнято також виділяти п'ять видів дефектів злитків (заготовок): за невідповідністю геометрії, за дефектами поверхні, за несущільністю в тілі, наявністю неметалевих включень і невідповідністю структури. Аналогічний поділ характерний для всіх наступних переділів виготовлення металопродукції.

Далі детальніше розглянемо зазначені види дефектів злитків.

До дефектів за невідповідністю геометрії (здебільшого характерно для безперервнолитих заготовок) належать: здуття, увігнутість (рис. 2.1), ромбічність, овальність (рис. 2.2), скручування, кривизна, викривлення (рис. 2.3).

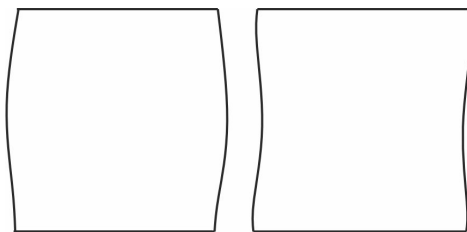


Рис. 2.1. Здуття і увігнутість заготовки

Основною причиною утворення здуття є низька міцність поверхні внаслідок високого вмісту сірки і фосфору, порушення рівномірності охолодження в кристалізаторі, високої швидкості розливання, високої

температури сталі в промківші, надмірного тиску роликів у тягнучо-правильному агрегаті.

Причинами увігнутості є нерівномірне вторинне охолодження, зношеність гільзи кристалізатора, неспіввісність кристалізатора і роликів у зоні вторинного охолодження, висока швидкість розливання.

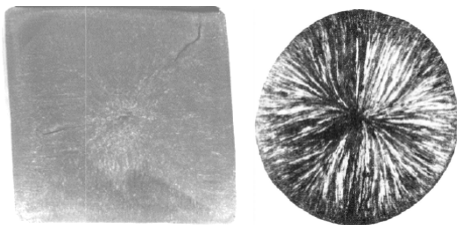


Рис. 2.2. Ромбічність і овальність заготовки

Причинами виникнення дефектів форми заготовки у вигляді ромбічності та овальності є: нерівномірність первинного охолодження в кристалізаторі, порушення температурно-швидкісного режиму розливання, неузгодженість кристалізатора та підтримуючої системи валків, неоптимальна сила обтискання тягнучо-правильної машини. У свою чергу, причинами нерівномірного охолодження заготовки в кристалізаторі можуть бути зношення гільзи кристалізатора, нерівномірне змащування, неякісна ШУС (шлакоутворювальна суміш) у кристалізаторі, розмив поверхні струменем металу, високий вміст шкідливих домішок.

Ромбічність і овальність заготовки супроводжується утворенням поверхневих навколокутових тріщин, внутрішніх діагональних тріщин.

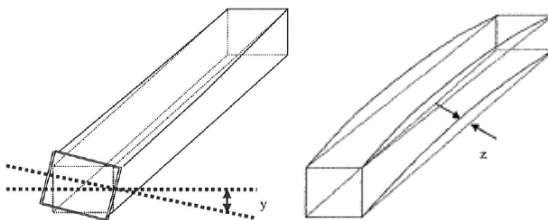


Рис. 2.3. Скручування і кривизна (викривлення) заготовки

Основні причини скручування: неправильне налаштування тягнучо-правильного агрегату, нерівномірне охолодження заготовки на виході з кристалізатора, порушення технологічної осі струменю металу. Основні причини викривлення: нерівномірне вторинне охолодження, тривалі зупинки розливання, охолодження заготовок з температурою понад 500 °С на підлозі цеху.

До дефектів поверхні злитків належать: тріщини (рис. 2.4–2.7), пояси (рис. 2.8), сліди гойдання кристалізатора (рис. 2.9), плени та завороти поверхні (рис. 2.10), рослість злитків.

Тріщини. Тріщини на поверхні злитка або литого бlyома (сляба) є наслідком великих механічних напружень, що виникають при невірній усадці в момент кристалізації. Вони виникають також за наявності домішок і неметалевих включень на поверхні, у разі швидкого або нерівномірного охолодження злитків і литих слябів тощо. «Гарячі» тріщини утворюються зазвичай тоді, коли термічні та механічні деформації розтягування досягають 0,2...0,3 %, і на зливках і литих слябах багатьох марок сталі дрібні тріщини з'являються завжди. Вони можуть розташовуватися вздовж, впоперек або під кутом до осі злитка, тріщини завжди мають сильно окислені та знеуглецьовані краї. Зі збільшенням вуглецю, хрому, сірки, ніобію, газових домішок (наприклад, азоту) схильність сталі до розвитку тріщин під час розливання зростає.

Різновидом тріщин слід вважати **волосовини** – витягнуті вздовж прокату дрібні переривчасті групові тріщини, що виходять на поверхню. Причиною їх утворення є наявність у зливках неметалевих включень, газових підкіркових бульбашок, що виділилися внаслідок зниження розчинності газів у металі або під час використання неякісного (густого) змащовання виливниць. Волосовини небезпечні тим, що під окалиною на заготовці їх важко визначити. Тонкі й довгі, вони можуть бути легко пропущені під час огляду. На зламі зразка металу видно, що волосовини можуть бути дуже глибокими.

Поверхневі поздовжні тріщини, пов'язані зі спотворенням профілю злитка, є результатом підвищеної ромбічності заготовок, ужиму на поверхні або випучування граней безперервнолитої заготовки (БЛЗ). Тріщини цього

виду поширюються зсередини заготовки вздовж діагоналі між тупими кутами. Зазвичай така тріщина згортається в бік від діагоналі безпосередньо перед кутом і з'являється на поверхні біля кута, де поверхня злитка найбільш тонка.

Цей дефект БЛЗ, за його грубого розвитку, може призвести до прориву металу під час перебування злитка в зоні вторинного охолодження.

Поздовжні тріщини, не пов'язані зі спотворенням профілю БЛЗ, можуть мати вигляд від коротких ниткоподібних (іноді не видимих без зачистки поверхні) до грубих зі значною шириною розкриття. Ці тріщини можуть розташовуватися безпосередньо по кутах, на деякому зсуві від кутів або по гранях заготовок.

Основною причиною появи поздовжніх тріщин є знос або деформація профілю гільз кристалізаторів. У процесі експлуатації кристалізаторів відбувається зношування і деформація робочих стінок гільз по гранях і кутах, що знижує ефективність і рівномірність первинного охолодження злитка, призводить до появи локальних стоншених ділянок поверхні БЛЗ, де в свою чергу можуть утворюватися поздовжні тріщини.

При значному розширенні тріщини метал може прориватися з рідкої середини назовні, і якщо це відбувається в кристалізаторі, утворюються напливи на поверхні БЛЗ.

Грубі тріщини можуть стати причиною розриву оболонки злитка під кристалізатором (прориву металу). З цієї причини необхідний суворий контроль за зміною профілю гільз кристалізаторів під час експлуатації, для визначення моменту їхнього граничного зносу і заміни.

Досвід показує, що проблеми з розтріскуванням БЛЗ виникають після вмісту вуглецю в сталі близько 0,15 % і досягають свого максимуму при вмісті вуглецю 0,40 %. За вмісту вуглецю близько 0,40 % усадка наближається до максимуму, міцність на розтягнення падає, в той час як пластичність все ще відносно низька.

Для нелегованих вуглецевих марок сталі з вмістом вуглецю близько 0,18 % пластичність мінімальна. Цим можна пояснити високу тріщиночутливість цих сталей [20].

Присутність шкідливих і залишкових елементів у сталі (наприклад, підвищений вміст *P*, *S*, *Cu*, *Sb*, *Sn*, *As*) за вуглецю в діапазоні 0,30 ... 0,50 %

чинить додатковий істотний послаблювальний вплив на міцність поверхні злитка.

Для обмеження розтріскування БЛЗ відношення Mn/S у сталі рекомендується підтримувати на рівні не менше 25.

Температура металу, що розливається, чинить високий вплив на розтріскування заготовок і має бути максимально можливо наближена до температури ліквідусу.

Далі розглянемо різновиди гарячих тріщин, які зустрічаються найчастіше [23, 24].

Поперечні гарячі тріщини. Утворення зовнішніх поперечних тріщин – результат перешкоди вільній усадці злитка, що твердне. Найчастіше тріщини виникають внаслідок місцевого зависання злитка у виливниці. Для запобігання утворенню цієї вади необхідно забезпечувати щільне прилягання прибуткової надставки до виливниці і відбраковувати виливниці з дефектними стінками.

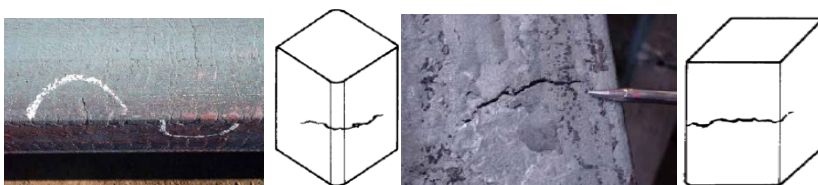


Рис. 2.4. Поперечні тріщини

Під час виготовлення безперервнолитих заготовок (БЛЗ) основними причинами утворення поперечних тріщин є: інтенсивне первинне і вторинне охолодження поверхні БЛЗ, нерівномірне подавання ШУС у кристалізатор або її низька якість, порушення режиму хитання кристалізатора і його центрування відносно роликів, зношення гільзи кристалізатора або надмірна конусність, високий вміст шкідливих домішок.

Наявність поперечних тріщин можуть призводити до проривів металу під кристалізатором. За незначного ураження усувається точним обробленням і шліфуванням.

Поздовжні зовнішні гарячі тріщини. Вони виникають під час розливання перегрітої сталі та за підвищених швидкостей розливання. Їхня

ширина становить 1...3 мм, довжина досягає 1 м і більше. Внаслідок усаджування поверхні злитка, що твердіє, і теплового розширення виливниці між ними утворюється зазор. Рідкий метал опиняється ніби в посудині, стінками якої є поверхня затверділого металу. Тонка затверділа поверхня може не витримати феростатичного тиску рідкої сталі; її розрив у поздовжньому напрямку являє собою поздовжню тріщину. Імовірність розриву тим вища, чим вища температура сталі і швидкість розливання, оскільки в цих випадках через надлишок тепла повільніше наростає товщина поверхні затверділого металу. Зазвичай поздовжні тріщини утворюються по кутах злитка.

Заходами боротьби з утворенням поздовжніх гарячих тріщин зазвичай є наступні: запобігання перегріву сталі, зменшення швидкості розливання, застосування виливниць з увігнутими і хвилястими стінками.

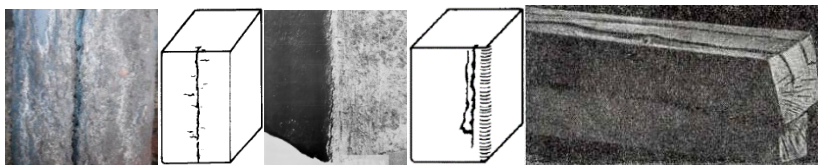


Рис. 2.5. Поздовжні зовнішні гарячі тріщини

Основні причини утворення поздовжніх тріщин: знос гільзи кристалізатора, нерівномірне первинне і вторинне охолодження заготовки, погане центрування кристалізатора відносно роликів, висока температура сталі в проміжному ковші, високий вміст шкідливих домішок у сталі. Наявність поздовжніх тріщин може призводити до проривів металу під кристалізатором.

У разі незначного ураження злитків поздовжніми тріщинами, їх видаляють вирубанням або шліфуванням.

Поздовжні холодні зовнішні тріщини. Вони утворюються в процесі охолодження затверділого злитка на його гранях за температури нижче 600°C. Вони виникають у разі занадто швидкого охолодження злитків унаслідок термічних і фазових напружень. Для запобігання їх утворенню слід повільніше проводити охолодження злитків. Найдієвіший засіб проти

утворення термічних тріщин – садження злитків у нагрівальні агрегати перед подальшої обробки тиском в гарячому стані.

Павукоподібні тріщини - цей вид дефекту характерний для блюмових і слябових заготовок.



Рис. 2.6. Павукоподібні тріщини

Основними причинами утворення павукоподібних тріщин є висока температура сталі, високий вміст шкідливих домішок, неякісна ШУС у кристалізаторі. Усуваються вирубанням або шліфуванням.

Діагональні тріщини – непереборний дефект, супутній ромбічності. Причини утворення діагональних тріщин аналогічні причинам виникнення ромбічності. За глибини понад 5 мм призводить до виникнення дефектів прокату.

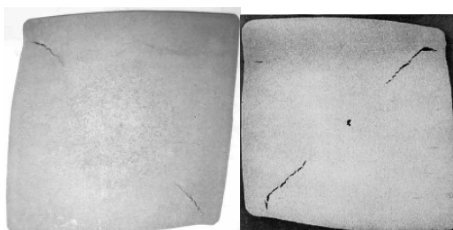


Рис. 2.7. Діагональні тріщини

Пояси. У разі припинення подачі металу, наприклад у разі заміни занурюваної склянки проміжного ковша, пропалювання дозувальних каналів або внаслідок несправностей у газорізанні, оболонка злитка в районі дзеркала відходить від стінок кристалізатора по всьому периметру. Відновлення

процесу розливання призводить до переливу металу через верх оболонки злитка й утворення пояса металу, забрудненого шлаковими включеннями (рис. 2.8). Цьому виду дефекту можна запобігти стабільним розливанням без тривалої перерви струменя й утворення окисленої поверхні на дзеркалі металу в кристалізаторі.

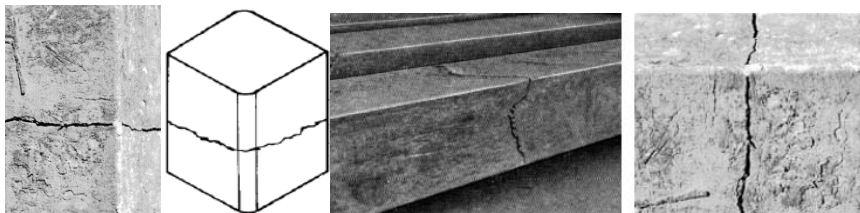


Рис. 2.8. Характерний вигляд дефекту типу «пояс»

Основними причинами утворення цього дефекту є: переривання струменя металу з проміжного ковша, різкі коливання рівня металу в кристалізаторі, знижена температура сталі, порушення технології розкислення сталі, що призводить до зтягування розливного стакану проміжного ковша. Під час прокатки наявність пояса спричиняє небезпеку розриву гарячекатаного прокату. Усувається цей дефект обрізанням та утилізацією на брухт ураженої ділянки.

Під час безперервного розливання сталі одним із найважливіших технологічних прийомів, що сприяє зниженню ймовірності прилипання поверхні металу, що розливається, до стінок кристалізатора, є надання кристалізатору зворотно-поступальних рухів із певною частотою й амплітудою. При цьому в зазор між поверхнею і кристалізатором подається змащувальна речовина: шлакоутворювальна суміш або рідке мастило. Однак, за неправильно заданих параметрів гойдання, або за збоїв у роботі механізму гойдання, можливе утворення дефекту на поверхні БЛЗ у вигляді грубих слідів гойдання (рис. 2.9). За глибини понад 2...2,5 мм і вмісту вуглецю 0,15...0,25 % може призвести до утворення тріщин.

Розвиток слідів хитання посилює неправильно заданий режим хитання, надмірна конусність гільзи кристалізатора внаслідок її зношення, невірний

вибір ШУС, її низька якість або нерівномірний розподіл, різкі коливання рівня металу, «холодний» або перегрітий метал.

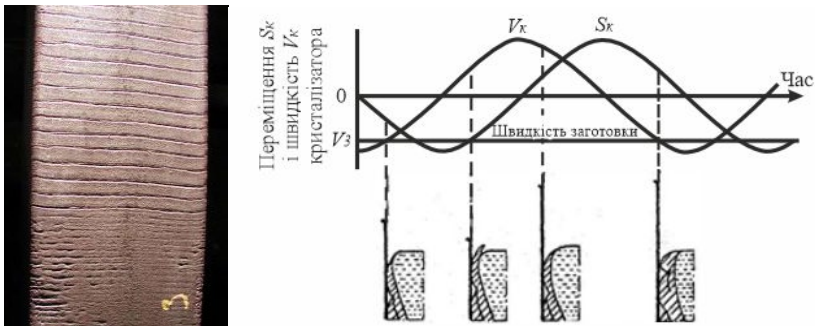


Рис. 2.9. Сліди хитання кристалізатора та механізм їх утворення

Практично всі перераховані дефекти не є органічною вадой безперервнолитої заготовки, що дає змогу запобігти їхньому виникненню за умови досягнення раціональних режимів розливання і функціонування машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

З певним ступенем припущень можна виділити три основні категорії причин утворення дефектів на поверхні БЛЗ:

- зумовлені технологічним процесом розливання сталі (надто висока або низька температура розливання, хімічна неоднорідність сталі, забрудненість її неметалевими, шлаковими та газовими включеннями тощо);
- пов'язані з обслуговуванням МБЛЗ під час розливання (занадто сильні коливання дзеркала металу, порушення в подачі шлакоутворювальної суміші, нерівномірність охолодження в зоні вторинного охолодження тощо);
- викликані незадовільним утриманням МБЛЗ (стан внутрішньої поверхні кристалізатора, розташування підтримувальних роликів, зусилля тягучої кліті тощо).

Плени і заворот поверхні. Це дефект поверхні злитків, що утворюється переважно під час сифонного розливання внаслідок окислення й охолодження поверхні рідкої сталі у виливниці. Зазвичай поверхня металу, що піднімається у виливниці, покривається плівкою оксидів, що утворюються внаслідок окислення складових сталі киснем повітря. Метал,

що твердіє під плівкою, утворює разом з нею поверхню, яка поглинає також неметалеві та шлакові включення, що спливають з рідкої сталі. Якщо поверхня пристає до стінок виливниці, то метал, що піднімається знизу, прориває її, загортає до стінки виливниці і заливає. У місці завороту поверхні в злитку виявляються скупчення неметалевих включень і газові бульбашки, що утворюються в результаті взаємодії оксидів поверхні з вуглецем, який міститься в сталі. У процесі прокатки в місці завороту поверхні виникають розриви, тому потрібне зачищення поверхні прокату або поверхні злитків перед прокаткою, що ускладнює виробництво і спричиняє додаткові втрати металу.

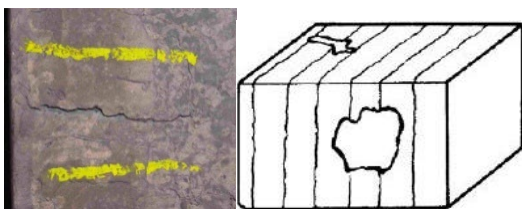


Рис. 2.10. Плини та заворот поверхні

Основними причинами утворення зовнішніх плівок і заворотів поверхні є: низька температура металу, висока окисленість сталі, різка зміна швидкості витягування, неякісна шлакоутворювальна суміш (ШУС), раптові зупинки процесу розливу, витягування заготовки, потрапляння бризок металу на стінки кристалізатора при зниженні рівня металу. Ці дефекти найбільш властиві маркам сталі з високим вмістом активних елементів (Ti , Cr , Si). При прокаті вони спричиняють утворення поверхневих дефектів.

Плини, які утворюються під час розливання рідкого металу зверху, зосереджуються переважно, в нижній частині злитка. У результаті удару струменя металу об дно виливниці сталь розбризкується. Бризки металу застигають на стінках виливниці і поверхня їх окислюється. Вони не розчиняються в рідкій сталі, що піднімається, і не зварюються з основною масою злитка, утворюючи дефект поверхні злитка – плени. Плини не зварюються з металом і під час прокатки, внаслідок чого поверхню прокатаних заготовок доводиться піддавати зачистці або вирубці.

Кірки утворюються під час розливання злитків сифонним способом, коли дзеркало металу відкрите і має відносно низьку температуру. У цьому випадку окремі порції металу можуть відокремитися від основного металу й окислюватися. Такі об'єми плаватимуть в основному металі, не з'єднуючись із ним. Потім вони або спливають і йдуть у прибуткову частину злитка, ставши безпечними, або приварюються до країв виливниці та заливаються рідким металом, утворюючи поверхневий дефект, який глибоко заглиблюється в середину тіла злитка. Можливе також застрявання кірки всередині злитка з утворенням внутрішнього дефекту під назвою «темна кірка». Зазвичай по межах кірки концентруються оксиди не тільки заліза, а й інших металів (оксиди), тут же можуть бути різні неметалеві включення, газові сполуки. Краї кірочок зазвичай сильно знеуглецьовані. Після прокатки кірка частково розташовується на поверхні, але рваними й окисленими краями може глибоко йти всередину заготовки. Такий дефект дуже важко усувається. Також не усувається «темна кірка».

Основними способами боротьби з кірками є збільшення температури дзеркала металу під час розливання. Для кожної марки сталі існує мінімальна температура розливання, вище якої кірки малоімовірні. Однак збільшення температури розливання збільшує схильність сталі до тріщиноутворення. Для зменшення кірочок корисно також збільшення швидкості розливання, захист дзеркала металу шлаком, лусочками слюди (вермикулітом) або спеціальними сумішами. Чим чистіший метал, тим менше умов для утворення кірочок.

Під час безперервного розливання сталі також можливе утворення кірочок, тому струмінь металу слід захищати від окислення аргоном або азотом, а також за допомогою вогнетривких трубок, які встановлюють між деталями розливного і проміжного ковшів і кристалізатора.

Заливини утворюються внаслідок потрапляння рідкого металу в зазор між кіркою злитка і стінкою кристалізатора, що утворюється внаслідок викривлення меніска в ділянці їхнього зіткнення (рис. 2.11).

Утворення заливин найімовірніше в разі перерв у подачі металу в кристалізатор, недостатнього або нерівномірного змашування стінок кристалізатора, значних коливаннях рівня металу в ньому, розливання металу зі зниженою швидкістю та температурою і таке інше. Заливини утворюються також у разі прориву оболонки злитка.

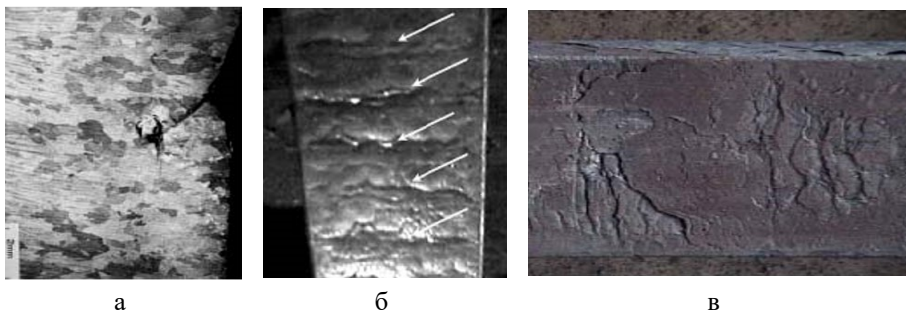


Рис. 2.11. Поздовжній переріз зразка заготовки в місці розташування заливини (а) та її фото на поверхні заготовок (б, в)

Загалом для попередження таких дефектів, як пояси, завороти скоринки злитка, заливини, необхідно запобігати затягуванню дозувальних вузлів проміжних ковшів, мінімізувати амплітуду коливань рівня металу в кристалізаторі, оптимізувати режими роботи змащення його робочої поверхні, забезпечувати стабільність швидкості розливання тощо.

Шлакові (неметалеві) включення. Шлакові включення, що зустрічаються на поверхні БЛЗ і проникають всередину металу, є багатофазними, переважно силікатного характеру. У сортових заготовках великі шлакові включення частіше зустрічаються в районі ребер.

Шлакові включення на поверхні безперервнолитих заготовок з'являються внаслідок розмивання вогнетривкої футеровки ковшів, затягування шлаку з проміжного ковша і з дзеркала кристалізатора, спливання в кристалізаторі продуктів розкислення сталі, коливань рівня металу тощо.

Для вуглецевих сталей, розкислених переважно кремнієм і марганцем, істотну роль відіграє величина відношення марганцю до кремнію. За низького відношення Mn/Si , шлак, що утворюється, розташовується на дзеркалі металу в кристалізаторі та забруднює поверхню заготовки. За підвищеного відношення Mn/Si в сталі винесення шлаку на поверхню металу в кристалізаторі ускладнене, і шлак може виявитися у вигляді макроскопічних оксидних включень всередині злитка.

Значна кількість шлакових включень на меніску металу в кристалізаторі може призвести до масових проривів твердої оболонки заготовки в зоні вторинного охолодження під кристалізатором.

Основні заходи, що дають змогу знизити забрудненість безперервнолитого злитка шлаковими включеннями такі: дотримання заданих режимів розкислення сталі, дотримання температурних режимів, застосування ерозійностійких вогнетривких матеріалів, підтримання постійного рівня металу в промковші та кристалізаторі, правильний підбір ШУС і рівномірна подача її в кристалізатор.

Неметалеві включення у вигляді скупчень, плівок і поодиноких крапель можуть зустрічатися на поверхні заготовки і в підповерхневих шарах. Більшою мірою вони проявляються на радіальних і криволінійних МБЛЗ на межі меншого радіуса вигину [21].

На забрудненість сталі включеннями істотно впливають особливості формування злитка під час безперервного розливання: велике відношення довжини безперервно литого злитка, до його товщини, що призводить до збільшення глибини рідкої фази. Безперервне опускання рідкого металу з його твердою оболонкою та безперервне нарощування зверху нових шарів ускладнюють процес відстоювання та спливання неметалевих включень. Триваліший контакт металу, що розливається, з атмосферою навколишнього повітря активізує процеси вторинного окислення під час розливання.

Порівняно з розливанням металу у виливниці, під час безперервного розливання швидкість кристалізації вища, ширина двохфазної зони і час перебування металу в двохфазному стані менші. На відміну від злитка, відлитого у виливницю, кожен поперечний переріз безперервнолитої заготовки за її висотою формується за постійних теплофізичних умов, що сприятливо позначається на вмісті та характері розподілу неметалевих включень в об'ємі БЛЗ.

Технологія виробництва сталі, тобто розкислення і рівень вмісту кисню до розкислення мають визначальний вплив на рівень забрудненості БЛЗ включеннями [22].

Одним зі значущих джерел неметалевих включень у сталі є вогнетриви, що застосовуються для футерування сталерозливних і проміжних ковшів. Включення утворюються під час хімічних реакцій

вогнетривких матеріалів з рідкою сталлю. Підвищена забрудненість продуктами ерозії вогнетривів відзначається в БЛЗ зі сталі з підвищеною окисленістю.

У зв'язку з цим важливим є надійний захист сталі від вторинного окислення під час розливання, а за несприятливих гідродинамічних умов у промковші, великі включення можуть затягуватися в дозувальний вузол і потрапляти в кристалізатори.

Під час визначення чистоти безперервнолитих заготовок використовують такий оціночний параметр, як крайові точкові забруднення (КТЗ), які проявляються у вигляді точкових скупчень лікватів (переважно сульфідів і шлаків) за перерізом БЛЗ і визначаються величиною точок і щільністю їхнього розташування.

Основними заходами, що дають змогу знизити забрудненість сталі неметалевими включеннями, є: ретельне розкислення сталі (мінімізація вмісту кисню в металі, який подають для розливання); обробка металу кальцієм для оптимізації форми та складу включень; використання зносостійких вогнетривів для футерування сталерозливного та проміжного ковшів; забезпечення надійного захисту струменя металу зі сталерозливного й проміжного ковшів (застосування занурювальних труб і склянок, використання інертного газу); ізоляція дзеркала металу в сталерозливному ковші (застосування занурювальних труб і стаканів, використання інертного газу); ізоляція дзеркала металу у промковші та кристалізаторі, забезпечення оптимальних умов впливання включень у проміжному ковші, тобто забезпечення оптимальної його конструкції, застосування рафінуючих сумішей для асиміляції включень, продування металу інертним газом через пористі пробки у дніщі ковша, застосування електромагнітного перемішування металу для полегшення спливу неметалевих включень у кристалізаторі та їх рівномірного розподілу в БЛЗ.

На забрудненість сталі неметалевими включеннями, також, можуть впливати точність і швидкість виконання технологічних операцій у процесі розливання сталі на МБЛЗ: наповнення проміжного ковша металом на початку розливання повинно проводитися максимально швидко, а дзеркало металу в ковші повинно бути ефективно захищене за допомогою ізолюючого засипання; кількість шлаку зі сталековша, що потрапляє до промковша під

час перековшовування плавок, має бути мінімізованою; під час перековшовування плавок не можна допускати суттєвого падіння рівня рідкого металу на проміжному ковші; кількість шлаку із сталковша, що потрапляє до промковша під час перековшовування плавок, повинна бути мінімальною; не можна допускати істотного падіння рівня металу в промковші, тому що це може привести до погіршення організації струменю металу і затягуванню у метал шлаку з поверхні тощо.

Неметалеві включення можуть бути як екзогенного, так і ендегенного походження. Як вже було сказано, джерелами їхньої появи можуть бути шлакоутворювальна суміш, захоплена в метал швидкими рухомими потоками металу із занурювальної склянки (недостатнє заглиблення занурювальної склянки в розплав або тріщина в ній у районі дзеркала металу), вогнетривкий матеріал, що відшарувався, з розливального і проміжного ковшів, продукти реакції сталі та алюмінію, що міститься в ній, з вогнетривким матеріалом, продукти розкислення і вторинного окислення металу, велика глибина проникнення струменя сталі в рідку ванну заготовки, захоплення шлакових відкладень (на внутрішній поверхні занурювальної склянки) струменем металу.

Щоб зменшити забрудненість сталі неметалевими включеннями і порами, необхідно забезпечити раціональні режими руху сталі на ділянці «промковш – кристалізатор» і безпосередньо в кристалізаторі, за можливості, унеможливити її вторинне окислювання за допомогою використання захисних заходів та продувки аргонном, використовувати високоякісні вогнетривкі матеріали для розливання, а також широко застосовувати методи позапічної обробки для розкислення, модифікування і рафінування металу.

Підкіркові (газові) бульбашки (рис. 2.12) являють собою дефекти поверхневої зони заготовки у вигляді заповнених газом поодиноких або групових пор і невеликих порожнеч округлої та витягнутої форми, що іноді виходять на поверхню. Бульбашки розташовуються по периметру безперервнолитих заготовок у заохолоджених ділянках. Найбільша кількість бульбашок спостерігається в районі вузьких граней і кутів, а також на стику кристалітів. Виникнення підкіркових бульбашок найчастіше пов'язане з недостатнім розкисленням металу.

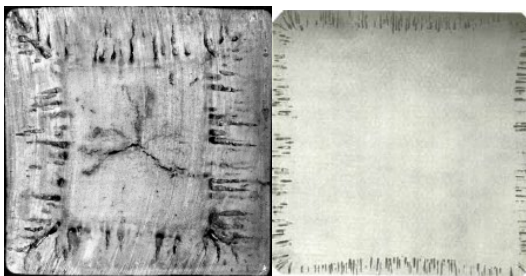


Рис. 2.12. Газові бульбашки (підкіркові канали)

Основними причинами утворення підкіркових газових бульбашок є: недостатнє розкислення сталі та високий вміст газів, неякісна (волога) шлакоутворювальна суміш, перегрітий метал, недостатнє просушування футерування проміжного ковша. Під час прокату газові бульбашки можуть розгортатися і призводити до утворення тріщин і прокатних плін.

Найбільший вплив на ураженість БЛЗ даним дефектом чинить рівень атомарного (вільного) кисню в сталі, що утворюється внаслідок високої швидкості охолодження злитка, в процесі безперервного розливання. Щоб уникнути утворення газових пор, рівень атомарного кисню в сталі має бути знижений до мінімального рівня (особливо під час розливання низьковуглецевих марок сталі), тому дуже важливим є ефективне проведення операції розкислення сталі.

Надмірна кількість мастила в кристалізаторі, підвищений вміст води в мастилi або ШУС, різкі зміни рівня металу в кристалізаторі також призводять до утворення кіркових і поверхових газових бульбашок у БЛЗ.

Зростання злитка спокійної сталі. Причиною цього дефекту злитків спокійної сталі є підвищений вміст у сталі водню. Під час кристалізації надлишковий водень виділяється з розчину і залишається між кристалами у вигляді бульбашок, викликаючи збільшення висоти (зростання) злитка. Цей дефект характерний для сталей з підвищеним вмістом кремнію.

Зростання злитків киплячої сталі. За недостатньої окисленості металу і млявого кипіння в злитку залишається багато бульбашок, внаслідок чого зростає висота злитка, зменшується щільність головної частини та збільшується головний обріз під час прокатки.

Гомілка. За надмірної окисленості киплячої сталі кипіння в процесі заповнення виливниці йде дуже бурхливо, бульбашки CO сильно спінують метал. Після закінчення інтенсивного кипіння (при хімічному закупорюванні після введення алюмінію) сталь осідає, залишаючи на стінках виливниці застиглу кірку (гомілку).

Несуцільності в тілі злитків. До дефектів несущільності в тілі злитків (заготовок) належать: осьова рихлість або осьова пористість (рис. 2.13), флокени (рис. 2.14), розшарування, структурна неоднорідність, внутрішні тріщини.

Осьова рихлість (осьова пористість). У верхній осьовій частині злитків спокійної сталі виявляються скупчення дрібних усадкових пустот, які називаються осьовою рихлістю або пористістю. Під час кристалізації злитка осьова зона незатверділого металу весь час звужується і в окремих місцях відбувається зрощення кристалів, що ростуть з протилежних боків цієї зони. Під зрощеними кристалами затвердіння йде без доступу рідкого металу зверху з прибуткової частини злитка і тому в цих місцях утворюються дрібні усадочні порожнечі. Характерна для вуглецевих марок сталі з широким інтервалом кристалізації і підвищеним вмістом Cr . Під час прокатки за великих ступенів деформації, як правило, усувається, але в деяких випадках може призвести до появи при прошиванні внутрішніх плін.

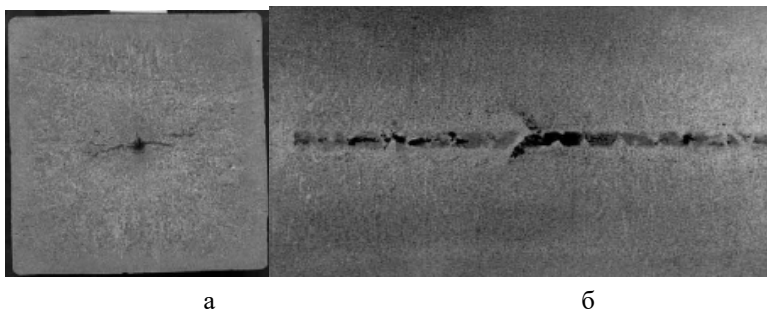


Рис. 2.13. Центральна пористість: а – у поперечному перерізі;
б – у поздовжньому перерізі

Основними причинами утворення осьової пористості є: недотримання температурно-швидкісного режиму розливання, високий вміст шкідливих домішок, незадовільний режим вторинного охолодження.

Розшарування. Розшаруванням називається порушення суцільності металу в осьовій частині злитка в разі неправильного відрізання головної частини на блюмінгу. Усадочні дефекти, що залишилися на здоровій частині блюма, під час прокатки розкриваються, і зливок розшаровується на дві частини в різні боки. Кількість головного обрізу для кожного типу злитків визначається експериментальним шляхом на основі накопичення фактичного статистичного матеріалу. Результат за статистикою справедливий зазвичай для 95 % злитків. Близько 5 % злитків можуть містити дефекти усадочної раковини, які можуть призвести до утворення розшарувань. За великого обсягу металу, що прокатується, іноді вигідніше забракувати такі зливки, ніж збільшувати норму обрізу головної частини для всіх злитків.

У сучасних сталеплавильних цехах дедалі ширше впроваджуються комплексні методи боротьби одразу з кількома видами дефектів сталеплавильного походження. До них слід віднести розливання металу під синтетичними шлаками, захист струменя інертними газами або вакуумування струменя під час розливання. Під час безперервного розливання електромагнітне перемішування металу сприяє зниженню утворення тріщин, зменшує пористість і утворення газових бульбашок, одночасно підвищуючи пластичність металу під час прокатки. Застосовується очищення металу шляхом переплаву його методами ЕШП (електрошлакового переплаву) або ВДП (вакуумно-дугового переплаву).

Флокени. Флокени утворюються в сталеплавильному виробництві, проте проявляються і запобігаються в прокатному цеху. Причиною їх утворення є водень, розчинність якого різко знижується при зниженні температури металу. У рідкому металі водню може бути досить багато, потім під час кристалізації він виділяється і накопичується в різних мікропорах. Тут він легко з'єднується з вуглецем у сталі, утворюючи метан CH_4 . Тиск газу в мікропорі різко зростає, оскільки метан займає більший об'єм, ніж водень, розмір мікропор зростає. Цей процес протікає також під час гарячої прокатки та подальшого охолодження металу. У готовому прокаті флокени являють собою дрібні внутрішні тріщини, які ніколи не виходять на

поверхню, мають у зламі округлу форму і світлу неокислену поверхню. Флокени особливо небезпечні при циклічному навантаженні деталей, виготовлених з цього металу, коли ці дрібні тріщинки з'єднуються між собою в суцільні тріщини.

На утворення флокенів впливає вміст водню в атмосфері плавильної печі. Вони виникають тоді, коли вміст водню перевищує 2 см^2 на 100 г твердої сталі. Крім того, у сталі має бути досить великий вміст вуглецю. У низьковуглецевих нелегованих сталях, а також у сталях аустенітного, феритного, аустенітно-феритного і напівферитного класів флокени не утворюються ніколи. Найчастіше флокени утворюються в хромистих, хромонікелевих, хромокремнистих, хромонікельвольфрамових, шарикопідшипникових і подібних сталях. Часто з'являються вони в сталях мартенситного, бейнітного, трооститного (зносостійкого) типу, в легованих сталях перлітного класу. Середньовуглецеві та високовуглецеві конструкційні сталі також схильні до флокеноутворення.

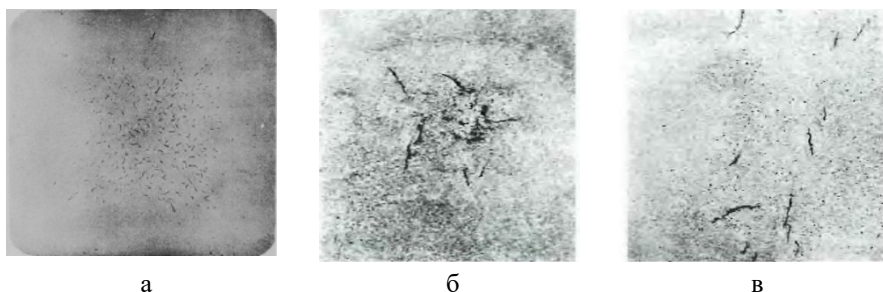


Рис. 2.14. Флокени в поперечному перерізі литої заготовки (а) і готовому прокаті (б, в)

Основними способами боротьби з флокенами є зменшення вмісту водню в сталі, наприклад шляхом вакуумування струменя під час розливання і забезпечення умов для вільного виділення водню з металу під час його охолодження. Після прокатки флокеночутливі сталі піддаються спеціальній антифлокенній обробці. Найефективніше водень видаляється з металу за температур $650 \dots 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (для легованих конструкційних сталей), тому за цих температур метал дуже повільно охолоджують в опалювальних печах або

колодязях. Чим менший переріз прокату, тим менше він уражений флокенами, тому, як правило, антифлокенну обробку проводять на заготовці, а не на готовому сортовому прокаті. Великосортові профілі на кшталт рейок та ін., одержувані зі злитків, також потребують антифлокенної обробки.

Основними причинами утворення флокенів у злитках (литих заготовках) є: підвищений вміст водню в сталі (понад 3 ppm), високий вміст елементів, що збільшують вміст водню в залізі (*Mo, Ni, W, Mn, Co*), і тих, що знижують температуру аустеніту під час охолодження (*C, Mo, Ni, Si, W, B, Cr, Mn*), недостатньо просушене футерування проміжного ковша.

До внутрішніх дефектів також належать структурна неоднорідність, хімічна мікро- і макронеоднорідність, неоднорідність хімічного складу за висотою злитка, смугаста неоднорідність (лікваційні полоси), позосева неоднорідність, осьова хімічна неоднорідність, фізична неоднорідність, осьова пористість, внутрішні тріщини, світлий контур і лікваційний квадрат [22].

Структурна неоднорідність. У безперервних злитків кіркова дрібнозерниста зона, як правило, товща, величина зони стовпчастих кристалів (за одного й того самого перерізу і температури розливання) більша, а зона рівноосних кристалів значно менша, ніж у злитків, відлитих у виливниці. Кристали стовпчастої зони безперервного злитка тонші, довші, більш щільно упаковані, що пов'язано з більшою інтенсивністю охолодження. Співвідношення розмірів структурних зон безперервного злитка залежить від хімічного складу сталі, поперечного перерізу і технологічних факторів розливання (температури, швидкості, режиму охолодження) [25].

Метал у зоні транскристалів має знижену пластичність (особливо знижується ударна в'язкість), тому бажано отримувати структуру з обмеженою стовпчастою і розвиненою зоною рівноосних кристалів, розсередженням усадкової пористості на відносно великий обсяг металу, що твердне. Дрібні пори з незначними слідами хімічної неоднорідності легко заварюються в процесі пластичної деформації (прокатки, кування). Необхідно в період затвердіння глибинної зони сповільнити відведення теплоти від злитка (тобто зменшити градієнт температури в оболонці, що кристалізується), або вплинути на затвердіння мікролегкуванням, введенням

мікрохолодильників, ультразвуком, перемішуванням електромагнітним полем тощо. Ці способи можуть розширити зону твердорідкого стану, збільшити кількість активних частинок, здатних виконувати роль зародків нових кристалів, зменшити температурний градієнт, зняти теплоту перегріву і частково кристалізації.

Дендритна хімічна неоднорідність. Неоднорідність у вмісті хімічних елементів за віссю дендрита і на його периферії визначають за співвідношенням вмісту цього елемента на осі дендрита і в міждендритних ділянках: чим більше це співвідношення, тим більший ступінь неоднорідності.

Ступінь дендритної неоднорідності легувальних елементів у зливку, розлитому у виливницю, значно вищий, ніж у безперервно литому, що помітно навіть поблизу поверхневої зони. У міру віддалення від поверхні ця різниця збільшується. У центрі ступінь дендритної неоднорідності злитка, розлитого у виливницю, на 30 % вищий, ніж безперервно литого.

Різниця в ступені дендритної неоднорідності пояснюється неоднаковою швидкістю затвердіння і дисперсністю дендритної будови. Збільшення ступеня неоднорідності викликане підвищенням концентрації елемента в міжосьових ділянках. Вміст легувальних елементів в осях дендритів практично однаковий і не залежить від способу розливання, що свідчить про сталість температури кристалізації осьових ділянок дендритів.

Транскристалізація – розвинена стовпчаста структура заготовки (рис. 2.15). Вона знижує механічні властивості сталі.



Рис. 2.15. Розвинена стовпчаста структура литої заготовки

Основними причинами транскристалізації є порушення технології розкислення і модифікування сталі, а також порушення теплового режиму розливання. Може бути усунена додатковою температурно-деформаційною обробкою.

Хімічна неоднорідність. Безперервний зливоч має порівняно невеликий перетин. Швидкість затвердіння його вища, а час кристалізації менший, ніж у злитка, розлитого у виливницю, тому зональна неоднорідність на ділянці від поверхні до осі не отримує значного розвитку.

Під час розливання плавки холодної і погано розкисленої сталі, а також у разі потрапляння вологи з будь-якими матеріалами виникає точкова і плямиста неоднорідність.

Точкова неоднорідність виявляється на поперечних темплетях у вигляді розкиданих по їхньому полю дрібних чорних крапок, що являють собою скупчення неметалевих включень (головним чином сульфідів). Точкова неоднорідність може знижувати пластичні властивості сталі в поперечному перерізі.

Плямиста неоднорідність виявляється у вигляді плям різного розміру. У цих місцях під мікроскопом видно скупчення сульфідних включень. Плямиста неоднорідність знижує відносне звуження й ударну в'язкість у поперечному перерізі та не впливає на механічні характеристики в поздовжньому.

Правильний метод розкислення, присадка алюмінію в необхідній кількості, усунення потрапляння в метал вологи запобігають появі неоднорідності.

Неоднорідність хімічного складу по висоті безперервно литого злитка. Тривалість безперервного розливання сталі однієї плавки з великих ковшів досягає двох і більше годин. Протягом цього періоду в ковші можуть розвиватися реакції між металом, шлаком і футеруванням, внаслідок чого змінюється склад сталі і виникає хімічна неоднорідність по висоті злитка. Особливо небажаним є відновлення фосфору.

Смушковата неоднорідність (ліквацийні смуги). Виявляється на сірчаних відбитках у вигляді ліній, перпендикулярних до грані злитка. Припускають, що ліквацийні смуги – це наслідок тріщин, що утворюються в металі найчастіше вздовж дендритних осей першого порядку стовпчастої

зони. У тріщини під дією розрідження засмоктується збагачений домішками рідкий метал, що знаходиться біля фронту затвердіння. Для усунення цього виду неоднорідності слід запобігати деформаціям, що призводять до тріщин (не обжимати зливки з рідкою серцевиною зливки з критичною величиною деформації, уникати утворення термічних напруг, більших за припустимі, та ін.).

Позаосьова неоднорідність. У безперервних злитках такий вид неоднорідності розвинений слабо. Попереджають цей вид неоднорідності присадкою рідкоземельних елементів, що спричиняє виділення сульфідів на ранній стадії кристалізації та дає змогу їх фіксувати в структурі у вигляді тугоплавких високодисперсних сполук.

Осьова хімічна (а також фізична) неоднорідність. Зазвичай утворюється під час збагачення (внаслідок ліквації) внутрішніх зон домішками і усадки металу в замкнутому об'ємі в процесі затвердіння осьової зони. Неоднорідність дещо зменшується з підвищенням температури розливання.

Світлий контур і лікваційний квадрат (рис. 2.16) у перерізі литої заготовки утворюється внаслідок високого вмісту шкідливих домішок, високої інтенсивності перемішування рідкого металу електромагнітною мішалкою, підвищеної температури сталі, вібрації і струсу кристалізатора під час гойдання. Цей дефект не усувається і знижує механічні властивості прокату.

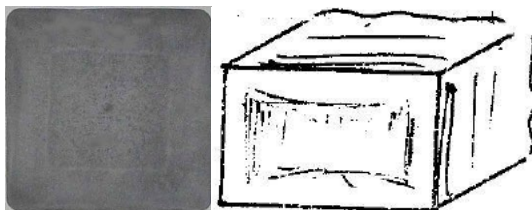


Рис. 2.16. Світлий контур і лікваційний квадрат

Глибина рідкої фази, в якій утворюється осьова зона, досягає значних розмірів. При цьому в процесі затвердіння вздовж рідкої лунки розвиваються інтенсивні конвективні потоки, що підсилюють осьову ліквацію в

безперервнолитому злитку. Витягнута порівняно вузька лунка і конвективні потоки зумовлюють утворення в осьовій зоні пористості та ліквацийних плям.

Переміщення рідини в процесі затвердіння призводить до різкого перерозподілу домішок (дифузія атомів і фільтраційне масоперенесення багаторазово посилюються конвекцією). Унаслідок цього ними істотно збагачуються об'єми металу, які тверднуть останніми. Зі збільшенням концентрації домішок збагачена ними рідина, незважаючи на зниження температури, стає рухомішою і за певних концентрацій може вільно переміщатися серед розгалужених кристалів двофазної зони. Така рідина, збагачена лікватами, проникає крізь зімкнуті дендрити, заповнюючи порожнечі, що утворилися в металі, який кристалізується. У підсумку утворюються ліквацийні ділянки. Якщо в злитку, що кристалізується, основний розвиток отримує зона твердорідкого стану з переважанням твердої фази, то при цьому перебіг фільтраційних і дифузійних процесів буде ослаблено.

У цьому разі по всьому об'єму злитка утворюється мікронеоднорідність у локальних об'ємах, яку згодом можна практично повністю ліквідувати в процесі нагріву злитка перед деформацією і самої деформації. У зв'язку з цим усі заходи, що сприяють поліпшенню макроструктури безперервнолитого злитка, спрямовані на створення широкої двофазної зони з переважанням твердої фази, де перебіг усадкових і ліквацийних явищ обмежений.

Основними дефектами макроструктури заготовок є: ліквацийні смуги і тріщини за перерізом; кутові тріщини; тріщини в осьовій зоні; центральна пористість; осьова ліквация; газові бульбашки; скупчення неметалевих і шлакових включень.

Внутрішні тріщини за перерізом безперервнолитой заготовки (перпендикулярні граням) (рис. 2.17) являють собою надриви, що розташовуються на міжосьових просторах кристалічної структури, збагаченої лікватами.

Ці тріщини кристалізаційні й утворюються на межі твердої та рідкої фаз в інтервалі температур, за яких метал має мінімальну пластичність і міцність.

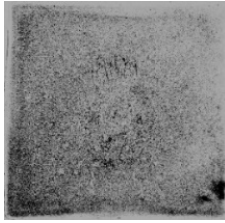


Рис. 2.17. Тріщини впродовж безперервнолітої заготовки

Це тріщини кристалізаційні й утворюються на межі твердої та рідкої фаз в інтервалі температур, за яких метал має мінімальну пластичність і міцність.

Тріщини можуть розташовуватися в кілька рядів по перетину заготовки. Одна з причин утворення таких тріщин – високі термічні напруження внаслідок незадовільного режиму охолодження. Так, тріщини за перерізом можуть виникати через підвищену швидкість розливання металу або надмірне відведення тепла в деяких секціях зони вторинного охолодження (ЗВО). За інтенсивного вторинного охолодження зовнішні шари злитка, що тверднуть, перешкоджають усадці внутрішніх, у яких розвиваються внутрішні напруження.

Кутові внутрішні тріщини, так само як і поверхневі, визначаються відхиленнями геометричної форми БЛЗ (ромбічність, опуклість граней). Ці тріщини розташовуються по стиках кристалів злитка проти його тупих кутів.

Осьові тріщини (рис. 2.18) утворюються під дією розтягувальних напружень, що виникають наприкінці затвердіння злитка.

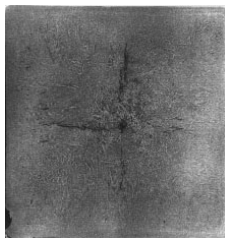


Рис. 2.18. Осьова тріщина в безперервнолітій заготовці

Напруження в цій зоні здебільшого зумовлені швидкістю розливання металу, режимом і роботою системи вторинного охолодження. До розвитку осьових тріщин може, наприклад, призвести підвищене обтиснення заготовок у правильній кліті.

Причини дефектів у структурі металу (осьова пористість, тріщини, бульбашки) різні: осьова пористість утворюється під час затвердіння металу в замкнутому об'ємі, куди не проникає рідка фаза; тріщини з'являються внаслідок деформацій, що перевищують допустимі; бульбашки зумовлені виділенням газів зі сталі, що кристалізується.

Усадочні процеси, що викликають фізичну неоднорідність, супроводжуються також хімічною неоднорідністю. Осьова пористість на поздовжньому темплеті має *V*-подібну форму, що пояснюється дією сил тяжіння на об'єми рідкої фази, які тверднуть по осі злитка в останню чергу. Вона може мати вигляд окремих усадкових раковин або бути зосередженою, коли роз'єднані порожнечі зливаються в ланцюжок уздовж вісі злитка, що чітко проявляється в злитках квадратного перетину. Причинами утворення осьової пористості є специфічні умови затвердіння безперервно литого злитка, пов'язані з утворенням глибокої лунки рідкого металу і протяжністю зони твердо-рідкого стану.

Розвинена зона твердо-рідкого стану сприяє появі трьохзонної структури безперервного злитка і розосередженої осьової пористості, яка зазвичай заварюється під час гарячої пластичної деформації, забезпечуючи отримання необхідних механічних властивостей прокату.

Порівняно мала протяжність зони твердо-рідкого стану призводить до утворення двозонної структури злитка і концентрованої осьової пористості, яка під час гарячої пластичної деформації не завжди заварюється.

Внутрішні тріщини зазвичай утворюються за неправильного режиму вторинного охолодження всього або частини периметра злитка. Імовірність утворення внутрішніх тріщин зростає зі збільшенням концентрації деяких легувальних елементів (наприклад, хрому, сірки і фосфору). Тріщини можуть бути виявлені на поперечних темплетях злитків. За розташуванням розрізняють такі види тріщин: перпендикулярні вузьким граням, перпендикулярні широким граням (розташовані, як правило, по ужимах і ближче до вузьких граней), спрямовані до кутів і розташовані на стиках

кристалів, які ростуть від широких і вузьких граней (обумовлені ромбічністю злитка і розташовуються проти тупих кутів), тріщини, що розташовуються спочатку перпендикулярно широкій грані, а потім спрямовані по стику кристалів (по бісектрисі кута), осьові, розташовані в районі зустрічі фронтів затвердіння (рис. 2.19).

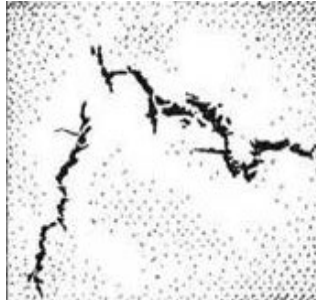


Рис. 2.19. Гарячі тріщини в центральній зоні злитка

Тріщини першого і другого видів утворюються під час різкого охолодження грані злитка або окремої ділянки поверхні, що призводить до прогину грані всередину і до виникнення в гарячих шарах біля фронту затвердіння неприпустимих напружень, що розтягують. Усуваються відпрацюванням технології вторинного охолодження.

Рівномірне охолодження злитка по периметру і зниження інтенсивності охолодження кутів дають змогу ліквідувати тріщини третього виду.

Тріщини четвертого виду є наслідком напружень, що діють уздовж суміжних граней, їх усувають так само, як тріщини першого і другого видів.

Тріщини п'ятого виду утворюються при розігріві зовнішніх шарів після змикання фронтів затвердіння. При цьому широкі грані прагнуть випучуватися, що спричиняє напруження по вісі злитка, які можуть призвести до появи осьових тріщин. Щоб такі напруження не виникали, зливкок у період затвердіння осьової зони до моменту її достатнього зміцнення слід охолоджувати з інтенсивністю, що не допускає зменшення перепаду температур між осьовою і поверхневою зонами.

Поперечні тріщини по складках, розташованих на широких гранях, не є кристалізаційними. Вони перетинають осі дендритів і орієнтовані по межах первинного зерна аустеніту, отже, виникають унаслідок термічних і структурних напружень. Це пов'язано з циклічною зміною температури поверхні злитка (охолодження - розігрів) в інтервалі 700...900°C. Цей дефект можна усунути, якщо виключити циклічність режиму вторинного охолодження заготовок.

2.3. Дефекти продукції прокатного виробництва

На прокатних станах різного типу отримують металопродукцію різної форми і призначення. Форма поперечного перерізу металопродукції називається профілем прокату. Сукупність форм і розмірів профілів, одержуваних на даному стані або групі станів, називається сортаментом. Залежно від профілю прокат поділяється на чотири основні групи: листовий, сортовий, трубний і спеціальний. Залежно від того, нагріта або холодна заготовка надходить у прокатні валки - гарячий і холодний прокат.

Листовий прокат зі сталі та кольорових металів підрозділяють на товстолистовий (4...60 мм), тонколистовий (0,2...4 мм) і фольга (менше 0,2 мм). Товстолистовий прокат отримують у гарячому стані, інші види листового прокату - у холодному стані.

Серед сортового прокату розрізняють:

- заготовки круглого, квадратного і прямокутного перерізу для кування і прокатки;
- прості сортові профілі (коло, квадрат, шестигранник);
- фасонні сортові профілі, які, своєю чергою, підрозділяються на профілі загального призначення (куточок, швелер, тавр, двутавр); профілі галузевого призначення (залізничні рейки, автомобільний обід); профілі спеціального призначення (профіль для ресор, напильків тощо).

Трубний прокат отримують на спеціальних трубопрокатних станах. Розрізняють безшовні гарячекатані труби діаметром 25...550 мм і зварні діаметром 5...2500 мм. Труби є продуктом вторинного переділу круглої і плоскої заготовки.

Як приклад можна навести сортамент прокатної продукції рейкобалкових станів, представлений сортовою сталлю, яка, своєю чергою, ділиться на просту і фасонну (рис. 2.20) [14].

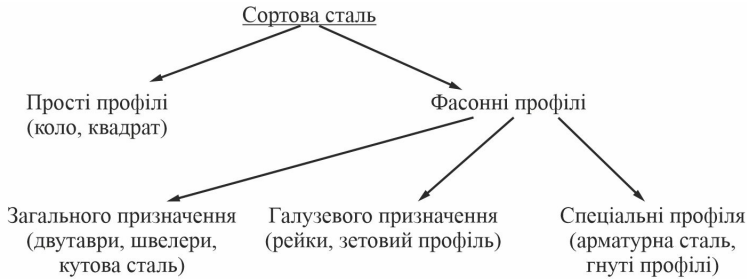


Рис. 2.20. Класифікація сортової сталі

Під час виробництва тих чи інших профілів керуються нормативною документацією (стандартами, технічними умовами, специфікаціями). При цьому виділяють такі види стандартів:

- стандарт на сортамент, у яких визначають розміри та площі поперечного перерізу, масу 1 погонного метра (п.м.), допустимі відхилення розмірів (див., наприклад [26, 27, 28]);
- стандарти на профіль, де, крім даних стандартів на сортамент, наведено довідкові величини (документи на розміри і форму, момент опору, момент інерції тощо), необхідні під час проєктування і виготовлення конструкцій (див., наприклад [26, 31]);
- стандарти на технічні умови, що містять вимоги, які висуваються до хімічного складу сталі, механічних властивостей, термічної обробки, мікро- і макроструктури та інших якісних показників прокатної продукції, а також містять правила приймання, методи випробування, маркування (див., наприклад [26, 31]).

Основні вимоги, що ставляться до готових профілів: точність геометричних розмірів, механічні властивості (міцність, твердість, момент інерції тощо), хімічний склад сталі, маса 1 п.м., якість поверхні, вимоги до допустимих або до відсутності внутрішніх і зовнішніх дефектів.

Укрупнено виробничий цикл виготовлення сортової металопродукції можна розділити на три етапи: нагрівання перед прокаткою, власне прокатку та охолодження. На кожному з цих етапів можливе утворення характерних дефектів металопродукції.

Рациональний режим нагрівання металу повинен забезпечити задоволення низки вимог, деякі з яких входять у протиріччя одна з одною. Насамперед необхідно забезпечити розв'язання технологічної задачі, тобто нагріти зливоч або заготовку до заданої кінцевої температури і довести різницю температур за перерізом і по довжині до регламентованої величини. Прагнення здійснити цю операцію якнайшвидше пов'язане з підвищенням швидкості нагріву, що тягне за собою збільшення перепаду температур за перерізом на початковій стадії нагріву, коли існує небезпека виникнення тріщин у металі внаслідок термічних напружень. Тривала витримка металу при високій температурі його поверхні, необхідна для досягнення заданої кінцевої рівномірності нагріву, призводить до посиленого окислення поверхні.

Усі ці фактори мають бути враховані під час вибору режиму нагрівання металу. Шляхи вирішення цих питань багато в чому визначаються тим, наскільки великою є різниця температур, що виникає за перерізом тіла і довжині, яке нагрівається.

Нагрівання металу перед прокаткою здійснюється з метою підвищення пластичності металу і зменшення його опору деформації.

Під час нагрівання холодного металу сумарна тривалість нагрівання складається з двох основних періодів:

1. Нагрівання в зоні низьких температур (температура до 700 °C). Призначення - запобігання утворенню тріщин, що особливо важливо для сталей, які мають малу теплопровідність і схильні до утворення тріщин.

Під час нагрівання металу в зоні низьких температур у ньому виникають напруження:

- термічні (внаслідок різниці температур по перетину металу);
- структурні (внаслідок структурних перетворень α -заліза в γ -залізо);
- залишкові (являють собою напруження, що виникають у злитках під час застигання після відливання).

Підсумовування цих напружень може призвести до утворення тріщин, розколювання злитків і утворення шпаківень.

Не чутливі до швидкості нагріву маловуглецеві сталі та профілі малого перерізу.

2. Нагрівання в зоні високих температур (температура понад 700°C). Основне завдання - забезпечити рівномірний нагрів металу по всьому перерізу до температури прокатки ($1100\ldots 1280^{\circ}\text{C}$). При цьому, з метою зменшення окалиноутворення метал нагрівають із максимально можливою швидкістю.

Під час прокатки недогрітих (усередині) заготовок можуть виникнути внутрішні розриви в металі, можливе велике зношування і поломка валків. У разі нерівномірного (однобокого) нагрівання можливе утворення згортань під час прокатки.

Під час нагрівання металу в зоні високих температур одночасно протікають процеси окалиноутворення і знеуглецювання. Обидва ці процеси у звичайних умовах нагріву неминучі, хоча й небажані, оскільки окалиноутворення призводить до втрат металу, а знеуглецювання погіршує якість металу.

За високих температур може статися також перегрів і перепал металу, що призводять до утворення специфічних дефектів.

Розглянемо детальніше явища окалиноутворення, знеуглецювання, перегрів і перепал, які можливі в процесі нагрівання металу.

Окалиноутворення. Угар металу, залежно від типу нагрівальної печі, при нормальній роботі становить $1,5\ldots 4\%$ від маси металу. Окалина – це прямі втрати придатного металу. Крім того, під час прокатки вона вдавлюється в метал, погіршуючи якість поверхні готового прокату і збільшуючи знос валків. Склад шару окалини наведено на рис. 2.21.

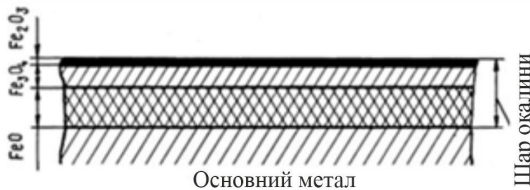
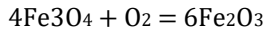
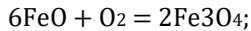
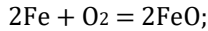


Рис. 2.21. Склад шару окалини

Утворення окалини відбувається під час взаємодії поверхневих шарів металу з киснем повітря, що подається для горіння палива:



На утворення окалини впливають такі чинники:

- температура нагріву. Енергійно протікає при 900...1000 °C і різко збільшується при температурі понад 1250 °C, оскільки окалина починає оплаватися;

- тривалість перебування металу за високих температур. Що більший час, то більше утворюється окалини. З плином часу швидкість окалиноутворення зменшується внаслідок потовщення оксидної плівки;

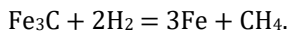
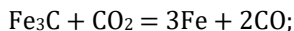
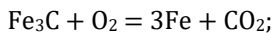
- швидкість нагріву. З підвищенням швидкості нагріву шари металу зменшуються;

- пічна атмосфера. При зниженні коефіцієнта витрати повітря з 1,1...1,15 до 0,9...0,95 шари металу скорочуються на 25...30 %;

- наявність легувальних елементів. Наявність у сталі *Cr*, *Ni*, *Al* і *Si* викликає зменшення окалиноутворення.

Зневуглицювання – зменшення вмісту вуглецю в поверхневому шарі металу.

Зневуглицювання відбувається під час взаємодії пічних газів з вуглицем сталі, що перебуває у твердому розчині або у вигляді цементиту (Fe_3C).



На зневуглицювання впливають ті самі чинники, що й на окалиноутворення.

Внаслідок зневуглицювання можливе утворення тріщин через велику різницю в коефіцієнтах температурного розширення зневуглицьованого і нормального шарів металу [14].

Перегрів і перепал. **Перегрівом** називають явище, коли під час нагрівання металу відбувається зростання зерен і вони настільки

укрупнюються, що зв'язок між ними послаблюється, і механічні властивості сталі погіршуються.

Перепал – це окислення зерен за температур, близьких до точки плавлення складових сталі. У результаті зв'язок між зернами настільки послаблюється, що метал під час прокатки розвалюється на частини. Що вищий вміст вуглецю в сталі, то за нижчої температури відбувається перепал.

Явище перегріву можна виправити повторним нагріванням металу або його термообробкою. Перепал металу невилправний і метал іде на переплавлення.

Обидва ці явища найчастіше виникають у разі вимушеної затримки металу в печі внаслідок аварійних ситуацій на стані або інших ділянках. У цьому випадку для запобігання явищам перегріву і перепалу знижують температуру печі та зменшують кількість повітря, що подається. Методичні печі з крокуючими балками (подом) також мають можливість зворотної видачі заготовок через вікно завантаження на випадок тривалих аварій.

Основна маса металу, що прокатується в гарячому стані, охолоджується на холодильниках або на повітрі в штабелях. Однак деякі середньо- і високовуглецеві, низько- і високолеговані сталі та сплави вимагають після гарячої прокатки регульованого охолодження, головним чином уповільненого. Це викликано необхідністю вберегти прокат від утворення поверхневих і внутрішніх тріщин, а також для того, щоб зняти залишкові напруження і отримати необхідну структуру і механічні властивості металу. Залежно від складу, пропонованих вимог, схильності до утворення вад, пов'язаних з охолодженням, сталь після прокатки охолоджують за різними режимами.

Умови охолодження прокату залежать від способу виплавлення і розливання сталі, підготовки вихідних злитків до деформації, від погодних умов, схеми і ступеня обтиснень, температури металу в кінці деформації. Наприклад, деякі сталі, що охолоджуються на одному заводі на повітрі, на іншому охолоджуються в колодязях уповільненого охолодження або піддаються ізотермічному відпалу.

Під час охолодження після гарячої прокатки в сталі можуть утворюватися дефекти у вигляді зовнішніх і внутрішніх тріщин - флокенів.

Поверхневі тріщини зазвичай видно неозброєним оком і вони бувають різної довжини. Тріщини на прокаті частіше утворюються, коли метал уже охолов, і пов'язані з його охолодженням. Дуже часто такі «холодні» тріщини утворюються в металі не одразу після його охолодження, а через певний час – через кілька годин і навіть кілька днів при його вилежуванні на складі.

Дефекти прокату можна розділити на такі групи: відхилення розмірів; дефекти поверхні, відхилення механічних властивостей. Нижче розглянуто основні види дефектів зазначених груп.

Розмірні дефекти – це будь-які відхилення від заданих розмірних (геометричних) характеристик прокатних виробів. До спотворень геометричної форми розкату в поздовжньому напрямку відносять різнотовщинність, хвилястість, коробоватість, серповидність тощо. У поперечному напрямку – це різнотовщинність, овальність кола, ромбічність квадрата тощо.

Поява зазначених дефектів є наслідком недостатнього контролю металовиробів у процесі прокатки, прокатки на вироблених валках, неправильного підбору профілювання валків або режиму обтиснень.

Основні дефекти поверхні листів і сортового прокату можна умовно розділити на три групи: дефекти поверхні, обумовлені якістю злитка і литої заготовки, дефекти поверхні, що утворилися в процесі деформації, дефекти поверхні, що утворилися під час операцій обробки.

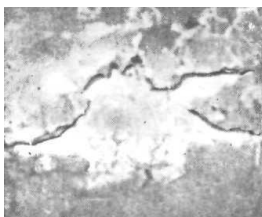
До першої групи поверхневих дефектів можна віднести: розкатані підкіркові бульбашки і розірвані (розкриті) газові бульбашки (рис. 2.22), завороти кірки на поверхні прокатоного металу і розкатані забруднення (рис. 2.23), волосовини (рис. 2.24), рванини (рис. 2.25).

Прокатні плени утворюються під час розкочування надривів поверхневих шарів, неметалевих включень та інших дефектів прокатного виробництва. Одна з головних причин утворення таких дефектів - неякісне фрезерування слябів (блємів).

Плени ливарного походження утворюються під час розкатування ливарних дефектів, таких як несущільності, раковини тощо.



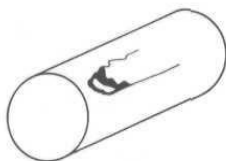
Розкатана газова
бульбашка



Розірвана газова бульбашка



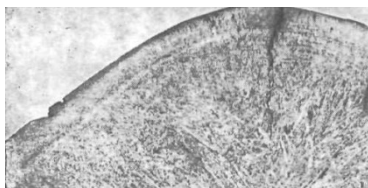
Рис. 2.22. Розкатаний і розірваний газові бульбашки



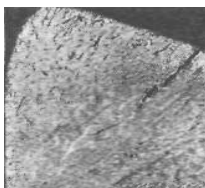
Завороти кірки на поверхні
прокату

Розкатані забруднення

Рис. 2.23. Завороти кірки та розкатані забруднення на поверхні прокату



а)



б)



в)

Рис. 2.24. Волосовини:

а, б – у місцях зачищення поверхні смуги зі сталі ШХ- 15;
в – поздовжній мікрошліф сталі 12Х18Н10Т)

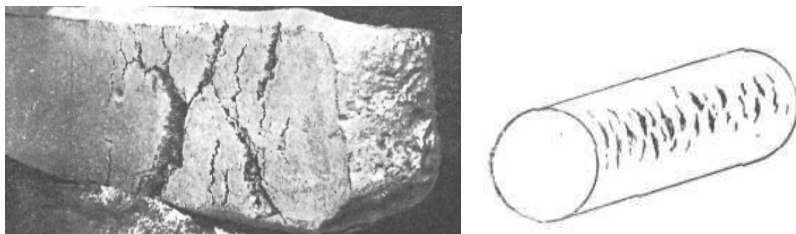


Рис. 2.25. Зливки із грубими рванинами після перших обтиснень під час прокату

Тріщини (рис. 2.26) можуть виникати через невідповідність пластичних властивостей металу за відповідних температурно-швидкісних умов обробки використаним обтисканням. Ці тріщини мають різну форму (поздовжні, косі, похилі, переривчасті та інші).

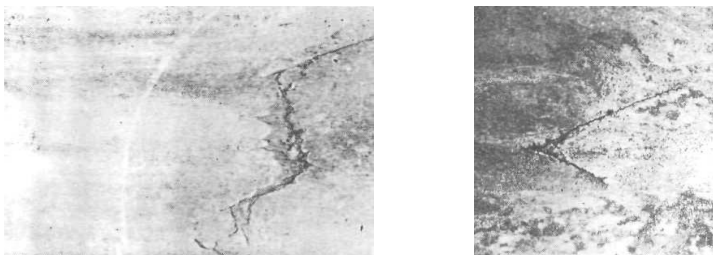


Рис. 2.26. Поперечна та коса тріщина на блюмі

Поздовжні тріщини зазвичай є наслідком дефектів поверхні валків обтискних клітей, грубого вирубання дефектів заготовки тощо, поперечні - наслідком підвищених обтисків. Однією з причин утворення тріщин є перенаклеп (рис. 2.27).

У деяких випадках під час прокатки листів із малопластичних сплавів, що піддаються глибокому зачищенню окремих дефектів, виникають наскрізні тріщини.

Відбитки від валків, роликів, закатування металу і шлаку становлять самостійну вельми поширену групу дефектів, усунення яких пов'язане з підвищенням культури виробництва.

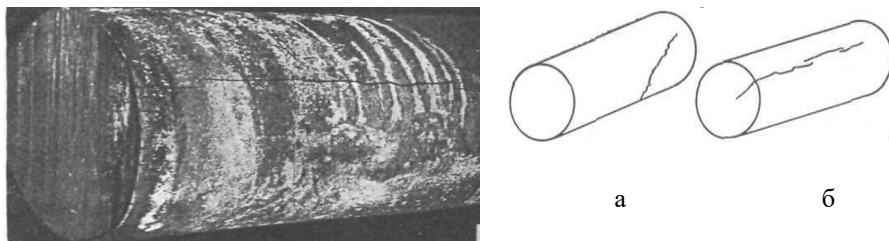


Рис. 2.27. Розкатані гарячі тріщини напруження:
а - одинична тріщина; б - поздовжня переривчаста тріщина

При порушенні температурних режимів нагріву і травлення листів відбувається підвищення вмісту водню в готовій продукції вище допустимої норми. Такий брак може бути усунутий вакуумним відпалом.

Порушення технологічних режимів прокатки, відпалу за наявності неоднорідності хімічного складу призводять до невідповідності рівня механічних властивостей готової продукції вимогам технічних умов. Найчастіше такий брак є остаточним і для його запобігання необхідні вибір раціональних технологічних режимів і суворе дотримання технології.

Одним із найнебезпечніших і важковиявних видів дефектів сортового прокату є внутрішні тріщини.

Внутрішні тріщини можуть з'являтися в результаті прискореного нагріву (охолодження) сталей зі зниженою теплопровідністю і пластичністю. Внутрішні напруження, що виникають через перепад температур і структурних перетворень, можуть перевищити міцність сталей з утворенням внутрішніх тріщин.

До основних дефектів прокату, які залежать тільки від технології та обладнання прокатних станів, відносять: risks (подряпини), wus (задири, лампаси), zakati (підрізи), ryabizna (відбитки прокатних валків), zmorshki, rakoviny, vдавлення.

Risks, podryapyny є результатом травмування поверхні розкату валковою арматурою, наварями на пропусках і проводках (рис. 2.28).

Вуса (задирки, лампаси) - результат переповнення калібру металом, неправильного налаштування валків.

Закат (підріз) являє собою поздовжню складку від закатування задирки, схожу за зовнішнім виглядом на тріщину. На відміну від тріщини закат розташований під гострим кутом до поверхні (рис. 2.29).

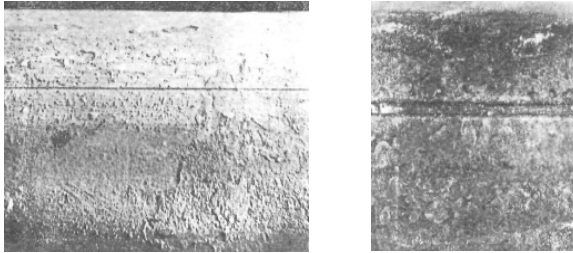


Рис. 2.28. Риски

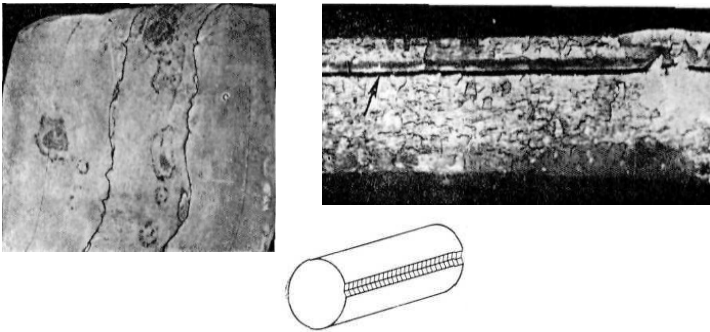


Рис. 2.29. Закатування (прикатаний підріз) на заготовці

2.4. Дефекти продукції ковальсько-штампувального виробництва

Дефекти, що виникають у поковках, можна умовно розділити на дефекти вихідного матеріалу, дефекти нагріву, дефекти власне процесу кування (штампування), дефекти оздоблення, зокрема термічної обробки, які для різних класів металевих виробів можуть якимось чином відрізнятися за своїми характеристиками [30].

Найпоширенішими дефектами, що призводять до браку поковок, є: дефекти вихідного матеріалу; дефекти, що виникають під час різання вихідного матеріалу на заготовки; дефекти від нагрівання і пластичної деформації.

У разі використання для виготовлення поковок литих або катаних заготовок, до основних дефектів вихідного матеріалу відносять: закати, плени, поверхневі риси, розшарування, флокени, альфовані шари, неметалеві включення (рис. 2.30).

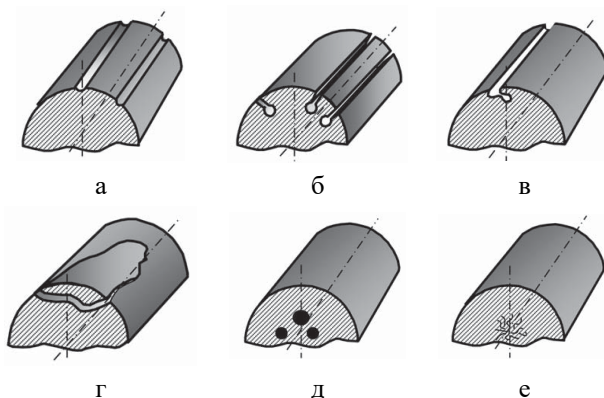


Рис. 2.30. Основні види дефектів вихідного матеріалу: а – риси; б – волосовини; в – закати; г – плени; д – чужорідні (неметалеві) включення; е – флокени

Риси, волосовини, закати і плени виникають під час прокатки металу внаслідок задирів і задирок на прокатних валках, через розкатування в довжину підкіркових газових бульбашок сталевих злитків, від неправильного калібрування або зношення струмків валків прокатних станів, прокатки злитків із застиглими на їхній поверхні бризками рідкого металу, прокатки наявних у злитку раковин або рихлостей.

Флокени являють собою скупчення в металі найдрібніших тріщин звивистої форми. Причиною утворення флокенів є насиченість злитків із високолегованих сталей воднем, який під час прискореного охолодження після кування або прокатки злитків розвиває в мікрооб'ємах металу тиск до

1800 МПа, що перевищує межу міцності сталі та спричиняє численні найдрібніші тріщини.

Поковки, отримані з металу з флокенами, схильні до розтріскування під час загартування. Заготовки, виготовлені з прокату з розшаруваннями, часто мають тріщини на ділянці переходу поковки в облой, в який перетікають об'єми металу з раковинами і рихлотами, що виявляється під час його обрізання. Поковки з флокенами і розшаруваннями - непоправний брак.

Альфований (газонасичений) шар на поверхні заготовки призводить до утворення сітки дрібних тріщин на поверхнях поковок, що виготовляються з титанових сплавів.

Неметалеві включення виявляють під час випробування готових виробів на герметичність, а також під час дослідження макроструктури поковок.

Основними дефектами під час поділу прутків на мірні заготовки (рис. 2.31) є: косий зріз, торцеві тріщини, грубий зріз або відкол із вириванням металу, задирок із викривленням кінця заготовки, затягування, неплоскостність (хвилястість або ступінчастість) торця, невідповідність розмірів або маси заготовки (коротка або довга заготовка).

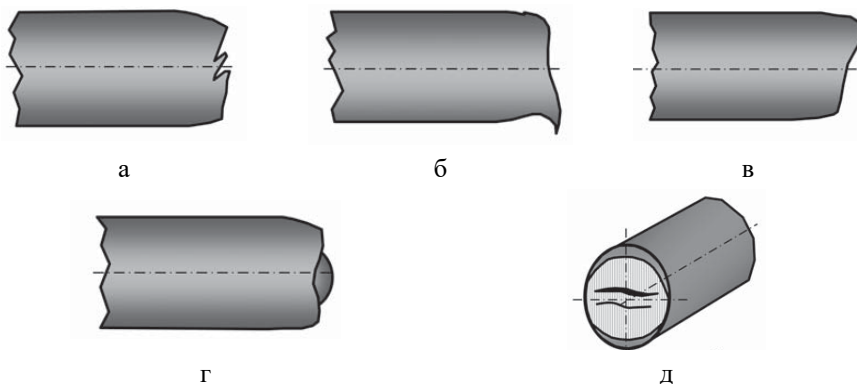


Рис. 2.31. Дефекти під час різання вихідних заготовок: а – виривки; б – задир з утяжкою; в – збільшений скіс торця; г – вириви, грубий зріз; д – торцеві тріщини, паралельні робочим крайкам ножів)

Правильний вибір зазорів між ножами, своєчасне їх заточування і заміна, забезпечення надійного упору і притискання заготовки під час різання, підігрів металу до необхідних температур дають змогу уникнути зазначених дефектів під час різання прутка на мірні заготовки.

Характерні дефекти поковок, пов'язані з незадовільним нагріванням заготовок: глибокі вм'ятини, внутрішні тріщини, грубозерниста (відманштеттова) структура, грубозернистий злам.

Глибокі вм'ятини - утворюються внаслідок вдавлювання в нагрітий метал поковок окалини, не видаленої з поверхні заготовок або бойків.

Внутрішні тріщини з'являються в заготовці під час кування внаслідок недогріву, тобто внаслідок надмірної швидкості нагріву і впливу напружень, викликаних різним ступенем лінійного розширення і неоднорідністю хімічного складу за перерізом, а також і під час кування внаслідок недостатньої витримки заготовки в нагрівальній печі та відсутності через цю причину необхідної пластичності металу для обробки його тиском.

Грубозерниста (відманштеттенова) структура зумовлена надмірним зростанням зерен у сталі та зниженням механічних властивостей, що відбувається внаслідок нагрівання заготовок до температур, які перевищують допустиму для цієї марки сталі, а також за умови надмірної тривалості нагріву до потрібних кувальних температур або закінчення кування за високих температур, що значно перевищують оптимальну (перегрівання). Перегрів характеризується наявністю грубозернистої так званої відманштеттенової структури. Перегріті поковки виправляють нормалізацією, відпалом або поліпшенням.

Грубозернистий злам - виникає в тому разі, якщо під час нагрівання заготовок відбулося окислення або оплавлення на краях зерен сталі внаслідок тривалого окислювального нагрівання за високих температур (1300...1350°C), тобто перепалювання. Перепалювання характеризується яскравим виділенням іскор з нагрітої до білого кольору заготовки, втратою нею пластичних властивостей і появою численних розривів під час кування з оголенням характерного, що нагадує гречану крупу, грубозернистого зламу. Поковки з перепалом виправленню не підлягають і можуть бути відправлені тільки в переплавлення.

Знеуглецьована поверхня – дефект, що спричиняється вигоранням (окисленням) вуглецю в поверхневих шарах поковки, за глибиною нерідко перевищує припуск на обробку.

Основні дефекти, що виникають під час пластичної деформації (кування і штампування): недостатній увів, вм'ятини, торцеві задирки, затискачі, увігнуті торці, зовнішні тріщини, рванини, внутрішні тріщини, свищі, розшарування, наклеп, відхилення за геометрією.

Торцеві задири виникають за недбалого рубання прибуткової і донної частин злитка або під час гарячого рубання заготовок на частини. Торцеві задирки, що залишилися після рубки, підлягають видаленню, оскільки вони під час подальшого кування спричиняють утворення затискань (складок).

Затискання виникають у випадках застосування неправильних прийомів протягання і розгонки заготовки.

Увігнуті торці виникають на кінцях поковки внаслідок активного протягування заготовки з круглим поперечним перерізом, недостатнього прогрівання заготовки або малої маси падаючих частин молота, а також недостатньої довжини кінця, що відтягується.

Зовнішні тріщини або рванини є одним із найпоширеніших і найнебезпечніших дефектів поковок. Основні причини виникнення зовнішніх тріщин або рванин: низька температура кування; швидке охолодження, особливо легованої сталі; незадовільний нагрів заготовки, що спричиняє сильний перегрів або перепад поверхні, або використання сірчистого палива; неякісний вихідний зливоч або заготовка. Найсприйнятливіші до поверхневих рванин і тріщин під час кування - інструментальні швидкорізальні сталі та леговані малопластичні сталі деяких марок.

Процес кування здійснюється, як правило, в кілька проходів. У зв'язку з цим, тріщини, помічені в процесі кування конструкційної сталі після чергового проходу, щоб уникнути їхнього збільшення надалі, слід видаляти в гарячому (іноді в холодному) стані, навіть із застосуванням спеціального підігріву. У деяких випадках допускається в місцях можливого утворення тріщин залишати збільшений припуск на обробку.

Внутрішні розриви (свищі, розшарування) найчастіше виникають унаслідок неправильного ведення процесу кування.

Свищі в центральній зоні перерізу зазвичай мають форму хреста через розрив у напрямку діагоналей квадратного перерізу під час кування з великими подачами.

Свищі та внутрішні розриви не хрестоподібної форми можуть з'являтися під час обкатування круглої заготовки в плоских бойках.

Внутрішні тріщини, що мають вигляд розшарувань, спостерігаються за значного осаджування в плоских бойках, за великих розмірів контактних поверхонь і малої висоти осадженої поковки.

Для виявлення внутрішніх розривів, свищів і розшарувань найефективнішим є метод ультразвукової дефектоскопії.

Наклеп – стан поверхневих шарів поковки внаслідок закінчення кування за низької температури. Наклеп, не усунутий термообробкою, може призводити до підвищеного викривлення і навіть до поломок під час подальшого оброблення різанням.

Зсув осевої зони злитка відбувається від нерівномірного прогріву, нерівномірних обтиснень під час кантування навколо поздовжньої осі або від викривлення його вісі під час осаджування.

Недостатній уков – наявність у поковці великої кристалічної литої структури.

Вм'ятини – сліди недбалої роботи у вигляді ступінчастих переходів і вм'ятин від бойків, сліди від втиснутої в тіло поковки окалини.

Невитримані розміри - відхилення від заданих розмірів і допусків, збільшення або зменшення припусків і напусків, відхилення за довжиною, овальність, ексцентричність і перекіс отворів, завал радіусів отворів, маломірність фланців і виступів, відхилення кутових параметрів.

Невитримані показники механічних властивостей – відхилення від заданих нормативною документацією межі міцності, межі плинності, відносного подовження або стиснення, ударної в'язкості та твердості на зразках, відрізаних від поковок після того, як останні пройшли термічну обробку.

Основні дефекти, що виникають під час кування і штампування заготовок, умовно можна поділити на три групи: технологічні, конструктивні та виробничі.

До **технологічних дефектів** поковок належать:

- дефекти, викликані неправильно призначеними або виконаними термічними режимами нагріву та охолодження заготовок, а також термомеханічними режимами кування та штампування (температурою початку і кінця кування та штампування, ступенем деформації по переходах, швидкістю деформування тощо). Наслідком цього є різнозернистість матеріалу поковок, утворення тріщин у процесі кування та штампування або охолодження заготовок, надмірна окалина, збезвуглецьована поверхня заготовок, а також явища, пов'язані з перегрівом і перепалом металу;

- дефекти, пов'язані з неправильним призначенням припусків на оброблення різанням (чорнота, сліди заштампованої, а потім видаленої з поковки окалини абразивним зачищенням, глибина якої перевищує величину припуску на оброблення різанням тощо), що залишаються на поверхні остаточно оброблених деталей;

- дефекти, що виникають унаслідок неправильного вибору технологічного устаткування, наприклад, виникнення альфованого шару на заготовках із титанових сплавів та їхнє розтріскування під час кування та штампування, спричинене нагріванням заготовок у газовій печі замість електричної із захисною атмосферою, чи утворення тріщин під час штампування через невірне призначене деформуюче устаткування (молот замість кривошипного преса) тощо;

- дефекти, спричинені помилковим вибором схеми штампування, наприклад, утворення тріщин, спричинених застосуванням схеми відкритого штампування замість закритого під час штампування малопластичних важкодеформованих сплавів.

До конструктивних дефектів поковок належать:

- дефекти від розбіжності об'ємів попередніх і остаточної струмків штампів, неправильно обраних радіусів і ухилів, перемичок, форми і розмірів облойної канавки, невідповідності контуру остаточної штампувальної струмки і контуру обрізного штампа, неправильної конструкції обрізного штампа. Конструктивні дефекти проявляються у вигляді утворення на поковках заковів, затискачів, обрізання тіла поковки, великої задирки, викривлення поковки тощо.

Виробничі дефекти – це дефекти, що виникають у процесі виготовлення штампованих поковок. До них відносять:

- дефекти, пов'язані з неякісним налаштуванням обладнання та штампового оснащення: наприклад, зміщення однієї частини поковки відносно іншої за площиною роз'єму штампів, недоштампування, перештампування, нерівномірна товщина поковки, обрізування частини тіла поковки під час видалення облоя;

- дефекти, що вносяться внаслідок порушення технологічних режимів штампування: недогрів металу, що призводить під час штампування до утворення «холодних» тріщин; закупори, пов'язані з неправильним розміщенням заготовки в струмку штамп; незаповнення струмків штамп; наміни, вм'ятини та зім'ятиння ділянок поковки; заштампована окалина і т. д.

На рис. 2.32–2.36 наведено деякі види виробничих дефектів.

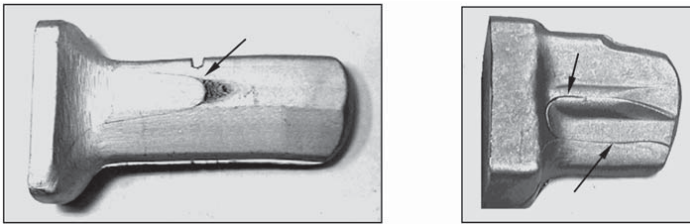


Рис. 2.32. Виробничий дефект у вигляді розшарувань металу під час штампування проміжної заготовки лопатки газотурбінного двигуна

Дефект, у вигляді розшарування металу в поверхневому шарі видавленої заготовки, найчастіше зустрічається під час штампування заготовок. Причиною дефекту може бути неоднорідне тертя матеріалу по матриці, підхолодження заготовки і, як наслідок, значна різниця швидкостей течії внутрішніх і зовнішніх шарів видавлюваного металу.

На рис. 2.33 наведено виробничі дефекти, викликані неправильним укладанням заготовки в штампувальний струмок, що призводять до зім'яття тіла поковки або незаповнення штампа. На рис. 2.34 представлені типові дефекти, пов'язані з неправильним налаштуванням устаткування під час прямого видавлювання заготовок: коротка видавлена частина (рис. 2.34, а) і недостатня висота потовщеної частини поковки (рис. 2.34, б).

На рис. 2.35 наведено виробничий дефект у вигляді задирки і глибоких рисок на поверхні видавленої заготовки. Причинами виникнення задирик є

налипання металу, що видавлюється, на робочі поверхні матриці, незадовільне змащування заготовок із включенням сторонніх твердих частинок, висока шорсткість радіусної робочої зони матриці.

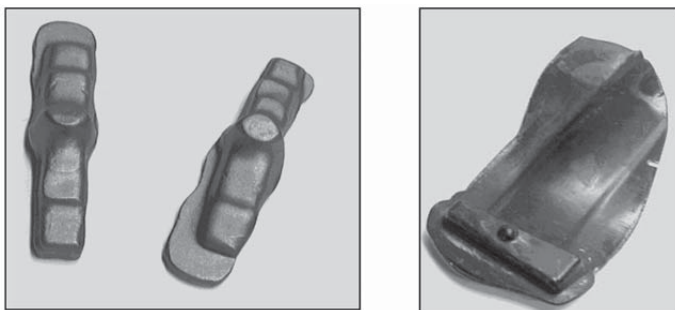
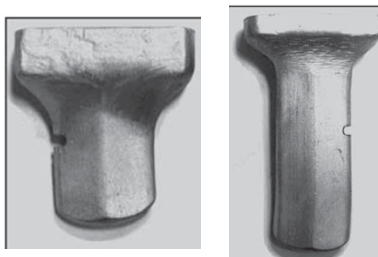


Рис. 2.33. Виробничі дефекти, пов'язані з неправильним укладанням заготовки в струмок штампа



а

б

Рис. 2.34. Дефекти видавлених заготовок, спричинені неправильним налаштуванням величини ходу пуансона при деформації заготовки лопатки

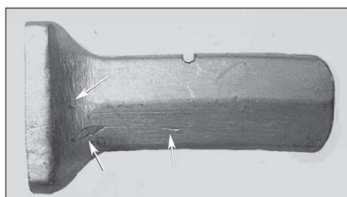


Рис. 2.35. Дефекти у вигляді задирів і рисок на поверхні видавленої заготовки

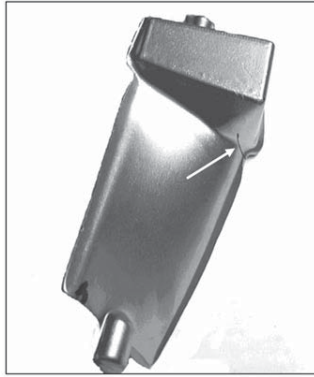


Рис. 2.36. Заготовка лопатки авіаційного двигуна з дефектом у вигляді закова (прострілу)

Крім перерахованих вище, для різних способів виготовлення поковок характерні свої специфічні дефекти.

Характерні дефекти, що виникають під час вільного кування:

- **глибокі вм'ятини на поверхні поковки від закованої окалини;**
- **тріщини на останніх проходах кування** через охолодження заготовки і, як наслідок, недостатню пластичність металу;
- **утворення глибокої знеуглецьованої зони** внаслідок порушення технології нагріву вихідних заготовок під кування;
- **увігнутість торців на поковках**, що виготовляються шляхом інтенсивного протягування заготовки круглого перерізу за недостатнього її нагрівання або малої маси падаючих частин молота;
- **зовнішні тріщини на поверхні поковки** при недотриманні температурного інтервалу кування;
- **утворення в поковках зон із грубозернистою структурою** внаслідок недостатнього проковування вихідної заготовки.

Характерні дефекти, що виникають під час штампування на молотах:

- **вм'ятини від заштампованої окалини.** Для запобігання дефекту необхідно ретельно видаляти окалину, для цього в штампах мають бути передбачені спеціальні переходи. Невеликі вм'ятини можна виправити перештампуванням у новому штампі.

- **забоїни** – механічні пошкодження поковок під час витягування їх зі штампа в разі застрягання, під час перекидання гарячих поковок або потрапляння сторонніх предметів у штампи.

- **лом-бій** – непоправний брак поковки, що дістала удар під час зміщення її з нижньої гравюри штампа під час штампування або обрізання задирки.

- **незаповнення фігури** – відхилення від заданих геометричних розмірів поковки внаслідок незаповнення чистового струмка штампа біля виступів, кутів, заокруглень і ребер. Причиною може бути недостатнє нагрівання заготовки або мале число ударів під час штампування, зношений або неправильно сконструйований штамп, а також невідповідний профіль заготовки.

- **недоштампування** – збільшення всіх розмірів заготовки в напрямку, перпендикулярному до площини роз'єму (рис. 2.37). Це відбувається внаслідок недостатніх температури нагріву заготовки, кількості ударів баби молота в остаточному струмку, у штампі з недостатньою виїмкою під задилок (облой), а також збільшеного профілю заготовки.

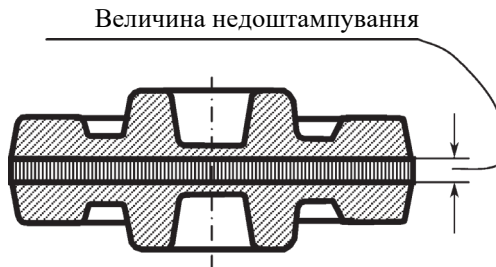


Рис. 2.37. Недоштампування поковки

- **перекос (зміщення)** - зміщення однієї половини поковки відносно іншої по площині роз'єму (рис. 2.38). Причиною цього можуть бути несправності обладнання (збільшений зазор у напрямних, вироблення площин штампотримача, неправильне налаштування тощо) або штампів (збиті замки, вироблення кріпильних площин, неврівноважений роз'єм штампів тощо), а також ненадійне встановлення і погане кріплення штампів;

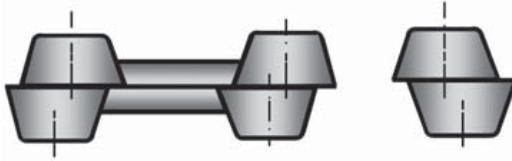


Рис. 2.38. Зсув (перекіс) частин поковки відносно площини розніму штампів

- **затиск** – заштампована складка внаслідок неправильної течії металу в чистовому струмку або заштамповування задирок, отриманих при неякісному виконанні перших переходів штампування. Затискання трапляються за ексцентричного укладання заготовок у струмок штампа, за надмірно різких ударів у протяжному або підкатному струмку, за неузгоджених розмірів чорнового й остаточного струмка, несправних штампів та обладнання. Незначні затискання видаляють зачищенням на абразивному крузі;

- **задири** (рис. 2.39) – незрізаний залишок облою в разі недбалого встановлення поковки в обрізний штамп, невідповідності розмірів матриці обрізного штампа або в разі зміщення поковки в обрізному штампі. Може бути видалений шляхом зачищення на наждачному крузі;

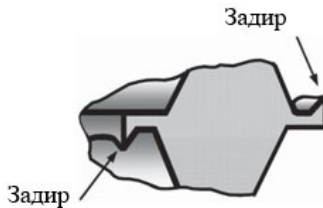


Рис. 2.39. Задири при куванні

- **кривизна** (рис. 2.40) – відхилення осей і площин поковки від їх правильного геометричного положення. Найчастіше вона виникає під час обрізання облою у поковок складної форми, з тонкими перетинами при великій довжині. Дефекти виникають через несправність або погану підгонку

контуру вирубного пуансона або неправильну конструкцію обрізного штампа. Усуваються холодним виправленням у штампі;

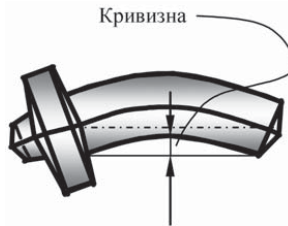


Рис. 2.40. Кривизна циліндричної частини поковки

- **ослаблення розміру** – нестача припуску на обробку різанням або зменшення (ослаблення) робочого перерізу деталі внаслідок штампування поковок із товстим шаром окалини, а також під час штампування із завищеною масою падаючих частин молота.

Основні види характерних дефектів, що трапляються у виробництві під час об'ємного штампування на кривошипних гарячештампувальних пресах (КГШП);

- **незаповнення штампа** матеріалом поковки – дефект, що виникає переважно в нижніх порожнинах чистового струмка штампа (рис. 2.41) унаслідок накопичення в них продуктів згоряння мастила і окалини; у разі глибоких виступів і ребер – через відсутність або неправильне розташування газовідвідних каналів у штампі; в кутах на тонких перерізах поковки (рис. 2.42), що примикають до облойного містка, унаслідок недостатнього опору витіканню металу в облой;

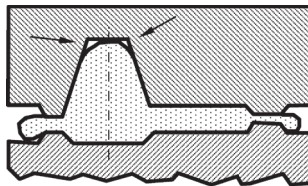


Рис. 2.41. Незаповнення глибокої порожнини штампа (внаслідок відсутності газовідвідних каналів)

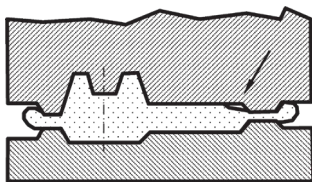


Рис. 2.42. Незаповнення струмка штампа

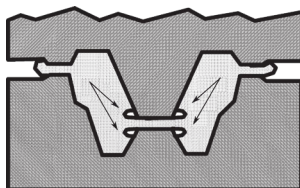


Рис. 2.43. Затиск у вигляді «прострілів»

- **викривлення поковки** – дефект, що з’являється під час застрягання поковок (особливо з розвиненою площею поверхні і тонкими перетинами) і подальшого витягання зі струмка штампа, що має малі ухили ($\sim 0^\circ 30' \dots 2^\circ$);

- **слід від штовхача штампа або преса** – груба вм’ятина або високий виступ при подовженому або укороченому штовхачі відповідно.

- **збільшений розмір** на ділянці переходу від більшого перерізу струмка штампа до меншого через інтенсивне локальне зношування штампа, викликане інтенсивною течією металу в цій зоні.

- **задир** - залишок облою, наслідок ускладнених умов обрізання, оскільки під час штампування на пресах товщина облою під обрізання в 1,5 рази більша, ніж на молотах, а крайка містка зношується швидше внаслідок інтенсивнішої течії металу в облой.

- **затиск** (див. рис. 2.43) – дефект, який спричинений неправильною конструкцією струмків штампа; під час штампування заготовки виникає «простріл» від витікання металу з перемички в тіло поковки, а також під час попарного штампування поковок. У місцях можливих затисків у штампах необхідно передбачати спеціальні виїмки (кишені) для затікання надлишку металу. Цьому дефекту запобігають іноді зниженням швидкості деформування.

Основні види характерних дефектів, що виникають під час штампування видавлюванням (рис. 2.44): прес-утяжина, простріл, відкол зовнішній, відкол внутрішній, тріщини на продеформованій частині заготовки, надири та надриви.

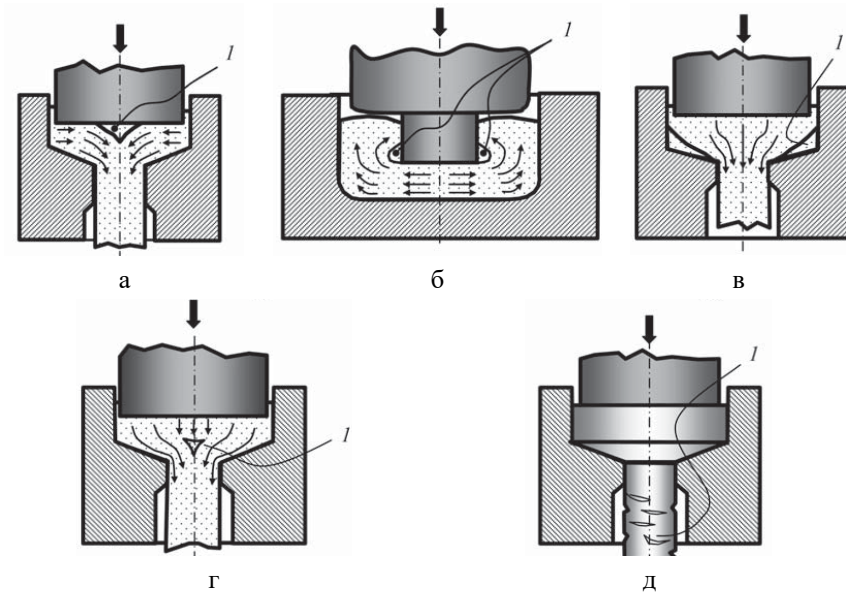


Рис. 2.44. Схематичне зображення дефектів, що утворюються під час видавлювання: а – прес-утяжина; б – простріл; в – скол зовнішній; г – скол внутрішній; д – тріщини

- **Прес-утяжина** утворюється внаслідок зміни напрямку течії шарів металу під пуансоном з горизонтального на вертикальний. Запобігають цьому дефекту зниженням швидкості деформування.

- **Простріл** – це вид затиску під час інтенсивної течії металу в тіло поковки під торцем пуансона при малому радіусі його кромки.

- **Скол зовнішній** утворюється внаслідок різних швидкостей і переміщень металу на межах мертвих зон за великих західних кутів матриць. Запобігають йому зниженням швидкості деформування і коригуванням робочого кута матриці.

- **Скол внутрішній** утворюється під час видавлювання дуже пластичного металу, коли коефіцієнт тертя малий, а кут матриці великий, що призводить до значного перевищення швидкості течії периферійних шарів видавлюваної заготовки над швидкістю течії серединних шарів металу заготовки.

- **Тріщини на продеформованій частині заготовки** виникають під час переходу матеріалу зі стану нерівномірного всебічного стиснення в приймачі в інший напружений стан на виході з матриці, що зумовлює появу в поверхневих шарах розтягувальних напружень унаслідок гальмівної дії сил тертя.

- **Надири і підриви** на поверхні поковки з'являються в разі значного тертя металу, що видавлюється, об стінки матриці. Запобігають їм поліруванням стінок матриці, підбором мастила і швидкості деформування.

Основні види дефектів під час штампування на горизонтально-кувальних машинах (ГКМ): кільцевий задир, зміщення висаджувальної частини, поздовжній задир, закупори, тріщини, втрата стійкості, незаповнення формувального струмка (рис. 2.45).

Можливі причини та методи усунення цих дефектів:

- **утворення кільцевого задиру під час формування в остаточному струмку** – є наслідок надлишку об'єму металу в висаджуваній частині вихідної (пруткової) заготовки, а також неправильне налаштування машини. Усувається зменшенням довжини висаджуваної частини заготовки;

- **зміщення висаджуваної частини заготовки відносно осі штампування**, одержуване внаслідок незадовільного настроювання ГКМ, позбуваються його шляхом підналаштування ГКМ за допомогою зміщення формувального струмка;

- **утворення поздовжньої задирки на затискуваній частині заготовки** через неправильне налаштування ГКМ або невірно спроектований затискний струмок. Усувається коригуванням налаштування ГКМ або коригуванням конструкції затискного струмка;

- **закови** в зоні переходу від висаджуваної частини заготовки до стрижневої, що з'являються в результаті неправильного оформлення перехідної зони на попередньому переході. Видаляються вони

доопрацюванням оснащення ГKM, що формує перехідну зону заготовки на попередньому переході;

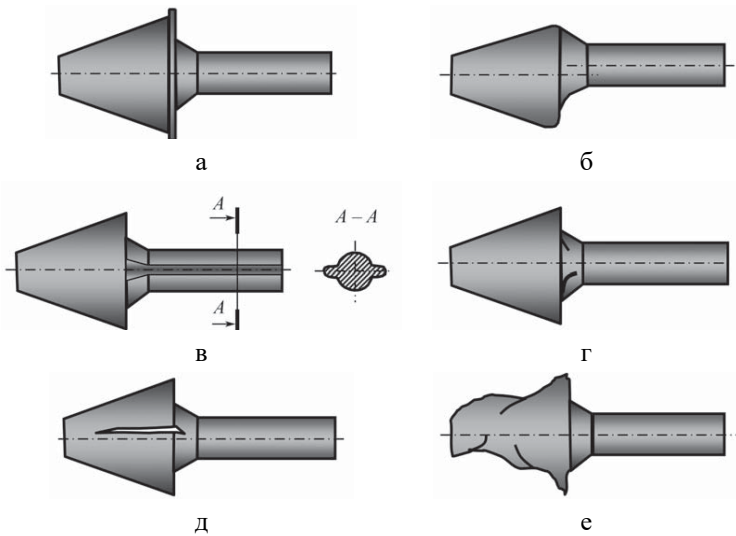


Рис. 2.45. Основні види дефектів під час штампування прутка в складальному струмку ГKM: а – торцевий задирок; б – зміщення осей складального струмка й осі пруткової заготовки; в – задирок за роз’ємом затискних матриць; г – закови в перехідній зоні заготовки; д – тріщина в зоні висаджування заготовки; е – втрата стійкості висаджуваної частини заготовки

- **тріщини на поковці**, що утворюються на формувальному переході внаслідок значного ступеня деформації матеріалу поковки. Для їх усунення вводять додатковий набірний перехід;

- **втрата стійкості висаджуваної частини заготовки**, що виникає за критичного відношення довжини висаджуваної частини заготовки до її діаметра. Ліквідується цей дефект введенням штампування заготовки в додатковому набірному струмку або зменшенням довжини висаджуваної частини вихідної заготовки;

- **незаповнення формувального струмка** внаслідок нестачі металу висаджуваної частини заготовки або збоїв налаштування ГKM. Усувається

збільшенням довжини висаджуваної частини вихідної заготовки або перевіркою налаштування ГKM.

Під час вальцювання довгомірних штучних заготовок у кувальних вальцях (наприклад, лопаток турбін) найчастіше трапляються такі дефекти: тріщини на початку вальцювання, утворення задирки уздовж осі заготовки за шириною вальцьованої частини, викривлення останньої відносно осі заготовки, відхилення довжини вальцьованої частини заготовки (рис. 2.46).

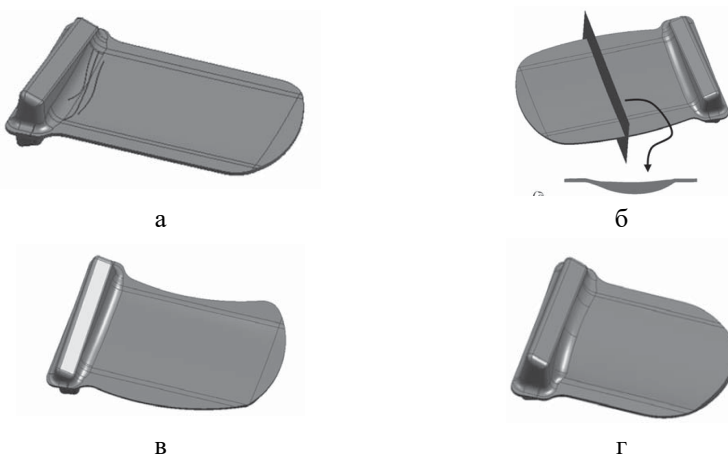


Рис. 2.46. Основні види дефектів під час вальцювання заготовок лопаток газотурбінних двигунів зі штучної заготовки: а – тріщини в радіусі переходу замка в перо; б – задирка по краях пера заготовки; в – «шаблеподібність» пера заготовки лопатки; г – коротка вальцьована частина пера заготовки

Можливі причини та способи усунення цих дефектів:

- **тріщини на початку вальцювання** утворюються при впровадженні кувальних секторів - штампів у вальцьовану заготовку внаслідок надмірно великого ступеня деформації заготовки (тобто обтиснення), а також у разі малих західних радіусів секторів – штампів. Дефект усувають доопрацюванням західних радіусів секторів – штампів у бік їх збільшення або зменшенням ступеня обтиснення заготовки. Задирка, розташована по краях вальцьованої частини заготовки уздовж її осі, з'являється в разі неправильного налаштування кувальних вальців або помилки під час

розрахунку заготовки. Ліквідують цей дефект розведенням валків кувальних вальців або перерахунком заготовки.

- **Викривлення вальцьованої частини заготовки** часто пов'язане з нерівномірним розподілом ступенів деформації в навколокромкових зонах вальцьованої заготовки, які призводять до різних швидкостей витікання металу по її крайках. Дефект характерний під час вальцювання довгомірних заготовок змінного поперечного перерізу з еквідистантним розподілом припуску на вихідній заготовці. Усувають його, забезпечуючи на заготовці пропорційний розподіл припуску перед вальцюванням, а також регулюючи коефіцієнт тертя (введенням змащення або його виключенням) по зонах вальцьованої заготовки.

- **Відхилення довжини вальцьованої частини заготовки** (коротка або надмірно подовжена вальцьована частина). Дефект пов'язаний з недостатнім (коротка вальцьована частина заготовки) або надмірним (подовжена) ступенем деформації (обтисненням) поперечних перерізів заготовки за товщиною. Ліквідується цей дефект шляхом регулювання відстані між кувальними вальцями.

2.5. Дефекти безшовних і зварних труб.

У нормативно-технічній документації на виробництво труб сформульовано такі основні вимоги до якості поверхні труб: «На поверхні труб не допускаються тріщини, пліви, раковини, рваніни, заходи, розкатані забруднення, розшарування або включення, що виходять на торець труби, риски, подрізи, відбитки, смугастість, вкатана окалина та інші лінійні й нелінійні недосконалості, що перевищують граничне мінусове відхилення за товщиною стінки, та дефекти з гострими краями і гострим дном. Зазначені дефекти мають бути видалені місцевим пологим зачищенням або суцільним шліфуванням, поліруванням, розточуванням або обточуванням, при цьому товщина стінки в місцях видалення дефектів не повинна виходити за мінімальні допустимі значення» [31]. Такі вимоги зафіксовані також практично в усіх стандартах на сталеві труби (EN, API, ASTM та інших).

Розглянемо значення термінів «лінійна і нелінійна недосконалість» [32, 33]:

- **лінійна недосконалість** – недосконалість, довжина якої значно перевищує її ширину, така як пліна, тріщина, задира, підріз, подряпина тощо;

- **нелінійна недосконалість** – недосконалість, довжина якої порівнянна з її шириною, така як раковина, вм'ятина;

Допускається вирубування і місцеве полого зачищення або шліфування, полірування, розточування або обточування зазначених вище дефектів (окрім тріщин) за умови, що глибина їхнього залягання не перевищує граничного мінусового відхилення за товщиною стінки. Заварювання, зачеканювання або закладення дефектних місць не допускається. Ділянка з дефектом може бути вирізана з урахуванням дотримання мінімальної довжини труби, або труба повинна бути забракована.

У стандартах ASTM і деяких інших передбачається, що трубу може бути забраковано за рішенням замовника навіть, якщо глибина дефектів вважається допустимою, але дефект зосереджений на великій площі.

Для зварних труб у нормативно-технічній документації також сформульовано низку загальних вимог до їхньої якості, що відображають специфіку цього виробництва та експлуатації [33, 34].

Зовнішній і внутрішній грат на електрозварювальних трубах, за виключенням труб малого діаметра, має бути видалений або розканий. На трубах, призначених для нанесення внутрішнього захисного покриття, висота залишку внутрішнього грата не повинна перевищувати 0,3 мм. У місцях зняття грата допускається потоншення стінки, що не виводить товщину стінки за допустимі мінімальні значення. Не допускається хвилястість залишку внутрішнього грата, подрібнена поверхня і доріжки від опорних лиж гратознімача глибиною понад 0,3 мм.

Посилення зварного шва труб діаметром 530 мм і вище повинно мати висоту, що не перевищує 2,5 мм, і плавно переходити до прилеглої поверхні труби.

На зовнішній поверхні труб допускаються окремі риси, рябизна та інші дефекти, завглибшки не більше 0,3 мм, крім неприпустимих дефектів, зумовлені способом виробництва. На внутрішній поверхні труб, призначених для нанесення зовнішнього захисного покриття, допускаються прикатані

риски, завглибшки, що не виводить товщину стінки за мінусові допустимі значення.

Допускаються вм'ятини на зовнішній поверхні труб зовнішнім діаметром до 219 мм глибиною не більше ніж 1,0 % від мінімального діаметра, труб зовнішнім діаметром 219 мм і більше – завглибшки не більше ніж 2,0 мм. Сліди зачищення дефектів і припустимі вм'ятини повинні мати плоске дно і плавний перехід до контуру поверхні труби.

Зовнішня і внутрішня поверхні труб не повинні мати забруднень (слідів масел, мастил, солей, технологічних рідин) і консерваційного покриття.

Дефекти безшовних і зварних труб можна умовно розділити на дефекти поверхні, відхилення за геометрією, внутрішні дефекти, відхилення за механічними характеристиками.

Далі детальніше розглянемо окремі види основних дефектів гарячедеформованих труб.

Плена сталеплавильна – дефект зовнішньої поверхні труби, що являє собою відшарування металу подовжньої орієнтації, з'єднане з виробом одним боком, завдовжки понад 1 метр, що значно перевищує коефіцієнт витягування злитка і БЛЗ для цього маршруту прокатки (рис. 2.47). Глибина дефекту по довжині – змінна. У поперечному перерізі порожнини плени розташовані під гострим кутом до поверхні. Форма порожнин залежить від вихідного дефекту і для кожного з них характерна. Наприклад, капсулоподібна – у розкатої газової бульбашки і розгалужена – у розкатаних гарячих тріщин. Дефект утворюється внаслідок розкатування пороку сталеплавильного походження катаною, кованою заготовкою.



Рис. 2.47. Плена сталеплавильна

Плена прокатна – дефект зовнішньої поверхні труби, що являє собою відшарування металу подовжньої орієнтації, з’єднане з виробом одним боком, завдовжки понад 1 метр, що значно перевищує коефіцієнт витягування для цього маршруту прокатки (рис. 2.48). Глибина дефекту за довжиною – приблизно однакова. У поперечному перерізі порожнини плени розташовані під кутом до поверхні і форма їх переважно шаблеподібна з гладкими стінками. Дефект утворюється внаслідок розкатування пороку поверхні трубної заготовки прокатного або ковальського походження. Цей дефект може бути груповим і одиничним.

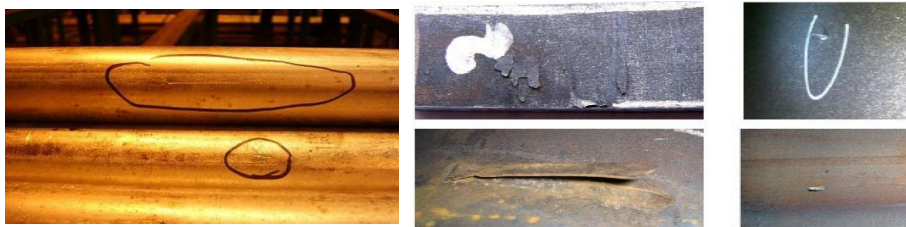


Рис. 2.48. Плена прокатна

Бунт – дефект зовнішньої поверхні труби, що є поздовжнім, прямолінійним виступом, розташованим найчастіше по всій довжині труби з одного або декількох боків, що утворюються під час пресування через часткове руйнування матричного кільця або навару (рис. 2.49).



Рис. 2.49. Бунт

Вдавлення – окремі місцеві заглиблення різної величини і форми, що утворилися від вдавнення під час прокатки/пресування металеві крихти або неметалевих частинок. Глибокі вдавнення можуть вивести стінку за мінусову

межу. Вдавлення має світле дно і пологі краї (рис. 2.50). У деяких випадках через потрапляння між поверхнею труби і прокатним інструментом дуже твердого тіла утворюється наскрізний отвір. Такий дефект називається – **продавленням**. Глибокі вдавлення супроводжуються виступом – напливом металу. В окремих випадках дефекти повторюють контур чужорідних частинок, що спричинили їх утворення, і супроводжуються ореолом. Поверхня дна заглиблення вкрита окалиною (рис. 2.50). Причиною утворення вдавнень може бути випадання вкатої або вдавненої в холодному стані чужорідної частинки під впливом деформаційних напружень.



Рис. 2.50. Вдавнення

Металургійні раковини – дефект поверхні у вигляді окремих заглиблень, іноді частково витягнутих уздовж напрямку прокатки, бувають двох видів: вдавнень і раковин – наколів. Дно заглиблень – нерівне і вкрите окалиною (рис. 2.51). Як правило, раковини є наслідком випадання вкатої окалини під впливом деформації.

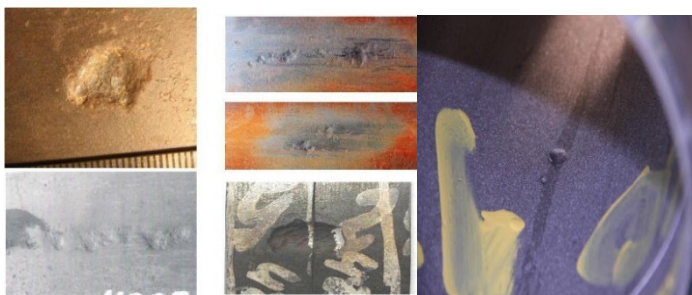


Рис. 2.51. Металургійні раковини від окалини

Риски – дефекти поверхні у вигляді прямолінійного протяжного капсулоподібного заглиблення без виступу крайок із заокругленим або плоским дном, глибина яких виводить товщину стінки труб за граничне мінусове відхилення (рис. 2.52).

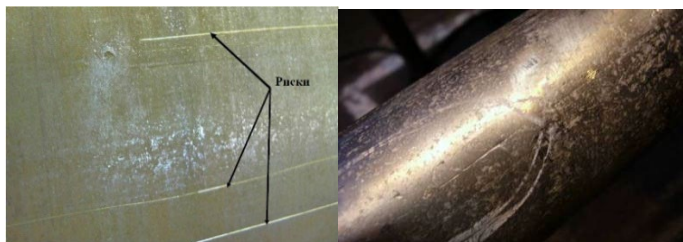


Рис. 2.52. Риски

Гвинтовий слід – дефект на зовнішній поверхні, що являє собою періодично повторювані виступи і западини (риски), розташовані за гвинтовою лінією, що утворюються під час правлення на правильних станах через неправильне налаштування або налипання металу на поверхню валків правильного стану (рис. 2. 53).



Рис. 2.53. Гвинтовий слід

Вм'ятина – дефект зовнішньої поверхні, що являє собою локальне полого заглиблення, без порушення суцільності металу труби, що утворилося від удару труби під час транспортування або під час оздоблення (рис. 2.54).



Рис. 2.54. Вм'ятини

Лінії ковзання – дефект зовнішньої поверхні, у вигляді смуг і ліній, розташованих паралельно одна одній під кутом до осі прокатки, що утворюються внаслідок місцевих зсувних напружень, які перевищують допустимі для даного напруженого стану (рис. 2.55).



Рис. 2.55. Лінії ковзання

Надрив – дефект зовнішньої поверхні, що являє собою порушення суцільності металу з нерівними стінками у вигляді розриву поперечної орієнтації, який утворюється внаслідок зниженої пластичності металу (рис. 2.56). Причиною зниженої пластичності можуть бути недогрів або перегрів металу (надмірне укрупнення зерна в процесі нагрівання заготовки).



Рис. 2.56. Надрив

Розкатана тріщина – дефект поверхні труби, що являє собою розрив металу, орієнтований залежно від орієнтації та форми вихідного дефекту литої заготовки уздовж вісі прокату, під кутом до неї або перпендикулярно (рис. 2.57). Є наслідком розкатування поздовжньої або поперечної тріщини литої заготовки.



Рис.2.57. Розкатана тріщина

Бульбашка (здуття) – дефект поверхні у вигляді локалізованого спучення металу (рис. 2.58). Причиною виникнення цього дефекту є підвищене місцеве забруднення металу газами або неметалевими включеннями.

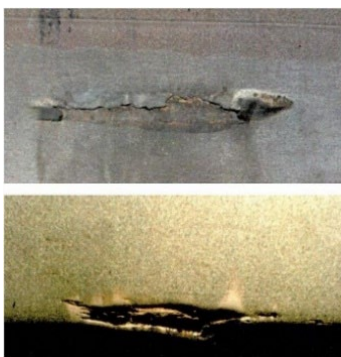


Рис. 2.58. Бульбашка (здуття)

Вкатані металеві частинки – дефекти поверхні у вигляді шматочків металу, що приварилися і частково закатані (рис. 2.59). Причинами зазначеного дефекту є вдавнення металевих частинок під час прокатки, змотування, різання та складування листів і рулонів у разі потрапляння ґрата від вогневого різання та зварювання, стружки, поломок виробничого устаткування, вкатування відшарованих плівок і окалини.



Рис. 2.59. Вкатана металева частинка

Продир (задир) – порушення цілісності поверхневого шару труби з утворенням заглиблень довільної довжини, геометрії та глибини. Дефект може бути у вигляді канавки із зібраним на кінці металом. Поверхня в ділянці дефекту може бути світлою (з блиском унаслідок видалення окисленого шару) або вкритою іржею (рис. 2.60). Причиною виникнення є різке тертя (дряпання) труб об деталі транспортного або технологічного обладнання.

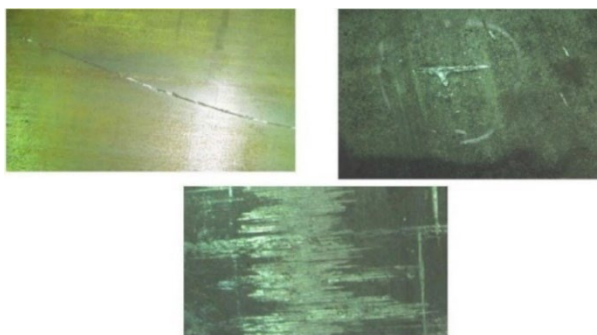


Рис. 2.60. Продир (задир)

Вм'ятини на торці труби – дефекти поверхні торця труби у вигляді довільно розташованих заглиблень різної форми (рис. 2.61). Вм'ятини на торці труби утворюються внаслідок ударів і пошкодження поверхні торців труб під час транспортування, складування та інших операцій.

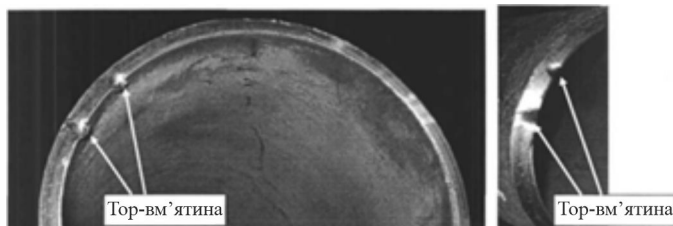
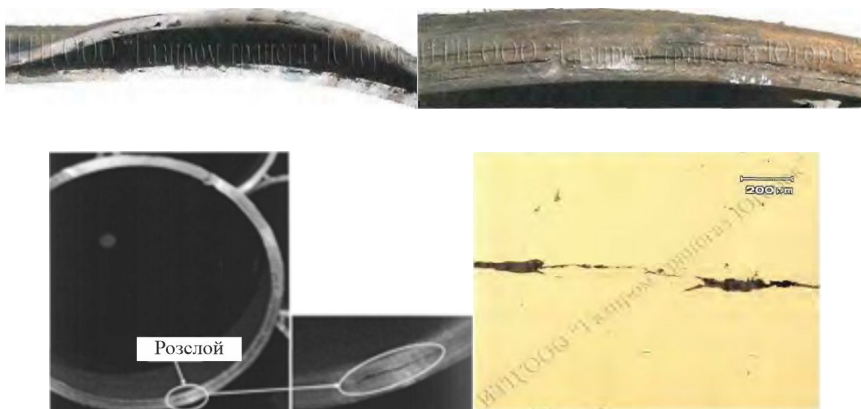


Рис. 2.61. Торцева вм'ятина

Розшарування – дефект поверхні у вигляді тріщин на крайках і торцях труб. Дефект має різну протяжність як видимої його частини (на торці труби), так і прихованої його частини вздовж труби (рис. 2.62). Причинами розшарування є наявність у металі усадочних дефектів, внутрішніх розривів, підвищеного забруднення неметалевими включеннями і при перепалі.



Мікрошліф

Рис.2.62. Розшарування

У зламах і на макрошліфах у перерізах труб, розташованих уздовж і впоперек напрямку деформації, розшарування мають вигляд тріщин, паралельних до поверхні деформації, а в перерізі, паралельному до поверхні деформації, – вигляд плоских витягнутих ділянок світло-сірого або темного окисленого кольору.

Причини утворення розшарувань: порушення технології виплавлення і розливання сталі, підвищена забрудненість металу та недостатній захист його від вторинного окислення, недотримання температурно-часових параметрів розливання сталі з урахуванням режимів охолодження, швидкості хитання кристалізатора, а також режиму вторинного охолодження та швидкості витягування злитка з кристалізатора, відхилення в режимі температурно-деформаційної обробки злитка (заготовки) і в режимі його прокатки.

Способи запобігання виникненню розшарувань у тілі труби: дотримання технології рафінування, розкислення і модифікування рідкої сталі, а також забезпечення захисту струменя і дзеркала металу під час розливання; контроль підготовки та збирання проміжної місткості та кристалізатора; дотримання режиму охолодження і швидкості хитання злитка, а також режиму вторинного охолодження та швидкості витягування злитка з кристалізатора; уточнення режимів температурно-деформаційної обробки злитка.

Ліквация – дефект, що проявляється у вигляді скупчення шкідливих домішок і нерівномірності хімічних елементів або сполук в об'ємі металу, що виникає внаслідок вибіркової кристалізації під час його затвердіння (рис. 2.63).



Рис. 2.63. Мікроструктура металу трубної сталі з ліквацийними зонами та мікротріщинами від температурно-деформаційної обробки

Основні причини утворення лікваций: порушення технології виплавлення і розливання сталі, порушення теплового режиму під час розливання сталі, відсутність захисту рідкої ванни, відхилення в режимі кристалізації сталі.

Структура внутрішніх металургійних дефектів типу ліквацийних зон у трубних сталях характеризується підвищеним вмістом перліту та неметалевих включень типу сульфідів і сульфосилікатів, які під час впливу значних навантажень (що перевищують межу плинності) можуть сприяти появі дефектів суцільності металу – розшарувань і тріщин, які, своєю чергою, можуть знижувати механічні властивості пропорційно до площі дефекту.

Проплавлення (припикання) – дефект зовнішньої поверхні, що являє собою локальне заглиблення круглої або овальної форми, яке утворюється в результаті розплавлення металу під час контакту труби зі струмопровідними частинами обладнання (рис. 2.64). Мікроструктурні дослідження свідчать про значні структурні зміни в зоні припикання порівняно з основним металом.

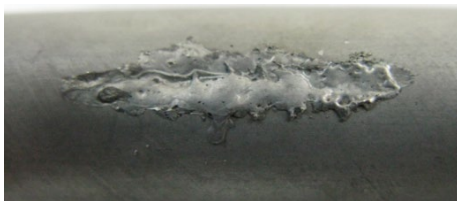


Рис. 2.64. Проплавлення (припикання)

Пропал – дефект, що має вигляд наскрізного отвору або проплавленої не наскрізь ділянки труби, рулону (рис. 2.65). Причиною є, як правило, порушення технологічного процесу вогневого різання.



Рис. 2.65. Пропал

Розтрав (перетрав) – дефект зовнішньої поверхні у вигляді точкових або контурних заглиблень, що є місцевим або загальним пошкодженням поверхні металу в процесі травлення (рис. 2.66).



Рис. 2.66. Розтрав (перетрав)

Рванина – дефект зовнішньої поверхні, що являє собою порушення суцільності металу з нерівними стінками у вигляді розриву поперечної орієнтації, який утворюється внаслідок зниженої пластичності металу (рис. 2.67). Причиною зниженої пластичності можуть бути недогрів або перегрів металу (надмірне укрупнення зерна в процесі нагрівання заготовки). Зазвичай порожнина дефекту розгалужена.



Рис. 2.67 - Рванина

Рябизна – дефект зовнішньої поверхні у вигляді дрібних заглиблень (шорсткості) на поверхні прокату і труб, що виявляються після видалення окалини, являє собою незначні нерівності різної форми, що розташовуються групами по всьому виробу або на його частині (рис. 2.68). Дефект може займати значну площу, розташовуючись переважно окремими ділянками

уздовж напрямку деформації. Ступінь шорсткості за рябизни може бути різною: від найнезначнішої, за якої поглиблення розташовуються практично одне біля одного до значної, поглиблення при якій по ширині або довжині можуть розташовуватися на відстані кількох міліметрів, а по глибині - від сотих часток міліметра до 1,0 мм.



Дрібна

Середня

Велика

Рис. 2.68. Рябизна поверхні труб (дрібна, середня, велика)

Тріщини напружень термічні – дефекти поверхні у вигляді вузьких розривів різної орієнтації, що йдуть углиб і є наслідком напружень, спричинених структурними перетвореннями під час загартування, тобто за умови порушення режимів нагріву й охолодження, несвоєчасного відпуску труб (рис. 2.69). Злам тріщин (розривів) гартівного походження порцеляноподібний, дуже дрібнозернистий, покритий високотемпературними оксидами, а зона тріщин різко відкреслена від основного зламу труби.



Рис. 2.69. Тріщина напруження

Тріщина трубопрокатна – дефект на зовнішній поверхні у вигляді вузького розриву подовжньої орієнтації, що йде в глиб під прямим кутом до поверхні (рис. 2.70). Трубопрокатні тріщини утворюються під час деформації

металу в процесі виробництва труб унаслідок виникнення напружень, що перевищують міцність металу.



Рис. 2.70. Тріщина трубопрокатна

Злам трубопрокатної тріщини в гарячекатаних трубах кристалічний, покритий високотемпературними оксидами. У разі утворення тріщин під час правлення в правильних машинах і в холоднодеформованих трубах, які не пройшли термообробку, - злам високотемпературними оксидами не покритий.

Шпаківні – дефекти зовнішньої поверхні, що являють собою розриви металу, що повторюються по довжині труби через певні інтервали, які мають еліпсоподібну форму, що розташовуються перпендикулярно до осі виробу, або кутоподібні, що розташовуються під кутом 45° у напрямку роз'ємів калібрів. На холоднодеформованих трубах утворенню цих дефектів часто сприяє недостатня пластичність металу через грубозернистість і неякісну проміжну термообробку, яка не зняла напружень від деформації на попередніх переділах (рис. 2.71).



Рис. 2.71. Шпаківні

Лускатість – дефект зовнішньої поверхні, що являє собою короткі множинні відшарування металу, одним кінцем з'єднані з трубою, розташовані уздовж, упоперек або під кутом до осі прокатки по всьому периметру виробу або його частини (рис. 2.72). Дефект може бути обмежений окремими ділянками або розташовуватися по всій поверхні. На поверхні металопрокату лусочки, як правило, мають язикоподібну форму і за цією ознакою відрізняються від сітки гарячих тріщин і рябізни. На мікрошліфах із дефектних зон металу видно, що мікротріщини розташовуються на краях зерен і часто супроводжуються підвищеним вмістом неметалевих включень і лікватів.

Найчастіше лускатість зустрічається у низько- або середньовуглецевих конструкційних сталях, зокрема, у легованих і мідьвмісних сталей.

Дефект є наслідком розкатування надривів, що утворилися під час оплавлення меж зерен через перепал металу. Перепал металу є наслідком або підвищеного вмісту легкоплавких компонентів у центральних зонах заготовки, або перевищенням температури нагріву заготовки під прокатку.



Рис. 2.72. Лускатість поверхні труб

Недопустимі жирові забруднення поверхні труб – дефект поверхні у вигляді добре видимих неозброєним оком масляних плям або у вигляді консерваційного покриття всієї поверхні труб, які не можуть бути видалені шляхом попереднього оброблення труб (рис. 2.73). Неприпустимі жирові забруднення є наслідком забруднення та потрапляння змащування на поверхню труб-заготовок у процесі їхнього тривалого зберігання та під час їхнього гідропресування.



Рис. 2.73. Неприпустимі жирові забруднення поверхні труб

До дефектів за відхиленням геометричних розмірів труб належать: відхилення зовнішнього (внутрішнього) діаметра, овальності, товщини стінки, кривизни, довжини.

Відхилення діаметра – дефект геометрії труби, за якого виміряні максимальне та/або мінімальне значення зовнішнього (внутрішнього) діаметра виходять за межі норм за нормативно-технічною документацією на труби (рис. 2.74). Як правило, нормуються вимоги до точності або зовнішнього, або внутрішнього діаметра. Однак, у деяких випадках у нормативно-технічній документації нормуються вимоги щодо точності одночасно зовнішнього і внутрішнього діаметра. Ця вимога може бути виконана шляхом додаткового калібрування (гарячого або холодного) кінців труб.



Рис. 2.74. Відхилення діаметра і підвищена овальність

Овальність (*outofroundness*) – різниця між виміряними максимальним і мінімальним зовнішніми діаметрами в одному і тому ж поперечному перерізі труби.

Відхилення за товщиною стінки (різностінність, різнотовщинність)

– відхилення від встановлених допусків на товщину стінки труби. Розрізняють поперечну та поздовжню різностінність труби.

Поперечна різностінність – різниця між найбільшим і найменшим значеннями товщини стінки, виміряними в одному поперечному перерізі, перпендикулярному до осі труби. Поперечна різностінність може бути ексцентричною і симетричною.

Поздовжня різностінність – різниця між найбільшим і найменшим значеннями товщини стінки, виміряними по одній твірній по кінцях труби.

Різностінність труб (рис. 2.75) зазвичай виникає під час прокатки різностінних, нерівномірно нагрітих гільз, внаслідок відхилень від установлених режимів прокатки, нерівномірності деформації, помилок у калібруваннях валків і оправок, налаштуванні прокатних станів, підвищеного зносу прокатного інструменту та інших.

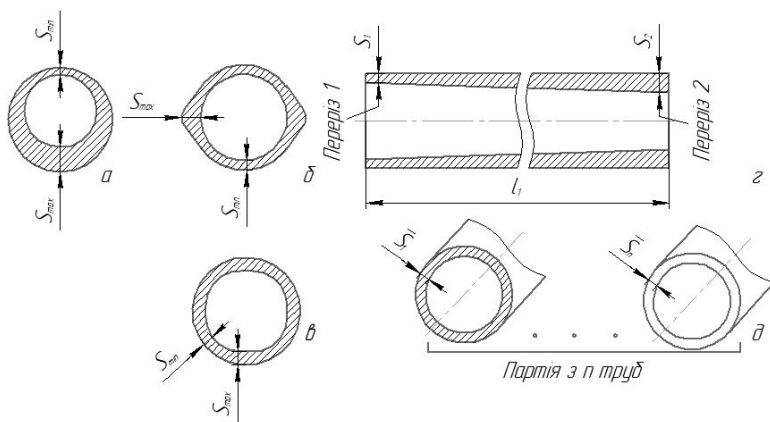


Рис. 2.75. Види різностінності труб:

а, б, в – поперечна різностінність, абсолютна: $\Delta S_{абс} = (S_{max} - S_{min})$, мм; або відносна: $\Delta S_{відн} = (S_{max} - S_{min}) / S_{сер}$, %, де $S_{сер}$ – середня товщина стінки в даному перерізі, зокрема ексцентрична (а) і різновиди симетричної (б, в) різностінності; г – поздовжня різностінність, $\Delta S_{позд} = (S_2 - S_1)$, мм; д – розкид середніх товщин стінок окремих труб S_v прокатаній партії з n труб $\Delta S_{парт} = (S_{max} - S_{min})$, мм

Відхилення кривизни – дефект геометрії труб, за якого виміряна відстань (стріла прогину) між контрольною лінійкою та увігнутою частиною труби або між струною і увігнутою стороною труби перевищує граничну норму кривизни за нормативно-технічною документацією на труби. Відхилення кривизни є наслідком неповного охолодження зони шва після зварювання у водяному колекторі, неправильного настроювання правильної голівки трубоелектрозварювального агрегату або неправильного настроювання трубоправильної машини.

Основні види дефектів холоднодеформованих труб. Основні види дефектів холоднодеформованих труб мають такий самий вид і такі самі характеристики, що й під час виробництва гарячедеформованих труб. Однак, частина дефектів притаманна тільки холоднодеформованим трубам, або мають деякі відмінності від аналогічних дефектів гарячедеформованих труб. До таких дефектів належать: закат (рис. 2.76), відбитки (рис. 2.77), розтрав (рис. 2.78), рванина (рис. 2.79), внутрішні риси (рис. 2.80) та інші.

Закат – дефект на зовнішній поверхні, має рівний або зазубрений край, що являє собою щільно прилеглий до поверхні (прикатаний) накат металу з однієї або двох діаметрально протилежних сторін поздовжньої орієнтації, дефект може бути дугоподібним, прямолінійним, який періодично повторюється по куту повороту труби, що прокатується. Утворюється в зазорах між калібрами/роликами через неправильне налаштування стана ХПТ/ХПТР із таких причин:

- незадовільна розвалка калібрів/роликів;
- поперечний зсув валків;
- великі зазори між калібрами;
- надмірна подача заготовки в зону деформації;
- прокидання під час Perezаряджання прокатного стану.

З подальшою прокаткою закат не розкатується, а йде вглиб стінки. Довжина дефекту 30...60 мм і під час подальшого перекату вона збільшується на величину лінійного зміщення, а поздовжня орієнтація розташування дефекту зміщується під кутом до осі труби.

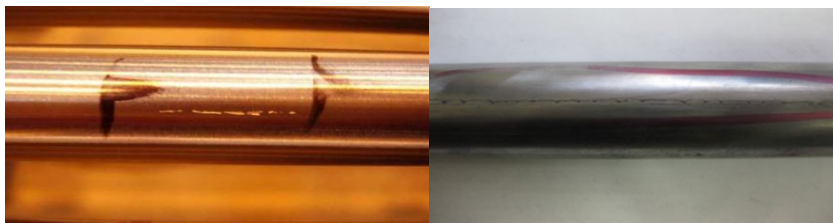


Рис. 2.76. Закати на поверхні холоднодеформованих труб

Відбитки – дефекти поверхні (горбистість, шишки, насічки, шорсткості, вм'ятини, штришки) у вигляді поглиблень і виступів, що періодично повторюються, розташованих поздовжньо по всій поверхні або на окремих її ділянках, які утворилися від налипання металу або підзмашувального шару на поверхні калібрів/роликів, навару на термічних валках і різних проводках, необшитих жолобах.



Рис. 2.77. Відбитки на зовнішній поверхні холоднодеформованих труб

Розтрав (перетрав) – дефект зовнішньої поверхні у вигляді точкових або контурних заглиблень, що є місцевим або загальним пошкодженням поверхні металу в процесі травлення. Часто причиною підвищеної травності під час обробки в травильних ваннах є механічні або прокатні дефекти на зовнішній поверхні труб, неякісна підготовка труб перед термічною обробкою.

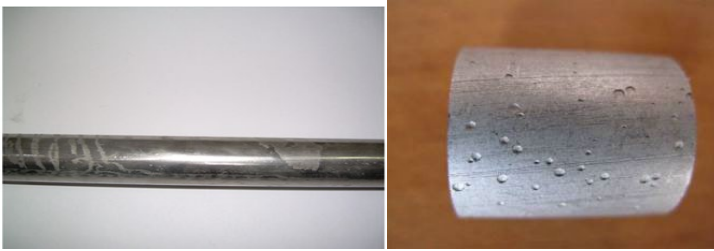


Рис. 2.78. Розтрив на зовнішній поверхні холоднодеформованих труб

Рванина – дефект зовнішньої поверхні, що являє собою порушення суцільності металу з нерівними стінками у вигляді розриву поперечної орієнтації, який утворюється внаслідок зниженої пластичності металу. Причиною зниженої пластичності можуть бути недогрів або перегрів металу (надмірне укрупнення зерна в процесі нагрівання заготовки). Порожнина дефекту розгалужена.



Рис. 2.79. Рваніна на поверхні холоднодеформованих труби

Внутрішні різки – дефекти на внутрішній поверхні холоднодеформованих труб поздовжньої орієнтації на всій поверхні труби або на окремих її ділянках, що утворилися від налипання металу або підзмащувального шару на поверхню оправлення внаслідок порушення температурного режиму у зоні деформації або незадовільного змащення.

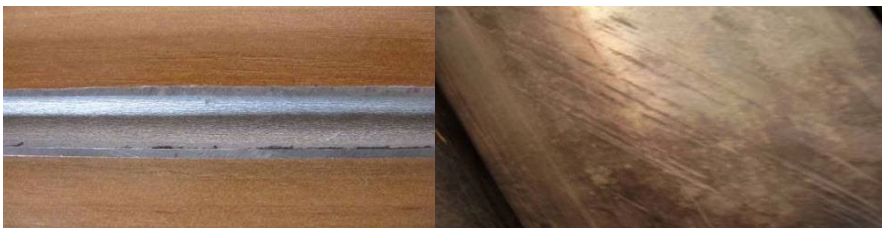


Рис. 2.80. Внутрішні різки холоднодеформованих труб

Дефекти зварних труб (зварних з'єднань – швів). Усі основні дефекти (геометрії, зовнішньої і внутрішньої поверхні, механічних властивостей, структури), які трапляються в безшовних трубах, також притаманні і зварним трубам. Далі розглянемо окремі різновиди дефектів, властивих виключно зварним з'єднанням (швам) зварних труб [34, 35].

Дефекти швів зварних труб поділяють на зовнішні та внутрішні.

До зовнішніх дефектів належать: дефекти форми шва, а також пропали, кратери, напливи, підрізи тощо. У більшості випадків зовнішні дефекти можна виявити візуально. Схематично ці види дефектів представлені на рис. 2.81.

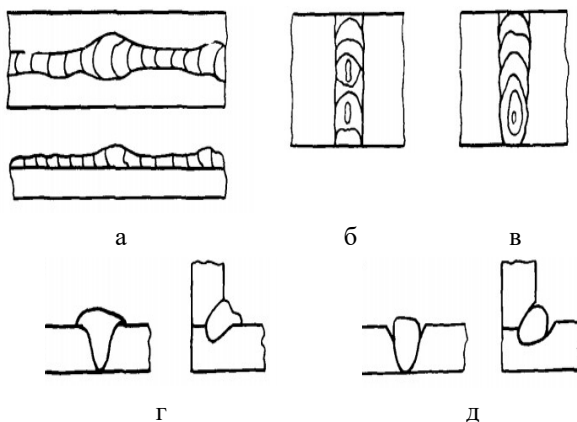


Рис. 2.81. Зовнішні дефекти зварних швів: а – нерівномірна ширина шва; б – пропали; в – кратер; г – напливи; д – підрізи

До внутрішніх дефектів належать: пори, шлакові та неметалеві включення, непровари, тріщини і несплавлення. Ці дефекти підлягають виявленню ультразвуком (УЗ).

Схематично внутрішні дефекти зварних швів представлені на рис. 2.82.

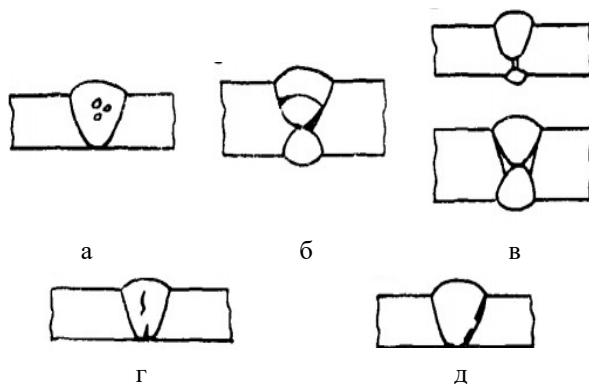


Рис. 2.82. Внутрішні дефекти зварних швів: а – пори; б – шлакові включення; в – непровари в корені шва і по кромці; г – тріщина; д – несплавлення

Пори газові утворюються внаслідок забрудненості кромek зварюваного металу; використання вологого флюсу або вологих електродів, недостатнього захисту шва під час зварювання в середовищі вуглекислого або інертного газу, збільшеної швидкості зварювання і завищеної довжини дуги.

Під час зварювання в середовищі вуглекислого газу, а в деяких випадках і під флюсом на великих струмах утворюються **наскрізні пори** – так звані **свіщі**. Розмір внутрішніх пор може коливатися від 0,1 до 2...3 мм, іноді й більше, в діаметрі. Пори можуть бути розподілені в шві окремими групами (скупчення пор) у вигляді ланцюжка вздовж поздовжньої осі шва або у вигляді окремих включень (поодинокі пори). Залежно від кількості, розміру, місця розташування пор, від характеру навантажень, що сприймаються конструкціями, пори по-різному впливають на статичну і вібраційну міцність. Для конструкцій, що працюють в умовах статичного

навантаження, допускається площа пор не більше 7% розрахункового перерізу шва. Для конструкцій, що працюють за вібраційних навантажень, допускається площа пір – не більше 4...5 % розрахункового перерізу шва.

Шлакові включення в метали зварного шва – це невеликі об'єми, заповнені неметалевими речовинами (шлаками, оксидами). Розміри їх досягають кількох міліметрів. Ці включення утворюються в шві через погане очищення зварюваних крайок від окалини та інших забруднень, а найчастіше – від шлаку на поверхні перших шарів багатшарових швів перед заварюванням наступних шарів. Шлакові включення можуть бути різної форми: круглі, плоскі, у вигляді півки або довгасті у вигляді витягнутих «хвостів». Вплив поодиноких шлакових включень на працездатність зварних конструкцій приблизно такий самий, як і газових пор. Зазвичай шлакові включення мають більш витягнуту форму і більший розмір порівняно з порами. Тому на відміну від пор, вони краще виявляються ультразвуком.

Непровар – дефект у вигляді тріщини по зварному шву. Непровари бувають різного виду: короткий (локальний непровар), завдовжки не більше 20 мм (рис. 2.83); протяжний, завдовжки понад 50 мм (рис. 2.84).

Короткий непровар має рівний вигляд без вигинів і рванин. Поширюється по зварному шву. На кінцях тріщини спостерігаються утяжки, спрямовані під кутом до тріщини. Виявляється, як правило, при втраті герметичності труби. Основними причинами утворення коротких непроварів є короткочасне переривання зварювального струму внаслідок короткого замикання крайок через задилок або стружку, поганий контакт між поверхнею труби і струмопідводом, нестабільна робота зварювального генератора.

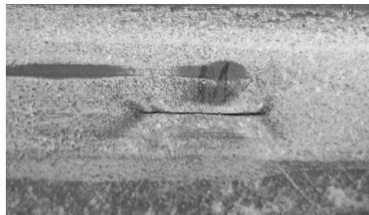


Рис. 2.83. Короткий (локальний) непровар

Протяжний непровар завдовжки понад 50 мм має вигляд рівної тріщини по зварному з'єднанню. Основними причинами утворення протяжних непроварів є зниження або повна відсутність зварювального струму на протяжній ділянці труби, неякісно підготовлена кромка, наявність чужорідних часток у рулонному прокаті, що розташовуються поблизу крайок. Призводить до розриву труби під час гідровипробування.



Рис. 2.84. Протяжний непровар

Незварена ділянка (несвар). Дефект проявляється під час механічних і гідравлічних випробувань. У зламі має характерні плоскі та рівні ділянки без присутності деревоволокнистої структури. При металографічному дослідженні видно вузьку зону термічного впливу і відсутність феритової смужки (лінії сплавлення).

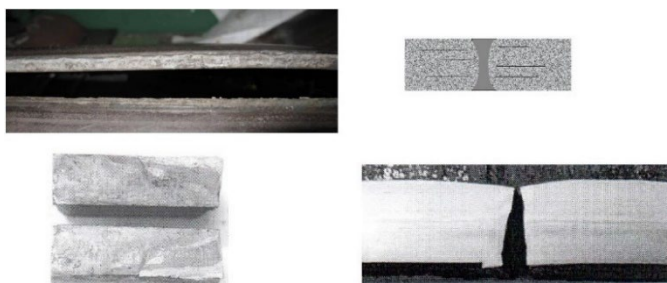


Рис. 2.85. Незварена ділянка (незварювання) у перерізі труби

Тріщина по лінії сплавлення – дефект, що являє собою в поперечному перерізі рівну, темну смужку, розташовану по лінії сплавлення. Дефект може бути виявлений за допомогою методів неруйнівної дефектоскопії (рис. 2.86). Основною причиною утворення тріщин по лінії сплавлення є наявність неметалевих включень (оксидів), що послаблюють зварне з'єднання.

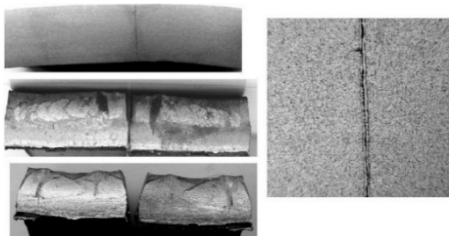


Рис. 2.86. Тріщина по лінії сплавлення в перерізі зварної труби

Тріщина по ліквації (хімічній неоднорідності) – дефект у вигляді тріщини не по лінії сплавлення (рис. 2.87). Розкриття тріщини відбувається під час деформації ділянки з ліквациєю (під час правлення, калібрування, гідровипробування). Має масовий характер і на трубі може перебувати в декількох місцях уздовж зварного шва. Візуально нагадує локальний непровар (свищ).



Рис. 2.87. Тріщина по ліквації (хімічній неоднорідності): а – зовнішній вигляд; б – вид в перерізі

Поперечні тріщини (надриви) основного металу в навколошовній зоні – дефекти, що мають вигляд коротких надривів, розташованих

перпендикулярно зварному з'єднанню (рис. 2.88), з'являються під час різання рулонного прокату на штрипс.

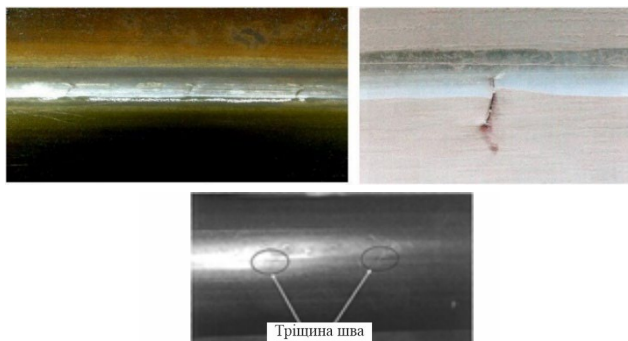


Рис. 2.88. Поперечні тріщини (надриви) основного металу в наволошовній зоні

Зміщення крайок – розбіжність рівнів розташування внутрішніх і (або) зовнішніх поверхонь зварюваних (зварених) крайок. Дефект поздовжнього шва труб у вигляді перевищення однієї звареної кромки трубної заготовки над іншою на ділянках труб завдовжки до 3-х метрів, прилеглих до стику, на величину, що перевищує гранично-допустиму норму за нормативно-технічною документацією на труби (рис. 2.89). Відхилення зсуву крайок близько стику є наслідком перекосу (в плані) поздовжніх осей кінців штрипсів перед їх стиковим зварюванням. Це призводить до штучної серпоподібності зістикованої ділянки штрипса, до виникнення на ділянці перед зварювальним вузлом гофр на довшій кромці трубної заготовки, які своєю чергою призводять до зміщення крайок.

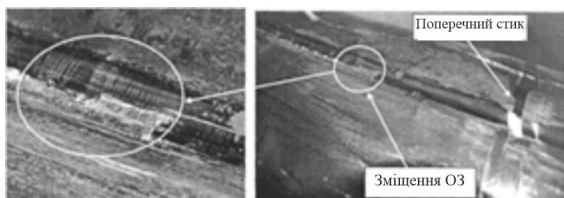
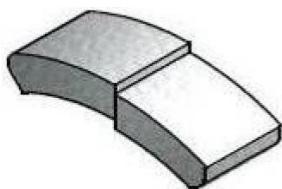


Рис. 2.89. Зсув крайок

Потоншення в мінус товщини стінки труб у зоні шва – дефект, за якого товщина стінки в районі зварного шва виходить за межі мінусового допуску (рис. 2.90). Причиною дефекту є неправильне положення різця гратознімача.

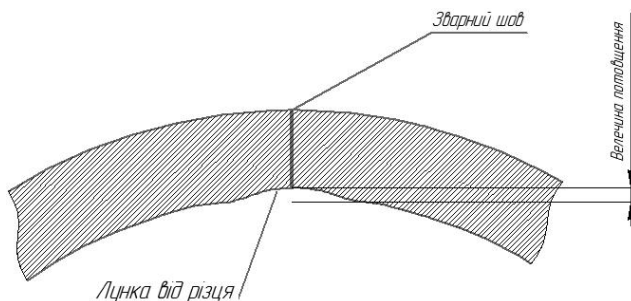


Рис. 2.90. Схематичне зображення дефекту «потоншення стінки в районі шва».

Відхилення в плюс висоти залишку внутрішнього грата – дефект, за якого товщина стінки в районі зварного шва виходить за межі плюсового допуску. Причина аналогічна попередній – неправильне положення різця гратознімача.

Не знятий зовнішній грат - дефект поздовжнього шва труб у вигляді незнятого або неякісно знятого зовнішнього грата (рис. 2.91). Не знятий зовнішній грат є наслідком відсутності його зрізання, наприклад, на ділянці труб з зовнішнім гратом, що охолов після зупинки стану. Неякісно знятий зовнішній грат може бути також наслідком поломки різця для його зрізання або наслідком зрізання холодного грата.

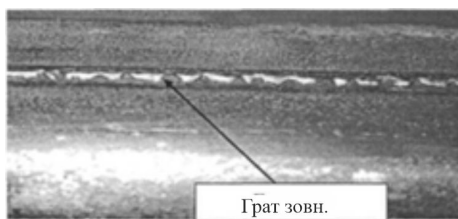


Рис. 2.91. Не знятий зовнішній грат

Не знятий внутрішній грат – дефект поздовжнього шва труб у вигляді не знятого внутрішнього грата під час виробництва труб на замовлення зі зняттям внутрішнього грата (рис. 2.92). Не знятий внутрішній грат є наслідком того, що з роботи був вимкнений внутрішній гратознімач. Може відбуватися через часті збої в роботі обладнання трубоелектрозварювального стану і, відповідно, часті його зупинки.

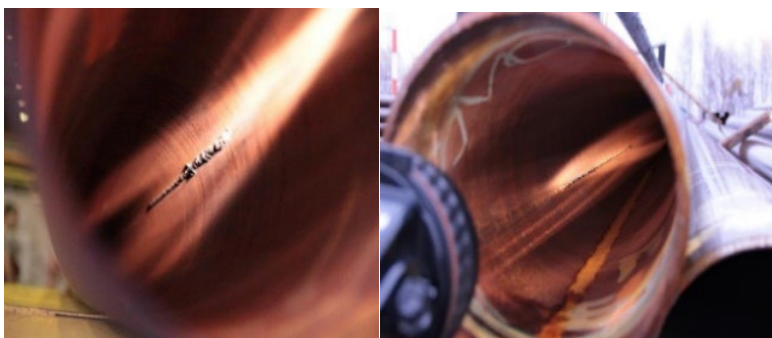


Рис. 2.92. Не знятий внутрішній грат

Виправлення дефектів зварного шва: всі неприпустимі дефекти зварного шва підлягають обов'язковому усуненню, а якщо це неможливо, зварний виріб бракують.

У конструкціях зі сталі допускається усунення дефектів плазмодуговим або повітряно-дуговим різанням з подальшим обробленням поверхні абразивами. Можна усувати зовнішні дефекти шліфуванням. Якщо проводиться заварювання вибраних ділянок у швах, що підлягають обов'язковій термічній обробці (з легованих і хромистих сталей), то

приступати до виправлення дефектів слід тільки після відпуску зварного з'єднання за температури 450...650°C.

Видалення заглиблених зовнішніх і внутрішніх дефектів (дефектних ділянок) у з'єднаннях з алюмінію, титану та їхніх сплавів проводять тільки механічним способом (вишліфовуванням абразивним інструментом або різанням, а також вирубкою з подальшим зашліфовуванням).

Виправлені шви зварних з'єднань слід повторно обов'язково контролювати. Якщо при цьому знову виявлено дефекти, то знову роблять їх виправлення з дотриманням необхідних вимог. Кількість виправлень однієї і тієї самої дефектної ділянки шва залежить від категорії відповідальності конструкції і не повинна перевищувати трьох.

2.6. Дефекти, що утворюються під час термічної обробки металопродукції

Термічна обробка прокату – ефективний прийом поліпшення експлуатаційних показників різних сталей і сплавів. Різні види термообробки адаптовані під досягнення конкретних результатів [12, 32].

Залежно від характеру термічного впливу на метал і способів введення додаткової енергії в його структуру розрізняють такі основні види термічної обробки:

- відпал – застосовується з метою поліпшення подальшої деформації заготовок, і забезпечує їм рівноважну дрібнозернисту структуру. Зі свого боку, відпал може бути високо- і низькотемпературним;
- загартування – надає деталям підвищеної твердості та механічної міцності. Виконується в електричних або полум'яних нагрівальних пристроях, підрозділяється на поверхневе та об'ємне;
- відпуск – виконується, як правило, після загартування, і забезпечує плавне зниження показників міцності сталі в міру віддалення від поверхні. У результаті знімаються термічні напруги, що призводять до викривлення деталей;
- нормалізація – полягає у виправленні несприятливої структури сталі та поліпшенні її подальшої оброблюваності різанням.

- поліпшення – виконується для надання сталевим деталям оптимального поєднання міцності та в'язкості, що істотно, якщо виріб працює за значних динамічних навантажень.

Менш поширені, але також використовуються: старіння (стабілізація структури термообробленої сталі), обробка холодом (забезпечує деталям підвищену точність), а також комбіновані процеси, що поєднують термообробку з деформацією сталі, насиченням її поверхні іншими елементами тощо.

Дефекти, що виникають під час термічної обробки сталі, заведено поділяти на два види: оборотні та незворотні. У першому випадку, їх можна «зняти» додатковою тепловою обробкою заготовки, у другому – виріб є браком, і далі підлягає переплавленню.

До першої групи належить **перегрів** – нагрівання сталі до температури вище 1250...1100 °С (менші значення – для сталей із підвищеним вмістом вуглецю). Дефект посилюється, якщо до того ж збільшити час витримки заготовки при таких температурах. У перегрітому металі починається інтенсивне зростання зерен, що супроводжується несприятливою зміною їхньої форми. У високовуглецевих сталей на тлі такої структури додатково з'являються грубі голчасті форми цементиту Fe_3C . У результаті механічні властивості сталі різко знижуються, причому особливо інтенсивно у перегрітого виробу зменшуються показники ударної в'язкості. Такі заготовки руйнуються під час спроби будь-якої механічної їх обробки (а також обробки тиском зі скільки-небудь значними ступенями деформацій).

Перегрів сталі можна усунути, для чого застосовують відпал до температур, що на 40...600 °С перевищують температуру початку аустенітного перетворення. Після деякої витримки заготовки повільно охолоджують разом із піччю. У теплу пору року можливе охолодження на спокійному повітрі (без протягів і штучних повітряних потоків). У результаті зерна стають дрібнішими, набувають округлої форми, а металу повертаються його колишні фізико-механічні характеристики.

Незворотнім дефектом термообробки є **перепал**. Він виникає при нагріванні сталі до температур, нижчих за температуру початку плавлення на 50...1000°C. За таких температур неметалеві включення в сталі, що розташовуються завжди на межах зерен (сірка і фосфор), плавляться. Цьому

супроводжує також інтенсивне окислення, яке проходить по межах зерен. Перепалений метал повністю втрачає свою пластичність, наслідком чого є поява рваних тріщин під час подальшого кування або прокатки. Відновити вихідну структуру такої сталі неможливо (рис. 2.93).

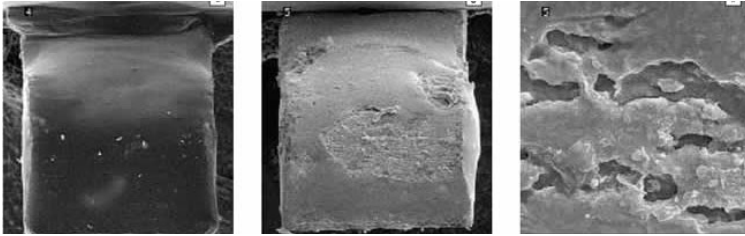


Рис. 2.93. Дефекти термообробки типу «перепал»

Типові дефекти термічної обробки сталі можна звести до таких:

- **невідповідність твердості** обробленого виробу. Виникає при порушенні заданого режиму, наприклад, при підвищеній/зниженій швидкості охолодження, недостатньому часі витримки заготовки в печі або в результаті нагрівання до більш низьких/високих температур. Виправляється повторною термообробкою;

- **поява сітки карбідних включень**. Викликається перегрівом сталі й усувається виконанням нормалізації металу, або перекатуванням (перековуванням) заготовки;

- **тріщиноутворення**, спричинене розтріскуванням сталеві заготовки через високі термічні напруження, що виникли в ній під час мартенситного перетворення. Сталь стає крихкою, злам має яскраво виражений грубозернистий характер. Виявляється при перевищенні допустимих швидкостей охолодження металу під час загартування. Виправити такий брак неможливо;

- **зневуглецювання** – вигорання цементиту в поверхневих шарах сталі з одночасним утворенням високотемпературного оксиду заліза FeO . Відбувається за надто тривалої витримки нагрітої заготовки в печі, або за використання полум'яних нагрівальних пристроїв з неконтрольованою атмосферою. Брак можна виправити лише частково: заготовки можна піддати нормалізації, але марка сталі при цьому зміниться в бік зниження

135

процентного вмісту вуглецю. Нагрівання слід вести в електропечах, або в печах безокисного нагрівання;

- **нерівномірна твердість по поверхні або перерізу.** Дефект пов'язаний із неякісним відпуском (наприклад, використанням забрудненого включеннями охолоджувального середовища або торканням заготовок одна одної у відпускній ємності). Дефект усувається подальшою нормалізацією і загартуванням із застосуванням більш інтенсивного охолоджувального середовища, зокрема, води або водного розчину $NaCl$;

- **механічна деформація або короблення** термооброблених виробів. Усувається їх виправленням на гідравлічних пресах, а також, за необхідності, застосуванням повторної термообробки, але з більш повільною швидкістю охолодження.

2.7. Дефекти, що виникають під час виконання оздоблювальних операцій.

Заключною стадією виробничого циклу виготовлення металопрокату, що йде слідом за операціями пластичної деформації, є оздоблення. До оздоблення металопрокату відносять увесь комплекс обробки металовиробів, що включає операції механічної обробки (рубання на пресах, різцеве різання, обточування, шліфування, видалення окалини, нарізування фасок і різьблення на трубах і муфтах тощо), зважування, маркування та таврування, нанесення, за необхідності, консерваційних і лакофарбових покриттів, пакування, складування і відвантаження.

Розглянемо деякі дефекти металопродукції, які найчастіше трапляються, під час її оздоблення [26, 30, 32].

Надриви – неглибокі тріщини, що виникають у деталях унаслідок холодної деформації металу, наприклад, під час свердління або розгортання отворів тупим свердлом або розгорткою, особливо коли метал має недостатньо високі пластичні властивості через дефекти структури.

Стоншення металу – зменшення товщини металу внаслідок надмірного його видалення під час обробки абразивним інструментом.

Дефект рубання металу – тріщини або рвані в'язкі злами, що утворюються під час рубання металопрокату на пресах (рис. 2.94).

Рвані нерівні злами виходять під час рубання прутків вуглецевої або легованої сталі з низьким вмістом вуглецю в тому разі, якщо на рубання надходить метал, який не повністю охолоджений до кімнатної температури. Внутрішні шари металу зберігають ще відносно високу температуру, і злам через велику в'язкість виходить із виривами. Злам з виривами не пов'язаний з внутрішніми дефектами прутків: макроструктура сталі щільна, без дефектів.



Злам



Мікрошліф

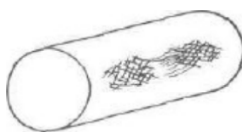
Рис. 2.94. Вириви в центрі прутка зі сталі 20, що утворилися під час рубання

Під час холодного рубання прутків на пресах або різання на гільйотинних ножицях іноді утворюються тріщини, що розташовуються приблизно перпендикулярно до напрямку руху різального інструменту.

Утворення тріщин зумовлене тим, що метал надійшов на різання в невідпаленому стані з високою твердістю. Виникненню тріщин, можливо, міг сприяти незадовільний стан різального інструменту.

Дефекти такого виду характерні для випадку холодного різання металу з високою твердістю в невідпаленому стані.

Шліфувальні тріщини – група дрібних і тонких розривів, як правило, у вигляді сітки на шліфованій поверхні металу. Виникають під час шліфування сталей деяких марок, схильних до утворення тріщин, – загартованих високовуглецевих і легованих (рис. 2.95).



На поверхні



В мікрошліфі

Рис. 2.95. Шліфувальні тріщини

Шліфувальні тріщини можуть виникати під час шліфування злитків і деформованого металу. Мають невелику глибину (від 1 до 2 мм), але видаляти їх шліфуванням зазвичай не вдається, оскільки під час шліфування виникають нові тріщини.

Метал у місцях інтенсивного шліфування внаслідок розігріву часто буває вкритий плівкою оксидів, що має вигляд кольорів побілості.

Мікроаналіз показує, що шліфувальні тріщини дуже тонкі, звивисті й поширюються вглиб металу зигзагами або сходинками з відгалуженнями. У металі, що не піддавався додатковому нагріванню, шліфувальні тріщини, що мають тонке закінчення, часто проходять по межах зерен і не супроводжуються окисленням і знеуглецюванням.

Найбільшу схильність до утворення шліфувальних тріщин мають сталі мартенситного і феритного (високохромисті і хромоалюмінієві) класів, а також дисперсійотвердіючі сплави.

Для запобігання утворенню шліфувальних тріщин гарячедеформовані сталі мартенситного класу піддають перед шліфуванням пом'якшувальній термічній обробці. Для зменшення напружень для сталей феритного класу і дисперсійно-твердіючих сплавів застосовують термічну обробку, а шліфування здійснюють за помірними режимами.

Утворення шліфувальних тріщин пов'язане зі структурою металу і не пов'язане зі способом його виплавлення. Причина їх виникнення – місцевий розігрів металу, що призводить до локального збільшення його об'єму. Під час подальшого охолодження об'єм локальних зон зменшується, і за температур нижче 100 °С, коли метал стає крихким, відбувається розрив.

Травильні тріщини – розриви, що утворилися під час травлення металу з внутрішніми напруженнями, спричиненими структурними перетвореннями або деформацією. Травильні тріщини іноді утворюють поверхневу сітку, подібну до сітки шліфувальних тріщин, але значно грубішу (рис. 2.96). Це можуть бути тріщини, спричинені травленням у місцях із напруженнями від попереднього шліфування. Можливо також, що тонкі тріщини утворилися під час шліфування і були розтравлені.



Рис. 2.96. Схема і зовнішній вигляд прутка сталі із сіткою травильних тріщин

На мікрошліфах травильні тріщини виглядають так само, як шліфувальні, але вони значно глибші та ширші за останні. Дрібні травильні тріщини часто утворюються під час травлення тонких гарячекатаних прутків, якщо сталь піджарюється під час охолодження з температури закінчення прокатки.

Причина утворення травильних тріщин – насичення напруженого металу воднем, що виділяється під час травлення.

До утворення травильних тріщин схильні сталі мартенситного класу після гарячої механічної обробки або перлітного класу, але в загартованому стані. Сталі феритного класу (високохромисті та хромоалюмінієві) також схильні до утворення травильних тріщин, і в шліфованому вигляді піддавати їх травленню рекомендується тільки після пом'якшувального відпуску.

Застосування інгібіторів під час травлення запобігає утворенню травильних тріщин, оскільки зменшує інтенсивність виділення водню.

Перетрав – місцеве або загальне роз'їдання поверхні металу під час травлення (рис. 2.97).



Рис. 2.97. Зовнішній вигляд прутка з перетравленою поверхнею

Травлення зазвичай здійснюють для видалення окалини, тому в разі важкого її відокремлення (щільна окалина) доводиться збільшувати час перебування металу у ванні, що часто і призводить до протраву поверхні на тих ділянках, з яких окалина зійшла раніше.

Інші причини: занадто висока температура розчину; використання старих розчинів кислот, збагачених солями заліза; недостатнє спостереження за режимом травлення.

Важливий спосіб запобігання перетравлюванню - розпушення окалини перед травленням. Руйнуванню окалини сприяє також правка на валкових машинах. Застосування при травленні інгібіторів знижує небезпеку перетравлення металу.

Залишки окалини – окалина, не видалена з окремих ділянок (рис. 2.98).

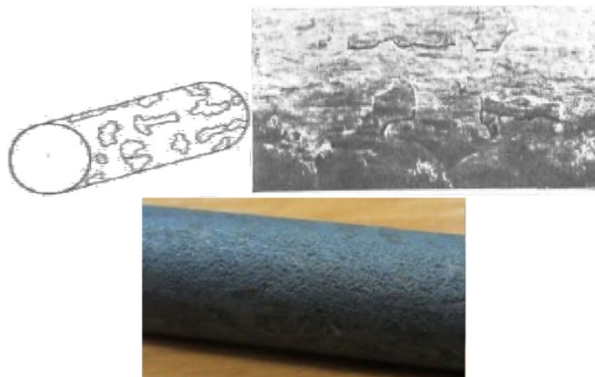


Рис. 2.98. Схематичне зображення і зовнішній вигляд залишків окалини на прутку

Зазвичай цей дефект трапляється в тих випадках, якщо травленню піддається метал із товстим шаром щільної окалини після відпалу. Залишки окалини можуть спостерігатися також, якщо під час правки щільна окалина після відпалу обсіпається лише частково.

Цьому дефекту можна запобігти шляхом зменшення тривалості та температури відпалу, отримання більш пухкої окалини; видаленням окалини з поверхні шляхом замочування у воді після відпалу; видаленням окалини

легким виправлянням із вигином, але без сильного тиску, за якого окалина може вдавлюватися та створювати вм'ятини; видаленням окалини шляхом рівномірного підбурювання в кислотах із застосуванням інгібіторів.

Подряпина – дефект у вигляді канавки неправильної форми і довільного напрямку, що утворилася внаслідок механічних ушкоджень, зокрема під час складування і транспортування металу. Форма і протяжність дефекту можуть бути різноманітними. Дефект іноді може об'єднувати кілька подряпин. У поперечних мікрошліфах дефект має тупе дно, не містить оксидів, не знеуглецьований і не має інших змін мікроструктури.

Для попередження дефекту необхідно ретельно дотримуватися правил транспортування і складування металу. За невеликої глибини подряпину не вважають бракувальною ознакою, але вона псує зовнішній вигляд металу, так званий товарний вигляд.

Під час оздоблення нарізних труб основні (найпоширеніші) дефекти: невідповідність геометричних параметрів різблення у трубах і муфтах встановленим параметрам, невідповідність параметрів згвинчування різбових з'єднань, негерметичність (протікання) різбового з'єднання.

Під час оздоблення гладких (без різблення) труб дефектами, які часто трапляються, є відхилення кута нахилу фаски, ширини кільця торцевого притуплення і косини різку.

Відхилення ширини кільця торцевого притуплення – дефект геометрії торця труби, за якого вимірне значення ширини кільця торцевого притуплення виходить за межі норм за нормативно-технічною документацією на труби. За більшістю стандартів ширина кільця торцевого притуплення повинно бути у межах 1,0...3,0 мм.

Відхилення ширини кільця торцевого притуплення є наслідком відхилень по діаметру, товщини стінки, неспіввісності шпинделя трубопідрізного або труботорцювального верстата і кінців труби, затиснутої в шпинделі трубопідрізного верстата або в стаціонарному затиску труботорцювального верстата, а також наслідком підвищеної кривизни труб.

Відхилення косини різку – дефект торця труби, за якого вимірне значення відхилення від прямого кута (у градусах або в міліметрах) між твірною поверхнею труби і площиною її торця перевищує граничну норму нормативно-технічної документації на труби.

Відхилення косини різу є наслідком неправильного налаштування летючих трубодірізних верстатів з дисковою пилкою або верстатів для підрізання і торцювання кінців труб.

На сьогодні значна частина металопродукату за вимогами споживачів (особливо труб) відвантажується в пофарбованому вигляді або з нанесенням на зовнішню та/або внутрішню поверхню захисних антикорозійних покриттів.

Дефекти під час фарбування металопродукції, які трапляються найчастіше, – відшаровування і бульбашки, напливи і патьоки, кратери, пори, непрофарбовування тощо.

Відшаровування і бульбашки на покритті – дефект, що утворюється внаслідок поганої підготовки поверхні перед фарбуванням, потрапляння в стиснене повітря або лакофарбовий матеріал мастила та води, надмірно високої температури сушіння покриття, під час нанесення нового шару покриття на недосушений або пересушений попередній шар. Наявність солей на поверхні (рис. 2.99).



Рис. 2.99. Зовнішній вигляд бульбашок

Напливи, патьоки – як правило, на вертикальних, особливо рельєфних, поверхнях при нанесенні надлишкової для одного шару кількості матеріалу або заниженої його в'язкості. Існує кілька ймовірних причин утворення патьоків: це і надто велика товщина нанесеного шару фарби, і малий тиск у фарбопульти при нанесенні (фарбопульт тримали надто близько

до поверхні або перемішували надто повільно), і неправильне застосування розріджувача, і надто низька температура фарбованої поверхні або навколишнього повітря (рис. 2.100).



Рис. 2.100. Напливи на лакофарбовому покритті

Кратери – результат точкової незмочуваності забарвленої поверхні у разі потрапляння на неї гідрофобізуючих забруднень, найчастіше силіконів. Джерелом таких забруднень можуть бути тальк на гумових рукавичках, сліди полірувальних силіконовмісних складів, оливи та мазки, що потрапляють зі стисненого повітря під час пневморозпилення або іншим шляхом. Кратери також виникають через вихід назовні розчинників і повітря.

Пори і дрібні отвори («наколи») – виникають у процесі прискореного сушіння внаслідок швидкого випаровування розчинника з плівки покриття або під час використання надто легколеткого розчинника.

Непрокраси – дефект покриття, коли через плівку фарби видно нижчу підкладку. Найчастіше дефект виникає в тих місцях, де фарбування ускладнене: на нижніх панелях або гострих краях і крайках. Може бути пов'язано з поганою технікою нанесення фарби, неадекватним освітленням, малим метражем робочого простору. Також виникненню непрокрасів сприяє неправильне змішування матеріалів (погане перемішування) і застосування неправильної підкладки (грунтів).

Усунення дефектів лакофарбового покриття (ЛФП) проводиться шляхом механічного зішліфовування дефектних ділянок покриттів і повторного нанесення ЛФП. Дуже важливо провести ремонт усіх пошкоджень якомога раніше. Необхідно, щоб відремонтовані ділянки, так

само як і інші зони, на які наносилося покриття, встигли повністю затвердіти до початку експлуатації. Ремонт має здійснюватися із застосуванням тих самих лакофарбових матеріалів, які запропоновані для проведення основних робіт.

2.8. Основні дефекти, що виникають під час експлуатації металовиробів

Основні дефекти, що виникають під час експлуатації металевих виробів: тріщини від утомленості, тріщини від прикладених навантажень і корозійні пошкодження. Під час експлуатації також можливе утворення дефектів від механічних пошкоджень (забоїни, вм'ятини, надири, ризики, місцевий наклеп) [36].

Тріщини втоми – є найбільш поширеними експлуатаційними дефектами. Основна причина руйнувань від утомленостей деталей - дія високих змінних напружень. Тріщини від утомленості виникають у місцях концентрації напружень: по галтелях, у місцях із різкими переходами перерізів і наявністю підрізів, біля основи різі і зубів шестерень, у кутах шпонкових канавок, біля отворів для змащування або в місцях інших конструктивних чи технологічних концентраторів напружень. Тріщини від утомленості з'являються також у місцях дефектів металургійного і технологічного походження або слідів грубого механічного оброблення поверхні (глибоких рисок, слідів різця тощо). Тріщини від утомленості розрізняють за зовнішнім виглядом. Найчастіше вони бувають двох типів: поперечні або кільцеві тріщини, що розвиваються на циліндричних деталях по колу в перерізі, перпендикулярному до осі деталі; тріщини, розташовані під кутом до осі деталі.

Корозійні пошкодження (осередкові, міжкристалітні та ін.) зустрічаються на різних деталях. Ступінь корозійного пошкодження залежить від наявності агресивних середовищ, якості захисних покриттів, несприятливого поєднання матеріалів деталей у вузлі тощо.

Тріщини експлуатаційні – надриви в поверхневому шарі металу, що утворюються внаслідок високих одноразово прикладених напружень (розтягнення, вигинання, крутіння), коли навантаження перевищує міцність

деталі, наприклад, під час порушення технології правлення деталі, демонтажу або монтажу деталі, або під час перевантаження деталі в експлуатації.

Механічні пошкодження поверхні – дефекти у вигляді забоїн, вм'ятин, надирів, рисок та ін., які можуть утворюватися внаслідок ударів металопродукції об металоконструкції транспортних систем, під час транспортування та складування металопродукції з використанням пошкоджених механізмів і пристосувань тощо.

3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ. СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ ЯКОСТІ.

Результативність і ефективність управління якістю продукції залежить від глибини підходу до ідентифікації вимог споживачів і перетворення їх на оптимальні характеристики якості продукції, а також ступеня підготовки операційних процесів з урахуванням інформації про вимог до якості продукції та про технічні й економічні можливості підприємства.

В оцінці якості продукції завжди існує дві позиції у сприйнятті якості - позиція споживача і позиція виробника продукції. Утворюється деяка система, що являє собою єдність «протилежних» намірів, але має загальну мету - підвищення задоволеності, як споживача, так і виробника. Споживач оцінює якість з позиції її фундаментального визначення як сукупність характеристик (властивостей) об'єкта, що належать до його здатності задовольняти встановлені або передбачувані потреби через так звану «функціональну якість», яку він розуміє з позиції важливості для нього тієї чи іншої споживчої властивості або корисності. Виробник, своєю чергою, зацікавлений у тому, щоб досягти максимального ступеня відповідності характеристик продукції (послуг) установленим вимогам. У результаті можуть наставати розриви між очікуванням споживача й отриманою якістю продукції.

Запорукою успішної взаємодії виробника продукції (послуг) і споживача щодо якості, а отже, стабільного конкурентоспроможного становища підприємства на ринку є ефективно функціонуюча система менеджменту якості, складовими якої є система контролю якості та система управління якістю.

3.1. Система контролю якості продукції.

Система контролю якості продукції являє собою сукупність взаємопов'язаних об'єктів і суб'єктів контролю, використовуваних видів, методів і засобів оцінки якості виробів і профілактики браку на різних етапах життєвого циклу продукції та рівнях управління якістю [37] (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Структурно-функціональна модель системи контролю якості продукції

Ефективна система контролю якості продукції дає змогу здебільшого здійснювати своєчасний і цілеспрямований вплив на рівень якості випускної продукції попереджати всілякі недоліки та збої в роботі, забезпечувати їх оперативне виявлення та ліквідацію з найменшими витратами ресурсів.

3.1.1. Контрольовані стадії життєвого циклу продукції (ЖЦП)

Життєвий цикл продукції можна подати у вигляді сукупності виробничих процесів і споживання продукції певного виду від початку дослідження можливості її створення до припинення споживання або експлуатації, утилізації чи знищення продукції [38].

Технічний контроль якості продукції здійснюється на всіх стадіях життєвого циклу продукції. Розглянемо завдання технічного контролю на таких стадіях, як розробка, виробництво (виготовлення), експлуатація (споживання), відновлення (ремонт).

На етапі розроблення продукції основним завданням контролю якості є виявлення і запобігання явним порушенням встановлених вимог розроблення згідно зі стандартами та іншими нормативними документами, а

також помилкам у процесі проєктування виробів і оформлення технічної документації.

Основні причини порушень: недостатньо повне врахування сучасних досягнень науки і техніки, занижені вимоги стандартів, технічних умов та інших нормативних документів під час розроблення нових виробів; недостатня забезпеченість розробників необхідною інформацією про кращі вітчизняні та світові досягнення у сфері проєктування та виробництва аналогічної продукції; незадовільний облік, аналіз та узагальнення відомостей про експлуатацію аналогічної продукції споживачем; неповне врахування думки споживача щодо якості та технічному рівні нового виробу; використання нормативно-технічної документації на сировину, матеріали, напівфабрикати та комплектуючі вироби, що не забезпечує розробки нової продукції високої якості; недостатній контроль або відсутність у ряді випадків перевірки проєктів технічної документації, внаслідок чого показники технічного рівня та якості виробів, встановлені в ній, виявляються нижчими від вимог технічного завдання; незадовільне виконання своїх функцій службами стандартизації, технічного контролю та метрологічного забезпечення.

Технічна документація розробляється не тільки науково-дослідними, проєктно-конструкторськими та технологічними організаціями, а й відповідними підрозділами (відділ головного конструктора, головного технолога та ін.) підприємств. Ця технічна документація повинна піддаватися різним видам контролю (конструкторському, технологічному, метрологічному, нормоконтролю тощо), оскільки і вона відіграє важливу роль у формуванні якості продукції. Підрозділи нормоконтролю зобов'язані не тільки контролювати власну технічну документацію, а й проводити експертизу креслень і проєктів, які надходять з інших організацій, вибірково перевіряти технічну документацію на підприємствах, що постачають за кооперацією напівфабрикати та комплектуючі вироби.

На стадії підготовки виробництва має здійснюватися вхідний контроль якості сировини, матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, одержуваних за кооперацією і використовуваних у власному виробництві кінцевої продукції. Головна мета організації вхідного контролю - запобігання

використанню у виробництві вихідних компонентів продукції, що не відповідають за якістю вимогам, які ставляться до них.

На стадії виготовлення продукції технічний контроль зводиться до контролю якості та стану технологічних процесів. Під час контролю технологічних процесів головна увага приділяється перевірці дотримання технологічної дисципліни в процесі виробництва виробів. Недотримання технологічної дисципліни може бути зумовлене: недотриманням вимог технології з вини безпосередніх виконавців; використанням у власному виробництві недоброякісної сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектувальних виробів тощо, отриманих за кооперацією; несправністю або незадовільним настроюванням технологічного устаткування, несвоєчасною заміною інструменту тощо; невідповідністю устаткування, інструменту, оснащення та контрольно-вимірювальних засобів вимогам конструкторської та технологічної документації; невідповідністю обладнання, інструменту, оснащення та контрольно-вимірювальних засобів вимогам.

Контроль за дотриманням технологічної дисципліни на підприємствах має проводитися з метою: виявлення порушень вимог стандартів, технічних умов, конструкторської, технологічної та іншої нормативно-технічної документації під час здійснення технологічних процесів; виявлення причин і конкретних винуватців цих порушень; розроблення заходів, спрямованих на усунення виявлених відступів від технології та запобігання їм у подальшому.

Крім того, контролюється забезпечення досягнутих показників якості продукції в процесі її внутрішньозаводського транспортування, зберігання, пакування та відправлення споживачеві.

На стадії експлуатації або споживання продукції завданнями контролю якості є: перевірка відповідності показників якості продукції вимогам нормативно-технічної документації під час зберігання, транспортування та функціонування цієї продукції; перевірка правильності експлуатації продукції.

На стадії відновлення (ремонт) продукції завданням контролю якості є перевірка відповідності показників якості продукції вимогам нормативно-технічної документації після ремонту і технічного обслуговування цієї продукції.

3.1.2. Об'єкти і суб'єкти технічного контролю якості

Усі об'єкти технічного контролю якості тісно пов'язані з контрольованими етапами життєвого циклу продукції [38, 39]. До основних об'єктів технічного контролю якості належать:

- методи розроблення та змісту стандартів, технічних умов, конструкторської, технологічної та іншої нормативно-технічної документації, що регламентує процеси розроблення, виробництва, обігу, експлуатації та ремонту виробів (1);
- якість сировини, матеріалів, напівфабрикатів, заготовок і комплектувальних виробів, які отримують за кооперацією (2);
- якість сировини, матеріалів, напівфабрикатів, заготовок і комплектувальних виробів власного виробництва (3);
- технічний рівень і стан використовуваного обладнання, технологічного оснащення та інструменту, прогресивність технології (4);
- кваліфікаційний рівень виконавців технологічних операцій та управлінського апарату (5);
- технологічна дисципліна у виробництві та якість праці працюючих (6);
- методи технічного контролю та випробувань продукції, наявність, технічні можливості та стан контрольно-вимірювальних приладів, пристроїв та інструменту (7);
- якість виготовлених деталей, вузлів, складальних одиниць і готової продукції (8);
- якість пакування і тари, засоби і правила складування, зберігання і транспортування виробів (9);
- правила експлуатації, технічного обслуговування та діагностики виробів споживачами, їх дотримання (10);
- якість ремонту і відновлення зношених деталей, вузлів і виробів загалом, якість запасних частин, у деяких випадках - процеси утилізації (11);
- діяльність органів управління різних рівнів і ланок щодо реалізації наданих їм контрольних повноважень, процес розвитку й удосконалення

систем управління якістю продукції та технічного контролю на підприємствах, у галузях тощо (12).

Взаємозв'язок об'єктів технічного контролю з контрольованими етапами життєвого циклу продукції наведено на рис. 3.2.

Контрольовані етапи ЖЦП

Об'єкти технічного контролю

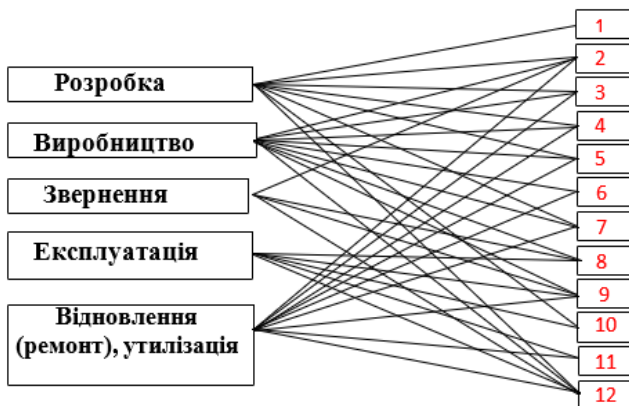


Рис. 3.2. Взаємозв'язок об'єктів технічного контролю з контрольованими етапами життєвого циклу продукції

Кожному з перелічених об'єктів контролю відповідає певний вид перевірки, що відрізняється від інших за такими ознаками:

- складом конкретних методів і засобів оцінки стану контрольованого об'єкта;
- характером, періодичністю та обсягом одержуваної та перероблюваної інформації;
- складом і специфікою засобів впливу на об'єкт, що перевіряється, за результатами контролю;
- формі організації перевірок та ін.

Усю сукупність суб'єктів контролю якості можна класифікувати за їхніми рівнями управління, на яких вони здійснюють свою діяльність, а

також за видами контролю на загальнодержавний, галузевий, міжвідомчий (міжгалузевий).

Кожному із суб'єктів контролю відповідає свій вид контролю якості, що відрізняється від інших видів такими ознаками: основні напрями й конкретні завдання перевірок; арсенал наявних засобів і методів здійснення контролю якості продукції (робіт, послуг); місце й час проведення контролю; глибина проникнення в суть явищ і ступінь охоплення всієї сукупності чинників та причин, які прямо або побічно впливають на якість продукції (робіт, послуг); рівень узагальнення результатів перевірок; сукупність важелів і каналів впливу на об'єкт.

3.1.3. Види технічного контролю

Організаційні форми та види процесів технічного контролю якості продукції дуже різноманітні [17]. Тому доцільним є їх поділ на групи за класифікаційними ознаками. Контрольні операції класифікують за: стадіями виробничого процесу, обсягом контролю, характером впливу на об'єкт контролю, ступенем механізації та автоматизації, контрольованими параметрами, організаційними формами, часом виконання, місцем виконання, виконавцями, засобами контролю.

Залежно від класифікаційної групи виділяють такі види контролю:

• За стадіями виробничого процесу:

- **вхідний контроль**, призначений для перевірки якості сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектувальних виробів, одержуваних за кооперацією, а також інструментів і пристосувань до початку виробництва;
- **поопераційний** (проміжний) контроль деталей, вузлів, заготовок тощо, що виконується під час технологічного процесу;
- **приймальний** (остаточний) контроль, що проводиться над заготовками, деталями, складальними одиницями, готовими виробами;
- контроль транспортування продукції;
- контроль зберігання продукції.

• За ступенем охоплення продукції (за обсягом перевірки):

- **суцільний контроль**, що виконується за повного (100 %-го) охоплення продукції, що пред'являється. Його застосовують: за ненадійності якості матеріалів, напівфабрикатів, заготовок, деталей, складальних одиниць,

які постачають; коли устаткування або особливості технологічного процесу не забезпечують однорідності об'єктів, які виготовляють; під час збирання в разі відсутності взаємозамінності; після операцій, які мають вирішальне значення для якості подальшого оброблення або збирання; після операцій із можливим високим розміром браку; під час випробування готових виробів відповідального призначення;

- **вибірковий контроль**, здійснюваний не над усією масою продукції, а тільки над вибіркою. Зазвичай він використовується в таких випадках: за великої кількості однакових деталей, за високого ступеня стійкості технологічного процесу; після другорядних операцій.

- **За особливостями перевірки (за характером впливу на контрольовану продукцію):**

- **руйнівний контроль**, за якого подальше використання продукції неможливе;

- **неруйнівний контроль** - контроль, який не супроводжується руйнуванням продукції (виробу).

- **За ступенем механізації та автоматизації:**

- **ручний** (немеханізований) контроль;

- **механізований** контроль;

- **автоматизований** контроль (автоматизовані системи керування якістю).

- **За контрольованим параметром:**

- **контроль за кількісною ознакою**, коли визначають числові значення одного або декількох показників, які порівнюють із нормативними значеннями;

- **контроль за якісною ознакою**, коли кожному одиницю продукції, що перевіряється, приписують до певної групи, а рішення приймають залежно від того, який виріб потрапив у кожену групу;

- **контроль за альтернативною ознакою** являє собою окремий випадок контролю за якісною ознакою, коли існують дві групи - придатні та дефектні вироби.

- **За організаційними формами виявлення та попередження браку:**

– **летючий контроль**, який виконується контролером раптово, у випадкові моменти часу (без графіка) при систематичному обході закріплених за ним робочих місць;

– **кільцевий контроль**, який полягає в тому, що за контролером закріплюється певна кількість робочих місць, які він обходить «по кільцю» періодично відповідно до годинного графіка, причому продукція проходить контроль на місці її виготовлення;

– **статистичний контроль**, що є формою періодичного вибіркового контролю, який ґрунтується на методах математичної статистики та дає змогу виявити й ліквідувати відхилення від нормального перебігу технічного процесу раніше, ніж ці відхилення призведуть до браку;

– **поточний** попереджувальний (превентивний) контроль, що виконується з метою попередження браку на початку і в процесі обробки. Він охоплює: перевірку перших екземплярів виробів; контроль дотримання технологічних режимів; перевірку матеріалів, інструментів, технологічного оснащення, які надходять у виробництво, тощо.

• **За часом виконання:**

- безперервний (наприклад, на конвеєрі або в потоці);
- періодичний.

• **За місцем виконання:**

– **стаціонарний контроль**, який виконують у стаціонарних контрольних пунктах, оснащених відповідною, в окремих випадках, складною вимірювальною апаратурою;

– **поточний контроль**, який виконують безпосередньо на робочих місцях (коли можливе застосування простих контрольно-вимірювальних інструментів або приладів; при перевірці громіздких виробів, незручних для транспортування; при виготовленні малого числа однакових виробів).

• **За виконавцями:**

– **самоконтроль** – контроль, здійснюваний безпосереднім виконавцем даної технологічної операції;

– **контроль майстрів**;

– **контроль служби технічного контролю (ВТК)**;

– **інспекційний контроль** (споживач, інспекція третьої сторони);

- **одноступеневий контроль** (виконавець плюс приймання службою ВТК);

- **багатоступеневий контроль** (виконавець плюс операційний плюс спеціальний плюс приймальний).

- **За використовуваними засобами контролю:**

- **вимірювальний** (інструментальний) контроль, який здійснюють за допомогою всіляких засобів вимірювання (які є в цьому разі засобами контролю) і застосовують для оцінки значень контрольованих параметрів виробу;

- **реєстраційний** контроль, здійснюваний для оцінки об'єкта контролю на підставі результатів підрахунку (реєстрації певних якісних ознак, подій, виробів (наприклад, кількості дефектних одиниць продукції). При реєстраційному контролі як засоби контролю можуть бути використані як органи чуття людини, так і спеціальні лічильники;

- **органолептичний** контроль, здійснюваний за допомогою тільки органів чуття без визначення чисельних значень контрольованого об'єкта; візуальний контроль – варіант органолептичного, за якого контроль здійснюється тільки органами зору. У деяких випадках під час візуального та органолептичного контролю застосовують спеціальні оптичні прилади (візуально-оптичний контроль);

- **контроль за зразком**, здійснюваний порівнянням ознак контрольованого виробу з ознаками контрольного зразка (еталона);

- **технічний огляд**, який здійснюють здебільшого за допомогою органів чуття і за необхідності із залученням найпростіших засобів контролю.

Особливим видом контролю є випробування готової продукції. У словнику термінів Європейської організації з якості (ISO) дають таке визначення: **«випробування - це визначення або дослідження однієї або декількох характеристик виробу під впливом сукупності фізичних, хімічних, природних або експлуатаційних чинників і умов».**

Випробування проводяться за відповідними програмами. Залежно від цілей існують основні види випробувань:

- **попередні випробування** – це випробування дослідних (головних) зразків для визначення можливості приймальних випробувань;

- **приймальні випробування** – це випробування дослідних (головних) зразків для визначення можливості їх постановки на виробництво;
- **приймально-здавальні випробування** – це випробування кожного виробу для визначення можливості його постачання замовнику;
- **періодичні випробування** – це випробування, які проводять один раз на 3...5 років для перевірки стабільності виробництва;
- **типові випробування** – це випробування серійних виробів після внесення істотних змін у конструкцію або технологію.

3.1.4. Елементи системи контролю якості

Система контролю якості продукції (див. рис. 3.1) складається з основних і додаткових елементів.

До числа основних елементів системи контролю якості продукції входять такі загальні підсистеми:

- планування;
- інспекційного контролю;
- стимулювання та відповідальності.

Головна мета **підсистеми планування** – складання взаємопов'язаних поточних і перспективних планів робіт з контролю якості продукції на різних рівнях управління і стадіях життєвого циклу виробів.

Головна мета **підсистеми інспекційного контролю** – постійні та цілеспрямовані перевірки стану робіт з оцінки технічного рівня та якості продукції, що випускається, удосконалення організаційних форм, методів і засобів контролю та випробувань виробів, а також визначення достовірності результатів технічного контролю та виявлення в загальній сукупності контролюючих органів, підрозділів та осіб конкретних винуватців пропуску недоброякісної продукції.

Головна мета **підсистеми стимулювання і відповідальності** – забезпечення необхідної матеріальної та моральної зацікавленості працівників у досягненні високих стабільних позитивних результатів при контролі якості продукції та здійсненні робіт з комплексного вдосконалення різних елементів системи контролю якості. У рамках цієї підсистеми встановлюється жорстка пряма залежність форм і розмірів матеріального та

морального стимулювання: контрольованих осіб від досягнення і перевищення встановленого рівня параметрів контролю; контролюючого персоналу від зміни достовірності та ефективності проведених перевірок, ступеня виконання планів контролю, наявності помилок у роботі.

Планування діяльності, контроль і стимулювання персоналу є загальною, найважливішою та невід'ємною частиною роботи з реалізації цілей і завдань усієї системи контролю якості продукції.

Як правило, системи контролю якості продукції мають додаткові елементи, які представлені низкою спеціальних і забезпечувальних підсистем.

У структурно-функціональній моделі системи контролю якості продукції можна виділити такі **спеціальні підсистеми**:

- **виявлення та попередження браку і низької якості в процесі розроблення і виробництва продукції** (включає види і методи контролю якості на етапі розроблення виробу; вхідний контроль якості сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектувальних виробів, інструменту та іншої продукції, одержуваної за кооперацією; контроль дотримання технологічної дисципліни в цехах і на дільницях; активний контроль якості, під час якого ухвалюють рішення щодо поліпшення якості продукції тощо);

- **випробувань продукції;**

- **акредитації випробувальних лабораторій;**

- **сертифікації продукції, технологічних процесів, робіт, послуг, систем якості та виробництв;**

- **атестації технологічних процесів, робочих місць і виконавців виробничих операцій;**

- **державного нагляду** за впровадженням і дотриманням стандартів, метрологічним забезпеченням виробництва та іншими умовами і факторами випуску продукції необхідної якості;

- **самоконтролю якості у виробництві;**

- **стандартизації методів і засобів контролю якості продукції;**

- **використання позавідомчих форм контролю якості** (замовниками, споживачами, продавцями тощо).

Забезпечувальними підсистемами системи контролю якості продукції є підсистеми:

- методологічного забезпечення;
- матеріально-технічного забезпечення;
- технологічного забезпечення;
- кадрового забезпечення;
- інформаційного забезпечення;
- метрологічного забезпечення;
- правового забезпечення;
- фінансового забезпечення;
- організаційного забезпечення.

Ефективність системи контролю якості продукції визначається ефективністю функціонування підсистем, що забезпечують правильне та своєчасне вирішення завдань контролю якості на різних рівнях і стадіях життєвого циклу виробів.

Ефективна система контролю якості продукції дає змогу здебільшого здійснювати своєчасний і цілеспрямований вплив на рівень якості випускної попереджати всілякі недоліки та збої в роботі, забезпечувати їх оперативне виявлення та ліквідацію з найменшими витратами ресурсів.

3.2. Система забезпечення якості

Забезпечення якості нині є обов'язковою умовою кожного виробництва. Система забезпечення якості передбачає набагато більший вплив на вироби, ніж це передбачається під час контролю якості. Нерідко під контролем якості розуміють тільки контроль і випробування виробів, хоча технологія виготовлення має значно більший вплив, ніж кінцеві операції з виготовлення виробів.

Система забезпечення якості розв'язує багато завдань, які виникають як у процесі створення виробів, так і під час їх виготовлення та випробувань. Забезпечення якості має носити систематичний та комплексний характер.

Майже всі відомі функціонуючі системи забезпечення якості мають приблизно однакову структуру і містять такі елементи: забезпечення якості під час проєктування, розробка технічної документації; закупівля, постачання, поставка комплектуючих від суміжників, маркування та контроль якості; засоби контролю, результати контролю, дослідження дефектної продукції, розробка заходів; пакування, складування,

відправлення, транспортування, документація за якістю, спостереження за рівнем якості післявідправлення; навчання працівників; статистика, аналіз і оцінка якості, а також аналіз якості; підготовка персоналу [39].

3.2.1. Міжнародні стандарти ISO 9000 система якості

Міжнародні стандарти *ISO 9000* відповідають загальній світовій тенденції, спрямованій на задоволення очікувань споживачів (покупців) щодо якості виробів. Крім того, вони відображають дедалі чіткіше розуміння в промислових колах того, що безперервне підвищення якості - необхідна передумова для успіху на ринку. Ці стандарти містять вимоги до системи якості: керівні вказівки з управління якістю та моделі забезпечення якості.

Моделі забезпечення якості, які описані в трьох міжнародних стандартах *ISO 9001*, *ISO 9002*, *ISO 9004*, що мають загальну назву «стандарти *ISO 9000*», є трьома різними формами вимог до системи якості як під час проєктування, так і під час виробництва та остаточного контролю і випробувань. Ці стандарти мають загальний характер і не залежать від конкретної галузі промисловості.

Назва «*ISO*» вживається в усьому світі для позначення Міжнародної організації зі стандартизації - «*International Organization for Standardization*». *ISO* заснована в 1947 р., є неурядовою організацією та має консультативний статус ООН. Головною метою *ISO* є розвиток стандартизації та споріднених напрямів діяльності в усьому світі.

В основу першої версії системи стандартів *ISO 9000*, розроблених у 1987 році, було покладено стандарт Британської організації зі стандартизації, що, своєю чергою, бере початок від американських стандартів якості на готову продукцію *MIL-Q-9458*, ухвалених 1959 року міністерством оборони США.

Сімейство стандартів *ISO* серії 9000 версії 2000 року є групою взаємопов'язаних стандартів, розроблених із метою допомогти організаціям усіх типів і розмірів впровадити та використовувати ефективні системи менеджменту якості (СМЯ).

Серія *ISO 9000* складається з: *ISO 9000:2015* Системи менеджменту якості. Фундаментальні принципи та словник (ДСТУ ISO 9000:2015) [41]; *ISO 9001:2015* Системи менеджменту якості. Вимоги (ДСТУ ISO 9001:2015)

[42]; **ISO/TS 9002:2017** Системи управління якістю. Настанови щодо застосування ISO 9001:2015 (ДСТУ ISO 9002:2015) [43] **ISO 9004:2018** Системи менеджменту якості. Керівні вказівки щодо поліпшення характеристик діяльності (ДСТУ ISO 9004:2018) [44]; **ISO 19011:2017** Рекомендації з аудиту систем менеджменту якості та охорони навколишнього середовища (ДСТУ ISO 19011:2018) [45].

Вперше основні терміни та визначення, що описують сучасні уявлення якості, а також базові принципи забезпечення та управління якістю товарів і послуг були визначені американськими видатними фахівцями з управління якістю Дж. Джураном [46, 47] та Е. Демінгом [48].

Основною метою будь-якого виробництва є забезпечення якості продукції, що випускається. Для досягнення цієї мети виробництво повинне тримати під контролем усі технічні, адміністративні та людські чинники, що впливають на якість виробів. Такий контроль спрямований на скорочення, усунення і, головне, запобігання невідповідностей установленим у технічних умовах на виробі вимогам.

Як правило, система якості охоплює два взаємопов'язані аспекти: запити й очікування споживача, запити й очікування виробника. Кожен із цих аспектів системи якості вимагає надання об'єктивної інформації та даних, що стосуються якості системи та якості продукції.

Відповідно до стандарту *ISO 9000*, під час виробництва продукції виробник повинен розробити документацію, оформити та підтримувати в робочому стані систему якості як засіб, що забезпечує відповідність виробів вимогам технічних умов. Для цього виробник повинен розробити керівництво з якості, що охоплює вимоги відповідного міжнародного стандарту *ISO 9000*. Це керівництво повинно містити посилання на процедури системи якості та визначати структуру документації, що використовується в системі якості.

Під час постачання виробів на ринок виробник сам може висунути потрібні йому елементи системи якості на основі вивчення попиту, новизни і вартості виробів, а також аналізу витрат і ризику.

Керівники підприємства-виробника виробу, які несуть адміністративну відповідальність, повинні визначити (документально оформити) свою

політику в галузі якості, включно із завданнями з якості та своїми зобов'язаннями з якості.

Вимоги до системи якості, встановлені в міжнародних стандартах ISO 9000, є додатковими (не альтернативними) щодо технічних вимог, установлених на виробі. Ці вимоги визначають, які з елементів необхідні для включення в систему якості.

Міжнародні стандарти ISO 9000 висувують загальні вимоги до системи якості, називаючи їх моделями для забезпечення якості, але не стосуються процедур практичного забезпечення цих вимог у виробництві - це залежить від національних та історичних традицій, людського фактора, соціальних умов. Тому практично в кожній країні є свої особливості в системі забезпечення якості.

Історично склалося, що провідне становище в питаннях забезпечення якості впродовж тривалого часу посідають підприємства Японії та США, у зв'язку з чим детальніше розглянемо досвід розроблення та функціонування системозабезпечення якості в цих країнах.

3.2.2. Японський досвід забезпечення якості продукції.

Нині Японія – загально визнаний лідер у сфері якості та надійності технічних виробів. За оцінкою провідного американського фахівця доктора Дж. М. Джурана [46, 47], спочатку японцям знадобилося близько 20 років, щоб наздогнати США, а пізніше вже американські фірми, виявивши, що вони дедалі більше програють у якості своїх товарів, зуміли шляхом енергійних заходів (зокрема, шляхом використання японського досвіду) переломити цю тенденцію. У результаті розрив у якості американських і японських виробів, принаймні, перестав збільшуватися.

Орієнтація японської промисловості на випуск продукції високої якості почалася в 50-х роках, коли було введено поняття повного контролю якості, що охоплює всю сферу виробництва.

Японські фахівці поділяють три стадії розвитку підходів до вирішення виробничих проблем і підвищення якості та надійності.

- Проблеми виявляються, аналізуються керівництвом і направляються для вирішення на нижні рівні.

- Проблеми виявляють; комплексна система управління якістю (КСУЯ) знаходить і усуває причини виникнення проблем; інформацію направляють на інші рівні організаційної структури, щоб унеможливити повторення таких проблем.

- Проблемам запобігають; потенційним проблемам та їхнім причинам вивчають до їхнього виникнення; необхідну інформацію надсилають на нижні рівні, щоб виникнення проблем можна було надійно заблокувати.

В основі японського методу бездефектного виготовлення продукції є уявлення про те, що забезпечити випуск якісної продукції легше, якщо закладати якість у виробі від самого початку, тому що внаслідок цього зростає вихід придатних, знижується вартість виробу, а процедури контролю стають майже надлишковими.

Японські розробники приділяють більше уваги і часу (ніж їхні американські колеги) «доведенню конструкції» нового виробу, тобто усуненню причин можливих відмов до запуску його у виробництво, з урахуванням досвіду розроблення та виробництва попередніх виробів.

Японські інженери проводять у 2...3 рази менше змін, ніж їхні американські колеги. Японські інженери проводять роботи в трьох основних галузях: взаємодії зі споживачами, врахуванні досвіду виробників і навчанні методів управління якістю. Для японських фірм частота технічних змін зменшується при наближенні до моменту початку випуску продукції, а для західних фірм – збільшується.

В Японії сформовано сім основних принципів комплексної системи управління якістю (КСУЯ): повний контроль виробничого процесу, наочність результатів вимірювання показників якості, дотримання вимог до якості, зупинка виробничих ліній, самостійне виправлення помилок, 100 %-ва перевірка виробів і поетапне поліпшення якості [49].

Висока якість виробів, що випускаються, забезпечується 100 %-вим вхідним контролем одержуваних матеріалів, напівфабрикатів, комплектувальних виробів. Велика увага приділяється також аналізу причин відмов продукції під час експлуатації.

Компанії використовують дуже малу кількість операцій контролю якості безпосередньо в процесі виробництва, покладаючись у цьому разі на високий рівень автоматизації технологічних операцій, максимальне

виключення людського фактора з процесу виробництва, високий професійний рівень і виробничу дисципліну робітників.

Основа вдосконалення виробництва – експериментування на реальному виробництві. Здавалося б, слово «експеримент» не сумісне із серійним виробництвом, але в Японії вважають, що немає іншого способу постійно вдосконалювати технологічні процеси.

Під час виробництва продукція (виріб) проходить через значну кількість технологічних операцій. Для запобігання браку готового виробу важливо локалізувати потенційний брак якомога раніше. Тому кожного, хто бере участь у виробничому процесі (на кожній технологічній операції), зручно розглядати як автономне виробництво зі своєю системою вхідного і вихідного контролю. Організацію вхідного і вихідного контролю на кожному робочому місці часто називають автономізацією. На перший погляд, вона суперечить статистичним методам контролю якості. Насправді, завдяки автономізації створюється стійкий потік оперативної інформації з кожного робочого місця.

Для здійснення принципу автономізації на підприємствах діє одне з головних правил для робітників - так зване «правило трьох», яке означає, що робітник повинен добре знати три операції і вимоги за якістю до них: свою операцію, попередню і наступну. Тому брак, пропущений попереднім робітником, не повинен пройти на наступну операцію.

Щоб інформація, яку збирають під час автономізації, давала ефект, кожен робітник має можливість зупиняти весь технологічний процес, якщо він стикається з труднощами, що загрожують появою браку. При кожній зупинці майстер і робітники його бригади намагаються з'ясувати й усунути труднощі, що виникли. Після цього процес триває.

Безумовно, зупинка технологічного процесу і пов'язані з ним затримки - це додаткові витрати, таким чином різко знижується ймовірність пропуску на наступну операцію завідомо бракованих деталей або виробів, що наближає підприємство до реалізації принципу бездефектності.

Випадкова відмова обладнання (аварія) може поставити виробництво на межу катастрофи, тому різко зростає роль догляду за обладнанням: його налагодження, профілактика, планові ремонти, штатна експлуатація, нарешті, просто підтримання чистоти на робочому місці.

Якщо на деяких робочих місцях сигнал про зупинку виробництва запалюється частіше, ніж на інших, то це означає, що в процесі виявилось вузьке місце. Усунення вузьких місць – неодмінна умова вдосконалення технологічного процесу. На великому виробництві з великою кількістю дільниць залучити до аналізу і вирішення кожної проблеми інженерні служби підприємства нереально (на одночасне вирішення всіх проблем, що виникають, не вистачить інженерного ресурсу). Рішення знайдено в організації гуртків якості.

Річ у тім, що саме робітники безпосередньо на своїх місцях мають у своєму розпорядженні максимум інформації про реальний стан речей. А гурток якості - прекрасна форма організації дозволяя груп друзів-однодумців, кровно зацікавлених у вдосконаленні своєї справи. Тим більше, що цей процес нескінченний.

Японська концепція «гуртків якості» ґрунтується на тому, що робітники самі повинні знати, аналізувати і вирішувати проблеми якості. Дві третини часу роботи гуртка займає навчання, решту часу - розв'язання конкретних проблем. Основне завдання – пошук, вивчення та розв'язання практичних питань зі зменшення браку: удосконалення технології, модернізація устаткування, зниження витрат виробництва та поліпшення організації праці. Завдяки організації «гуртків якості» підприємцям вдалося залучити робітників до діяльності із забезпечення якості продукції, що випускається. Як правило, результатом створення «гуртків якості» є зростання продуктивності праці та якості продукції через 4...6 місяців після початку роботи гуртка.

При цьому важливе значення надається підвищенню освітнього рівня і кваліфікації персоналу, поліпшенню морального клімату на виробництві, підвищенню активності робітників, зростанню престижу фірми на ринку завдяки поліпшенню якості її продукції. Важливою є та обставина, що більшість робітників японської фірми трудиться на одному місці все життя. Таке стабільне закріплення робочої сили поряд із продуманою системою матеріального і морального стимулювання є найважливішим чинником підвищення якості продукції.

Японська промисловість зрозуміла раніше за багатьох, що висока якість є не тільки важливим чинником збуту і зниження витрат, а й сприяє

зростанню продуктивності праці. Скорочення браку, на їхню думку, рівнозначно розширенню збуту товарів, вироблених за незмінної кількості зайнятих, за умови зменшення необхідного контролю, доробок і складських приміщень. За оцінками американських експертів, зниження частки браку на 2 % викликає зростання продуктивності праці на 10 %.

Загальний підхід до методів підвищення якості продукції, що існує в Японії, можна узагальнити так:

- врахування принципу вихідного потоку – чим далі від початку конвеєра або виробничого циклу, тим нижча якість продукції;
- забезпечення принципу «колега наступної операції – твій покупець»;
- виховання особистої відповідальності за якість роботи, оскільки ані інструкція, ані наказ не можуть гарантувати якість роботи;
- помилка під час роботи на конкретній технологічній операції вдруге не повинна повторитися. Якщо повторюється помилка, технологічний процес зупиняється;
- розвиток творчого потенціалу під гаслом: «Нормальна людина погано не працює, погано працювати соромно»;
- якість і поспіх несумісні. Розробка й особливо впровадження такої системи якості займає сумарно від 3 до 5 років.

3.2.3. Досвід забезпечення якості на американських підприємствах

Уже в 1980-х роках будь-яка американська фірма, що працює в галузі високорозвиненої та складної технології, без програми забезпечення якості ризикувала програти виробам зарубіжного виробництва, насамперед японським, що мали на той час незмінно високу якість.

У процесі ліквідації розриву за якістю виробники у США розробили нові методологічні принципи, які складаються з підвищення уваги до потреб замовника, зміцнення тісніших ділових зв'язків між постачальниками та замовниками, збільшення частки участі постачальника продукції в циклах проектування споживачів і створення загальних баз даних щодо якості та надійності [50].

У США вважають, що кожна фірма в питанні організації робіт із забезпечення високої якості виробів повинна сформувати свою технічну

політику, оскільки, на їхню думку, запозичення з іншого боку користі не приносить.

Пошуки підходу фірм до випуску масових видів продукції привели до обґрунтування концепції «нульового рівня дефектів», а також концепції «безоплатної якості», які й стали реалізовуватися багатьма фірмами різних галузей промисловості. Остання названа так тому, що її мета – витратити на забезпечення якості менше, ніж втрачається через брак.

Під час виробництва з «нульовим рівнем дефектів» передбачається, що жоден працівник, жодна автоматична або інша система не можуть допустити появу або пропуск дефекту, випадкового або малоймовірного, ні через забудькуватість, ні через випадкову необережність. Цей принцип передбачає усунення випадковостей, зокрема тих, що виникають через недостатню тренованість, недисциплінованість та інші випадкові причини появи дефектів, а також наявність абсолютної системи контролю. Досвід роботи показує, що більше половини дефектів виробів, що виявляються в процесі виробництва, мають причиною саме ці випадкові явища. Принцип «нульового рівня» передбачає таку систему виробництва, яка дає змогу виявляти дефекти, знаходити причини появи цих дефектів і усувати можливість повторення таких дефектів у майбутньому.

Ця система в принципі складається з трьох елементів: виявлення дефекту, його усунення та ведення процесу регулювання способів і засобів виробництва для попередження появи цього дефекту надалі. Методи регулювання, що задаються процесом «нульового дефекту», мають бути ґрунтовними, тобто вони мають істотно вдосконалювати виробництво, щоб напевно попередити появу дефектів у майбутньому.

Американські виробники поставили таку мету: забезпечити таку високу якість виробів, щоб після одержання їх споживачем, одразу можна було б без вхідного контролю починати використання (експлуатацію). Для цього рівень якості виробів має характеризуватися одиницями відмов на мільйон поставлених.

Крім того, як вважають американські підприємці, необхідним є отримання результатів з різким, а не поступовим поліпшенням якості. При цьому наголос робиться на методологію, яка розширює боротьбу за

підвищення якості, поширюючи її за межі самого виробу. Керівники і фахівці в цій галузі називають це «тотальним управлінням якістю» (ТУЯ).

Філософія ТУЯ виникла в США, була випробувана в 30-х роках ХХ ст. на деяких підприємствах і мала успіх на практиці, але потім була забута. Успіхи японської промисловості після другої світової війни значною мірою були зобов'язані застосуванню ідей ТУЯ. Ідеї ТУЯ, у принципі, полягають у тому, щоб безперервно вдосконалювати організацію виробництва і конструкцію виробів, їхню якість, ефективність виробництва та роботи всього підприємства.

Філософія ТУЯ вимагає участі в роботах кожного члена колективу. Без участі кожного ця система неможлива, саме тому тут потрібна нова структура організації роботи підприємства. Вона не може бути реалізована короточасними змінами; це не одноразово досяжна мета, це процес безперервних удосконалень, безперервного поліпшення організації, безперервного вдосконалення якості роботи. Кожне, навіть дрібне вдосконалення встановлює нові цілі, ставить нові завдання.

Система охоплює і доповнює всі інші вже діючі програми, спрямовані на підвищення якості продукції. Поряд із гарантією якості вони передбачають поставки точно за графіком, комплексну автоматизацію виробництва, проектування з урахуванням високо-керованого виробництва. Інакше кажучи, ця концепція заснована на тому, щоб кожен на своєму робочому місці в будь-якому підрозділі фірми відігравав певну роль у справі поліпшення виробництва, спрямовану на підвищення якості виробів, які випускаються [51].

Ідеологи цієї методології виділяють чотири основні принципи, які мають бути покладені в основу ефективної програми:

- показати необхідність безпомилкової роботи – це не заклик не робити помилки, а заклик усувати їх так, щоб вони не з'являлися знову;
- виконувати всі вимоги змінного завдання, використовуючи для цього правильно вибрані інструменти, прилади та пристосування і зробивши своїм девізом сталість умов роботи;
- замість звичайної реєстрації дефектних виробів, що з'явилися, потрібно вживати заходів з випередженням, що залежить від витрачання коштів на підтримання необхідного рівня якості та запобігання помилкам;

- оцінити програму шляхом встановлення «вартості якості».

Для впровадження системи ТУЯ потрібно, щоб керівники визнали якість найважливішим фактором успіху на світовому ринку, а потім у її реалізації має брати участь увесь штат фірми, тому що в будь-якому типовому виробництві, пов'язаному з високорозвиненою технологією, практичний контакт із самою продукцією мають лише близько 15 % співробітників. Але діяльність інших 85 % настільки ж істотна, оскільки вони беруть участь у замовленні та отриманні матеріалів, комплектуючих, оцінці їхньої якості, забезпеченні надійності роботи устаткування, якості енергоносіїв тощо.

Принцип ТУЯ передбачає таку систему організації виробництва, за якої виявлення дефекту у виробі повинно мати наслідком дослідження способу виробництва, інструменту, вихідних матеріалів тощо з метою виявлення причини дефекту та усунення можливості повторення таких дефектів у перспективі. Слід зазначити, що можливі різні варіанти організації системи ТУЯ. Важливо тільки, щоб роботи з удосконалення якості продукції, ефективності виробництва, удосконалення технологічного процесу були безперервними, стали турботою всього колективу, всіх підрозділів підприємства.

3.2.4. Розвиток систем забезпечення якості на підприємствах України

Розроблення та розвиток системного підходу до забезпечення якості в промисловості України розпочалося в 70-х роках ХХ століття на основі японського та американського досвіду.

Спочатку метою розроблення систем забезпечення якості було створення умов для випуску бездефектної продукції і здачі її з першого пред'явлення.

Система бездефектного виготовлення продукції та здачі її з першого пред'явлення виходить з простої і зрозумілої істини, що якість кінцевої продукції залежить від роботи всіх виробничих ланок, кожного робітника. Для виготовлення якісної продукції в точній відповідності з вимогами стандартів і технічних умов необхідно забезпечити високоякісне виконання

кожної операції: від контролю вихідної сировини та напівфабрикатів і монокристалічних злитків до випуску придатних виробів.

На багатьох підприємствах процеси виготовлення продукції та контроль її якості часто були штучно розірвані. Вважалося, що обов'язок робітників - виконувати намічені виробничі операції, а перевірка якості – справа контролерів відділу технічного контролю (ВТК). Контролери пропускали деталі на наступні технологічні операції, бракували їх або повертали на виправлення. В останньому випадку контролер оформляв «відомість дефектів», щоб потім можна було перевірити, як їх усунуто. Для їх усунення на підприємствах часом були змушені виділяти додаткові групи робітників і контролерів.

В умовах системи бездефектного виготовлення продукції змінюються функції працівників ВТК. Їхнім головним завданням стає не відокремлення придатної продукції від бракованої, не реєстрація дефектів, а контроль за нормальним перебігом виробництва, за безумовним дотриманням кожним працівником заданого технологічного процесу, а також вжиття своєчасних заходів для запобігання можливим помилкам.

Система бездефектного виготовлення продукції та здавання її з першого пред'явлення передбачає правило, що не допускає винятків: виконавець пред'являє ВТК роботу тільки після того, як сам переконається у відсутності дефектів. Для цього він зобов'язаний перевірити, чи повністю виготовлені вироби відповідають чинним технічним умовам (ТУ). Пред'явлення виробів із відхиленням від вимог технічної документації розглядається як спроба здачі недоброякісної продукції. У разі виявлення на першому ж виробі відмінностей від вимог документації вся партія повертається на доопрацювання.

Система передбачає регулярне проведення в кожному виробничому підрозділі (раз на тиждень) і на підприємстві (раз на місяць) «днів якості». На них детально аналізують показники, що характеризують загальний стан і рівень якості виготовлення продукції в цехах і по заводу загалом. найважливіші з них такі:

- повернення продукції інших цехів (кількість деталей, вузлів, виробів або партій, відсторонених від приймання після виявлення першого дефекту);

- повернення продукції з контрольних постів ВТК усередині цехів (кількість повернутих вузлів, деталей або партій);
- виконання щомісячних планів організаційно-технічних заходів, спрямованих на підвищення якості;
- стан культури виробництва;
- брак виробів у відсотках від загального випуску;
- кількість отриманих від споживачів рекламаций та їхні причини.
- висновки, зроблені на «дні якості», а також ухвалені рішення беруться під особливий контроль ВТК. На їхній основі розробляються заводські та цехові плани з підвищення якості продукції, де вказуються точні терміни проведення заходів і відповідальні за це особи.

Дієвість системи посилюється заходами морального і матеріального стимулювання. Що вища і стабільніша якість продукції, то вища матеріальна винагорода.

Надалі за прикладом передових за якістю західних і японських фірм у країні розпочали здійснення впровадження систем стандартів *ISO* серії 9000.

3.3. Розвиток систем забезпечення якості в сучасних умовах. Основні принципи побудови систем забезпечення якості

Ядром сучасної концепції забезпечення якості є наступний постулат: «Зберігається головна мета – споживач повинен одержувати тільки придатні вироби, тобто вироби, що відповідають стандартам. Відбраковування зберігається як один із важливих методів забезпечення якості. Але основні зусилля слід зосередити на управлінні виробничими процесами, забезпечуючи збільшення відсотка виходу придатних виробів» [52].

Упровадження сучасної концепції забезпечення якості в практику виробничих підприємств дало змогу значно підвищити ефективність виробництва за досить високої якості виробів і послуг, що створило умови для формування глобального ринку товарів і послуг.

Водночас зростало розуміння того, що кожен виробничий процес має певну межу виходу придатних виробів, і ця межа визначається не процесом самим по собі, а системою, тобто всією сукупністю діяльності підприємства, організації праці, управління, в якій цей процес протікає. При досягненні цієї межі з новою гостротою діє те саме протиріччя, що й на попередній стадії –

цїлі підвищення ефективності виробництва та підвищення якості виробів стають суперечливими.

Нині на зміну загальному управлінню якістю прийшов загальний менеджмент якості (*TQM*). Основою концепції *TQM* стали:

- ідея, що більша частина дефектів виробів закладається на стадії розроблення через недостатню якість проєктних робіт;

- перенесення центру тяжіння робіт зі створення виробу з натурних випробувань дослідних зразків або партій на математичне моделювання властивостей виробів, а також моделювання процесів виробництва виробів, що дає змогу виявити й усунути конструкторські та технологічні дефекти ще до початку стадії виробництва;

- місце концепції «нуль дефектів» посїла концепція «задоволеного споживача»;

- високу якість необхідно надати споживачеві за прийнятну ціну, яка постійно знижується, оскільки конкуренція на ринках дуже висока і постійно зростає.

До *TQM* включається також і забезпечення якості, яке трактується як система заходів, що зумовлює у споживача впевненість у якості продукції (рис. 3.3.).

Таким чином, головна цїльова установка систем якості, побудованих на основі стандартів *ISO* серії 9000, – забезпечення якості продукції, що її вимагає замовник, і надання йому доказів у здатності підприємства зробити це.

Якість належить до категорії складних і динамічних понять. Об'єктами, якістю яких можна оцінити, є не тільки продукція, до категорії якої можуть входити послуги або елементи послуг, а й увесь комплекс понять виробничо-збутової сфери (рис. 3.4). Динамічність категорії «якість» полягає в тому, що вимоги до якості оцінюваних об'єктів, очікування від них змінюються дуже швидко. Те, що сьогодні відповідає вимогам ринку, завтра застаріває, стає недостатнім для задоволення потреб покупця, тобто недостатньої якості.

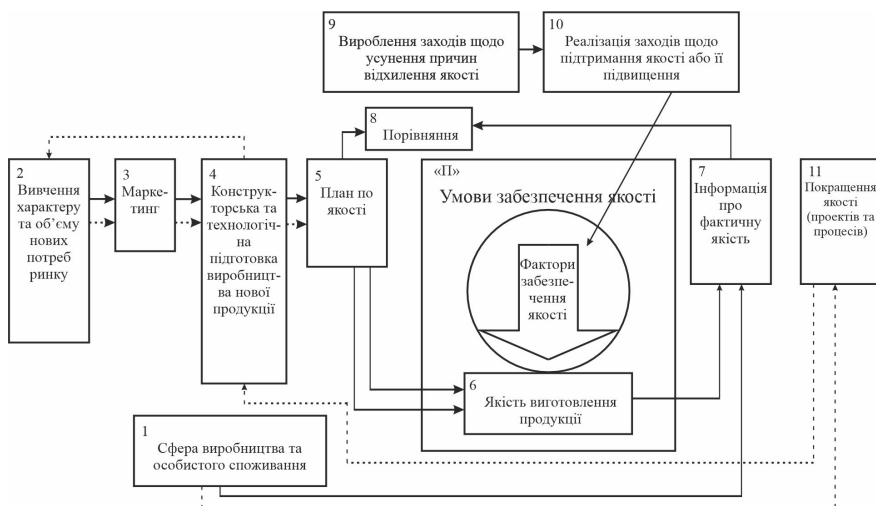


Рис. 3.3. Умови забезпечення якості



Рис. 3.4. Об'єкти, на які поширюються вимоги до якості

Для визначення якості об'єкта необхідно: встановити необхідні характеристики об'єкта на підставі аналізу потреб, визначити реальні

характеристики об'єкта, порівняти реальні та необхідні характеристики об'єкта. Потреби поділяють на встановлені та передбачувані (рис. 3.5).

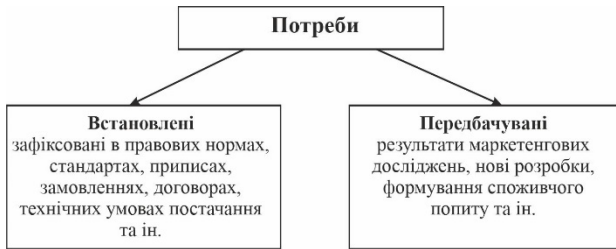


Рис. 3.5. Встановлені та передбачувані потреби

Установлені потреби зафіксовані в правових нормах, стандартах, приписах, замовленнях, договорах, технічних умовах поставок та інших документах. Прикладами встановлених потреб є вимоги, які обумовлюються під час укладення контракту, вимоги законодавства до виконання умов охорони довкілля або ті, що стосуються безпеки. Невиконання більшості встановлених вимог спричиняє адміністративну, матеріальну або правову відповідальність.

Передбачувані потреби мають бути виявлені та визначені. Маються на увазі очікування, які, зазвичай не формулюються конкретно, проте належать до стійких побажань. Наприклад, передбачувані потреби стосовно такого об'єкта, як організаційна структура підприємства, – це відсутність простоїв, гнучка і закономірна залежність продуктивності праці та результатів роботи співробітників від їхньої зарплати, результативність дій керівників. До передбачуваних потреб належать також естетичні вимоги; відповідність продукції моді, звичкам споживачів, національним, культурним особливостям тощо.

Потреби мають такі особливості: змінюються з часом, що передбачає проведення періодичного аналізу вимог до якості; можуть переводитися в характеристики продукції на основі встановлених критеріїв (функціональна придатність, надійність, безвідмовність, ремонт придатність, безпека тощо) або невстановлених (модність, естетичність); мають кількісне вираження

(технічні характеристики, параметри процесів) або не мають таких характеристик (колір, форма).

Отже, у розглянутий момент часу потреби можуть бути виражені кількісно або якісно і відображені в характеристиках об'єкта. У зв'язку з цим вимоги до якості можна сформулювати як вираження певних потреб або їх переведення в набір кількісно або якісно встановлених вимог до характеристик об'єкта, що дають змогу встановити їхнє виконання та провести перевірку.

Вимоги до якості повинні, по можливості, максимально відображати встановлені та передбачувані потреби споживача. Термін «вимоги» охоплює ринкові та контрактні вимоги (вимоги щодо зовнішніх сторін), а також внутрішні вимоги організації. Вимоги до якості мають бути документально оформлені.

Нині ключового значення набули вимоги суспільства до якості, які передбачають захист навколишнього середовища, охорону здоров'я, безпеку, надійність, збереження енергії та природних ресурсів. Вимоги суспільства до якості містять юридичні і нормативні вимоги.

3.3.1. Побудова системи менеджменту якості. Застосування принципу відображення якості та петля якості

Продукція (послуга) з'являється в результаті здійснення цілої низки процесів. Якість кожного з цих процесів впливає на якість результату. Водночас, процес – це сукупність взаємопов'язаних ресурсів і діяльності, яка перетворює вхідні елементи на вихідні. До ресурсів можуть належати персонал, засоби обслуговування, обладнання, технологія та методологія.

Принцип відображення якості полягає в перенесенні (відображенні) якості процесу на якість результату. Таким чином, впливати на якість кінцевого результату можна за допомогою впливу на процеси, що його формують, оскільки всі процеси є елементами системи, в якій вони функціонують.

Якість кінцевого результату (продукції, послуги) успадковує якість процесів (процеси закупівель, маркетингу, проектування, виробництва тощо) і якість організаційно-управлінської системи (рис. 3.6).

Принцип відображення якості є одним з основних принципів менеджменту якості. Управління якістю кінцевої продукції, послуги здійснюється за допомогою управління якістю всієї системи. Якість системи відбивається на якості процесів і відповідно на якості результатів.

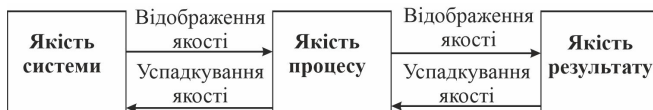


Рис. 3.6. Принцип відображення якості

Згідно з принципом відображення вимоги до якості результату діяльності підприємства покладаються на вимоги до якості процесів та організаційно-управлінської системи (рис.3.7).



Рис. 3.7. Відображення якості виробничої сфери на якості результату діяльності підприємства

До процесів, якість яких відображається на якості продукції, належать не тільки технологічні процеси, а й організаційні, управлінські тощо. Якість

процесів залежить від багатьох чинників. Наприклад, якість процесу виробництва забезпечується якістю обладнання, технологій, рівнем кваліфікації персоналу тощо. Якість процесу управління залежить від знань і досвіду керівництва, якості застосовуваних методів управління тощо. Якість системи забезпечується раціональною організаційною структурою, правильним розподілом відповідальності, механізмами взаємодії, мотивації тощо.

Петлю якості відповідно до міжнародних стандартів *ISO*, розуміють як замкнутий у вигляді кільця життєвий цикл продукції, що будується на базі аналізу основних стадій формування та зміни показників якості (рис. 3.8). Основу моделі становить ланцюжок послідовних видів діяльності, якість яких відбивається на показниках якості продукції. Вона планується і формується у виробничій сфері та зазнає змін у споживчій сфері. Характеристики продукції можуть бути змінені за допомогою впливу на будь-які або всі складові петлі якості.



Рис. 3.8. Петля якості

Петля якості є концептуальною моделлю взаємозалежних усіх видів діяльності, що впливають на якість продукції (послуг) на різних стадіях: від визначення потреб до оцінки їх задоволення і наочно показує послідовне відображення якості процесів на якості кінцевого результату. Узагальнена якість результату являє собою сукупність проектної, виробничої та експлуатаційної якості (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Відображення якості процесів життєвого циклу продукції (послуг) на якість результату

Якість процесів життєвого циклу	Якість результатів
Процеси маркетингу та проєктування	→ Проектна якість
Процеси виробництва	→ Виробнича якість
Процеси експлуатації	→ Експлуатаційна якість

Проектна якість відображає процеси планування якості продукції. Планування якості починається в процесі маркетингових досліджень. Якість маркетингових досліджень - це перший фактор, що визначає якість майбутнього товару. Планування якості продовжується в процесі проєктування продукції та розроблення процесів.

Виробнича якість відображає процеси формування якості продукції. Формування якості починається із закупівлі матеріалів і закінчується моментом здачі продукції споживачеві. Формування якості продукції не рівнозначне формуванню запланованих характеристик продукції, яке завершується одночасно із завершенням технологічного ланцюжка виробництва. Якість продукції визначається задоволеністю споживача, тому залежить не тільки від характеристик виробленої продукції, а й від якості упаковки, своєчасності доставки, якості збуту. Види діяльності, що формують якість продукції, – це закупівлі, виробництво продукції (надання послуг), перевірка готової продукції, пакування та складування, збут і продаж, монтаж і здавання в експлуатацію.

Експлуатаційна якість відображає процеси зміни якості продукції. На якість продукції, що перебуває в експлуатації, впливає якість процесів

експлуатації, сервісного обслуговування та проведених ремонтів (рис. 3.9). Досвід експлуатації необхідний для подальшого вдосконалення продукції.

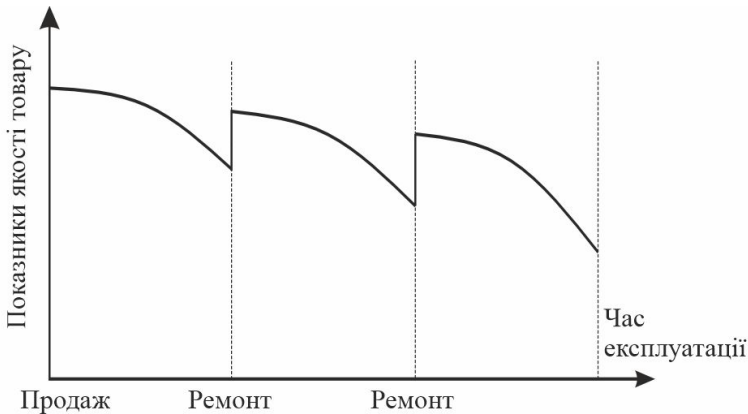


Рис. 3.9. Зміна якості товару в процесі експлуатації

Останнім етапом життєвого циклу продукції є утилізація або вторинна переробка. Якість таких процесів регламентована екологічними, санітарними та іншими нормами. Цим завершується процес, модель якого заведено називати петлею якості.

Складові петлі якості: маркетинг і вивчення ринку, проєктування та розробка продукції, проєктування і розробка процесів, закупівля матеріалів, виробництво та надання послуг, перевірка, пакування та складування, збут і продаж, монтаж і здача в експлуатацію, експлуатація, технічна допомога й обслуговування, утилізація або вторинне перероблення після закінчення терміну експлуатації. Усі ці види діяльності в різних формах притаманні як компаніям, що виробляють продукцію, так і компаніям, що надають послуги.

Стандартом *ISO 9001* виділено такі ключові аспекти в забезпеченні якості:

- якість, зумовлена призначенням продукції. Така якість є результатом маркетингових досліджень, зумовлена призначенням продукції та доведенням її рівня до такого, що відповідає потребам і можливостям ринку;

– якість, зумовлена проєктуванням продукції. Ця якість зумовлена закладеними в конструкцію продукції характеристиками, які впливають на її очікувані експлуатаційні властивості в різних умовах використання та експлуатації;

– якість, забезпечена відповідністю конструкції. Така якість формується в процесах виробництва і зумовлена контролем за дотриманням відповідності конструкції, закладеним у неї характеристикам;

– якість, зумовлена технічним обслуговуванням. Ця якість обумовлена налагодженим обслуговуванням продукції та відповідністю умов експлуатації встановленим вимогам.

Як ми бачимо, управління якістю продукції здійснюється циклічно і проходить через певні етапи, іменовані циклом Демінга [53].

Поняття циклу Демінга не обмежується тільки управлінням якістю продукції (послуг), а стосується будь-якої управлінської діяльності. Послідовність етапів циклу Демінга умовно показано на рис. 3.10 і включає: планування (*plan*), здійснення (*do*), контроль (*check*) і управління впливом (*action*).



Рис. 3.10. Цикл Демінга

Таким чином, при управлінні якістю з метою забезпечення системності цього процесу необхідно об'єднати петлю якості з циклом Демінга, що стане сутністю системи менеджменту якості та характеризуватиме всі дії протягом життєвого циклу продукції, а повнота видів діяльності характеризуватиме ступінь комплексності процесу управління якістю за окремими видами продукції.

Слід зазначити, що управління якістю відрізняється від контролю якості, який здебільшого зводиться до виявлення дефектів продукції та відхилень від установлених показників, тобто до відокремлення якісних виробів від поганих. При цьому потрібно розуміти, що якість не може бути змінена в результаті контролю.

На відміну від контролю, управління якістю має справу з усією системою розроблення, виготовлення, споживання (експлуатації) та утилізації продукції, і її головним завданням є встановлення причин дефектів і відхилень, де б вони не виникали, а потім усунення цих причин і забезпечення виробництва якісної продукції.

3.3.2. Напрями розвитку функціональних можливостей систем менеджменту якості

У сучасних динамічно мінливих умовах функціонування фінансових і товарних ринків для бізнесу стають критичними питання зниження витрат, утримання клієнтів і підвищення швидкості реагування на мінливі зовнішні умови. Умови, в яких компанії опиняються в період рецесії, можуть розцінюватися як можливість отримання нових навичок, які були мало затребуваними на етапі бурхливого економічного зростання, – навичок із безперервного підвищення ефективності операційної діяльності та зниження витрат. Ці навички, зрештою, – єдині, які забезпечують формування й утримання довгострокових конкурентних переваг. Компанія може переслідувати різні цілі в процесі оптимізації операційної діяльності залежно від свого поточного становища та поставлених стратегічних завдань: досягнення лідерських позицій на ринку завдяки створенню стійких конкурентних переваг; збільшення простору для реструктуризації боргів завдяки зниженню потреби в робочому капіталі та підвищенню швидкості оборотності капіталу; збільшення вартості компанії під час її продажу;

отримання підтримки від держави. Крім того, підхід до оптимізації операційної діяльності може різнитися залежно від масштабу бажаних змін: безперервне вдосконалення діяльності шляхом реалізації точкових проєктів, які дають змогу досягти швидких результатів за короткі строки, або докорінна реконструкція та диверсифікація бізнесу. У цьому підході відбувається оптимізація всього бізнес-процесу або вдосконалення окремої функціональної сфери (наприклад, оптимізація системи закупівель або системи обслуговування клієнтів); реалізація комплексних програм трансформації операційної діяльності, у результаті чого може відбуватися як радикальна перебудова основних бізнес-процесів, так і повна зміна операційної моделі компанії, спрямована на досягнення якісно нових результатів діяльності.

Незалежно від масштабу змін та їхніх цілей, наразі існує перевірений і надійний інструмент, що дає змогу компаніям домогтися радикального підвищення операційної ефективності й утримувати лідируючі позиції на ринку – методологія *Lean Six Sigma*. Методологія *Lean Six Sigma* з'явилася в результаті об'єднання методів Ощадливого виробництва (*Lean*), основою якого є скорочення втрат і прискорення процесів, і Шість сигма (*Six Sigma*), основою якого є поліпшення якості та підвищення задоволеності клієнтів.

Обидва методи мають тривалу історію успішного застосування, проте саме досвід їхнього спільного використання продемонстрував досягнення найбільшого ефекту. Нині методологію *Lean Six Sigma* успішно застосовують провідні компанії світу в усіх секторах економічної діяльності.

Методологія «**Шість сигма**» (англ. *Six Sigma*) – концепція управління виробництвом була розроблена в корпорації *Motorola* її співробітником Білом Смітом у 1986 р. і набула великого поширення в середині 1990-х років після того, як Джек Велч застосував її як ключову стратегію в *General Electric* у багатьох галузях промисловості, і навіть у сфері послуг. Суть концепції зводиться до необхідності поліпшення якості виходів кожного з процесів, мінімізації дефектів і статистичних відхилень в операційній діяльності. Концепція використовує методи управління якістю, зокрема статистичні методи, вимагає використання вимірюваних цілей і результатів, а також передбачає створення спеціальних робочих груп на підприємстві, які здійснюють проєкти з усунення проблем і вдосконалення процесів [59].

Назва походить від статистичного поняття середньоквадратичного відхилення, що позначається грецькою літерою σ . Зрілість виробничого процесу в цій концепції описується як σ -рейтинг відхилень, або відсотком бездефектної продукції на виході. Так, процес управління якістю 6σ на виході дає 99,99966 % виходів без дефектів, або не більше 3...4 дефектних виходів на 1 млн операцій. *Motorola* встановила як мету досягнення показника якості 6σ для всіх виробничих процесів, і саме цей рівень дав найменування концепції.

Великий вплив на розроблення концепції справили такі методології, як управління якістю, загальне управління якістю, теорія бездефектності продукції, що ґрунтуються на роботах Шухарта, Демінга, Джурана, Ісікави, Тагуті.

Методологія «шести сигм» має кілька відмінних рис від попередніх методик управління якістю, які виражаються в такому:

- результати кожного проєкту мають бути вимірюваними і виражатися в кількісному відношенні;
- вище керівництво більшою, ніж раніше, мірою розглядається як сильний і харизматичний лідер, на якого можна покластися;
- створення спеціальної системи присвоєння звань фахівцям методики за аналогією зі східними єдиноборствами – «чемпіон», «чорний пояс», що веде до кращого засвоєння концепції серед працівників;
- ухвалення рішень тільки на основі інформації, що піддається перевірці, без припущень і припущень.

«Шість сигм» є зареєстрованим знаком обслуговування і торговельною маркою компанії *Motorola*. Серед інших компаній, які першими почали застосовувати концепцію і домоглися позитивних результатів, відзначаються *Honeywell*, *General Electric*. Наприкінці 1990-х років понад 60 % організацій, що входять до списку *Fortune 500*, почали в тому чи іншому вигляді застосовувати «шість сигм».

У 2000-ті роки широкого застосування набуло спільне застосування концепцій «шести сигм» і ощадливого виробництва (англ. *Lean Six Sigma*).

У 2011 році Міжнародна організація зі стандартизації (*ISO*) випустила два стандарти, присвячені методології шести сигм, зокрема, були

стандартизовані основні принципи системи і методологія *DMAIC* (аббревіатура від англ. *define, measure, analyze, improve, control* – визначення, вимір, аналіз, вдосконалення, контроль) [54]:

– *ISO 13053-1:2011* «Кількісні методи в процесах поліпшення. Шість сигм. Частина 1: методологія DMAIC»;

– *ISO 13053-2:2011* «Кількісні методи в процесах поліпшення. Шість сигм. Частина 2: інструменти та техніки».

Апроксимацією моделі «шести сигм» є крива нормального розподілу (рис. 3.11). По вісі абсцис відкладають значення середньоквадратичного відхилення, позначуваного σ , що показує відстань від математичного сподівання μ до точки перегину кривої. Величина розкиду значень кривої перебуває в прямій залежності від значення середньоквадратичного відхилення – σ . З такого графіка випливає: виріб, який відповідає поставленим вимогам, займає на осі абсцис положення в нулі, і, якщо він кращий за потрібний, – правіше за нуль, якщо гірший – лівіше. Бувають випадки, коли і відхилення в більший бік – недолік виробу. Що більше в усій кількості випущених виробів, які точно задовольняють вимоги, то вища крива в нулі.

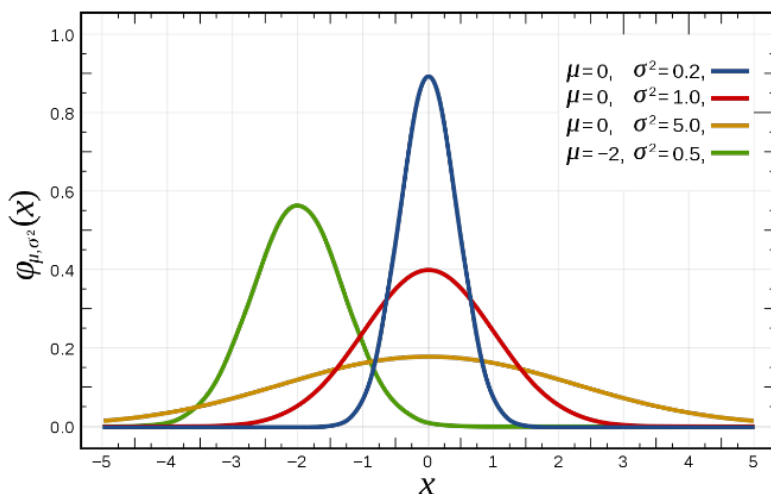


Рис. 3.11. Криві апроксимації моделі 6 Сигма- 6 σ

Природно, що виробництво прагне отримати процес, що описується на графіку синьою кривою, можливо червоною, але не жовтою або зеленою.

Методологія «шести сигм» ґрунтується на таких основних принципах:

- для успішного ведення бізнесу необхідно постійно прагнути до встановлення стійкого і передбачуваного перебігу процесів;
- показники (KPI), що характеризують перебіг процесів виробництва і бізнес-процесів, мають бути вимірюваними, контрольованими і поліпшуваними, а також відображати зміни в перебігу процесів;
- для досягнення постійного поліпшення якості необхідне залучення до процесів забезпечення якості персоналу організації на всіх рівнях, особливо вищого керівництва.

При цьому мають дотримуватися базових умов: щирий інтерес до клієнта; управління на основі даних і фактів; орієнтованість на процес, управління процесом і вдосконалення процесу; попереджувальне (активне) управління; прозорість внутрішньо-корпоративних бар'єрів; прагнення до досконалості плюс поблажливість до невдач.

Ключовим принципом під час реалізації проєктів удосконалення процесів «Шість сигм» є цикл Демінга або послідовність етапів *DMAIC* (англ. *Define* – визначай, *Measure* – вимірюй, *Analyze* – аналізуй, *Improve* – покращуй, *Control* – контролюй), що розпочинається з визначення вимог споживачів (ринку) та містить у собі:

- визначення цілей проєкту і запитів споживачів (внутрішніх і зовнішніх);
- вимірювання процесу, щоб визначити поточне виконання;
- аналіз і визначення корінних причин дефектів;
- поліпшення процесу, що скорочує дефекти;
- контроль подальшого перебігу процесу.

Методологія «**Ощадливого виробництва**» (від англ. *Lean Production, lean Manufacturing*) – це концепція раціоналізації бізнес-процесів, спрямована на їх прискорення і згладжування шляхом виявлення і виключення (оптимізації) процесів, які не додають цінності продукту і є причиною виникнення так званих «прихованих втрат» діяльності компанії. Ощадливе

виробництво передбачає залучення до процесу оптимізації кожного співробітника і максимальну орієнтацію на споживача. Ця концепція виникла як інтерпретація ідей виробничої системи компанії *Toyota* під час дослідження її феномена, коли автовиробник, який раніше випускав низькоякісні автомобілі, перевершив американські одночасно за якістю і ціною.

Відправна точка концепції - оцінка цінності продукту для кінцевого споживача, на кожному етапі його створення. Як основне завдання передбачається створення процесу безперервного усунення втрат, тобто усунення будь-яких дій, які споживають ресурси, але не створюють цінності (не є важливими) для кінцевого споживача. Споживачеві зовсім не потрібно, щоб готовий продукт або його деталі лежали на складі. Проте за традиційної системи управління складські витрати, а також усі витрати, пов'язані з переробкою, утилізацією браку, інші непрямі витрати перекладаються на споживача.

Відповідно до концепції ощадливого виробництва, вся діяльність підприємства поділяється на операції та процеси, що додають цінність для споживача, і операції та процеси, що не додають цінності для споживача. Завданням «ощадливого виробництва» є планомірне скорочення процесів і операцій, що не додають цінності. Реалізація концепції передбачає застосування таких підходів, як «точно вчасно» і витягувального виробництва.

Проф. Тайїті Оно (Японія), один із головних творців виробничої системи компанії *Toyota*, виділив 7 видів втрат промислового підприємства [55]:

- втрати через перевиробництво;
- втрати часу через очікування;
- втрати при непотрібному транспортуванні;
- втрати через зайві етапи обробки;
- втрати через зайві запаси;
- втрати через непотрібні переміщення;
- втрати через випуск дефектної продукції.

Тайїті Оно вважав перевиробництво основним видом втрат, унаслідок яких виникають інші. Джеффрі Лайкер та Геррі Конвис, дослідники

виробничої системи *Toyota*, додали ще один вид втрат: нереалізований творчий потенціал співробітників [56].

Зараз також заведено виділяти ще два джерела втрат – перевантаження робітників, співробітників або потужностей під час роботи з підвищеною інтенсивністю і нерівномірність виконання операції, наприклад, переривчастий графік робіт через коливання попиту.

Термін «ощадливий» стосовно системи організації виробництва вигадав у 1988 році Джон Крафчик [57] і точно визначили у 1996 році Джеймс Вомак і Деніел Джонс у книжці «Ощадливе виробництво: «Як позбутися втрат і домогтися процвітання вашої компанії» [58]. Вони викладають суть ощадливого виробництва як процес, який включає п'ять етапів:

1. Визначити цінність конкретного продукту.
2. Визначити потік створення цінності для цього продукту.
3. Забезпечити безперервність потоку створення цінності продукту.
4. Дозволити споживачеві пропонувати свої вимоги (витягати продукт).
5. Прагнути до досконалості.

Серед інших принципів відокремлюють: досягнення чудової якості (здача з першого пред'явлення, система «нуль дефектів», виявлення і розв'язання проблем біля витоків їхнього виникнення), гнучкість, установлення довготривалих стосунків зі споживачами (через розподіл ризиків, витрат та інформації).

Виробнича система *Toyota* базується на двох головних принципах: «точно вчасно, в необхідній кількості» й автономізації. Перший принцип вимагає, щоб необхідні матеріали, наприклад, деталі для складання надходили на виробничу лінію строго в той момент, коли це потрібно, і строго в необхідній кількості з метою скорочення складських запасів. Автономізація – це принцип роботи виробничого обладнання, яке здатне самостійно виявити проблеми, наприклад, здійснювати самодіагностику та виправляти власні несправності, виявляти дефекти в якості продукції або затримки у виконанні роботи, одразу зупинятися та сигналізувати про необхідність надання допомоги.

Згодом у межах концепції ощадливого виробництва було виокремлено безліч елементів, кожен із яких являє собою певний метод, а деякі самі претендують на статус самостійної виробничої концепції:

- потік одиничних виробів (англ. *one – piece flow*) – у кожній операції один виріб;
- канбан – методологія управління командами;
- загальний догляд за обладнанням (англ. *total productive maintenance, TPM*)
- система 5S - організація та раціоналізація робочого місця;
- швидке переналагодження обладнання (*SMED*)
- кайдзен - постійне поліпшення;
- пока-йоке («захист від помилок») і Бака-йоке («захист від дурня») - методи запобігання помилкам.

Обидва методи (Шість Сигма та Ощадливе виробництво) мають тривалу історію успішного застосування, проте саме досвід їхнього спільного використання продемонстрував досягнення найбільшого ефекту [59].

Методологія *Lean Six Sigma* з'явилася в результаті об'єднання методологій «Ощадливого управління» (*Lean*), основою якого є скорочення втрат і прискорення процесів, і Шість Сигм (*Six Sigma*), основою якого є зниження варіабельності процесів, поліпшення якості, стабілізація характеристик і підвищення задоволеності клієнтів. Нині методологію *Lean Six Sigma* успішно застосовують провідні компанії світу в усіх секторах економічної діяльності. Графічне порівняння результатів діяльності підприємства з використанням інтегрованої концепції «Шість Сігм» + «Ощадливе управління» з результатами концепцій «Шість Сігм» і «Ощадливе управління», що застосовуються окремо, наведено на рис. 3.12.

Концепцію «Шість сигм», що має американське коріння, споріднює з японською концепцією «Ощадливе управління» обопільний інтерес до окремо взятого процесу. Це істотно відрізняє їх від багатьох «маститих попередників», орієнтованих на загальне охоплення, і ріднить із концепціями нового покоління, такими, як «реінжиніринг бізнес-процесів». Концепції «Шість сигм» і «Ощадливе управління» ідеально доповнюють одна одну.



Рис. 3.12.Методологія Лін 6 Сигма (*Lean Six Sigma*)

Концепція «Ощадливе управління» не встановлює вимог до форми реалізації концепції та необхідної для цього інфраструктури. Тому успіх «Ощадливого управління» багато в чому залежить від ініціативності та організаторських здібностей менеджерів, однак у разі зміни менеджерів усе може завалитися. Концепції «Ощадливе управління» бракує формалізованих зобов'язань із боку вищого керівництва, формалізованого навчання, запланованого виділення ресурсів, відстеження успіху з ухваленням коригувальних дій тощо.

Концепція «Ощадливе управління» не достатньо сфокусована на запитах споживачів. Їх задоволення безпосередньо не пов'язане з її основною метою – усуненням втрат і непродуктивних витрат. У концепції ж «Шість сигм» ключовий елемент – фокус на споживачів. Це підтверджується тим, що всі основні характеристики цієї концепції побудовані на відстеженні взаємозв'язку параметрів процесу і характеристик продукції зі специфікаціями, встановленими споживачами.

Початок 90-х років XX століття можна охарактеризувати як час активного використання стандартів на системи управління якістю та концепцій «Шість сигм» і «Ощадливе виробництво» в нетрадиційних для них

сферах. Конкуренція, що дедалі зростає, підштовхувала виробників послуг та інтелектуальної продукції, державні та громадські організації до пошуку нових шляхів підтримання та підвищення попиту. Пройшовши багаторазову апробацію на підприємствах як виробничої, так і невиробничої сфер, методології «Шість сигм» і «Ощадливе виробництво» набули універсальності. До середини 90-х років минулого століття методології «Шість сигм» і «Ощадливе управління» стали одними з найбільш затребуваних напрямів бізнесу в управлінні якістю.

Співвідношення «числа успішних впроваджень» до «загального числа впроваджень» у них вище порівняно з іншими методами і концепціями менеджменту якості.

Стосовно концепції «Шість сигм» серед чинників успіху виокремлено найсуттєвіший - висока організованість. Висока організованість – це одна з найбільш характерних особливостей американського бізнесу, яка виражається в такому:

- уся діяльність проводиться в рамках проєктів, кожен з яких має встановлені цілі, терміни, бюджет, розподіл відповідальності та повноважень, вимоги до визначення ризиків, ведення записів тощо;
- вимоги до знань і вмінь персоналу, задіяного в проєкті, чітко визначені та класифіковані за категоріями («чорний пояс», «зелений пояс» тощо);
- хід кожного проєкту регулярно відстежують за допомогою встановленої системи вимірюваних показників.

Концепція «Ощадливе управління», що вперше сформувалася на японських підприємствах, має інші чинники успіху. Висока організованість є вже не фактором досягнення успіху, а одержуваним результатом. Досяжна висока організованість процесів (як основних, так і допоміжних) дає змогу підприємству заощадити значний обсяг ресурсів. Крім того, що концепція «Ощадливе управління» має на увазі принципово нові підходи до культури менеджменту та організації підприємства, вона також пропонує набір інструментів, що дають змогу здешевлювати і прискорювати процеси. Основні інструменти вже добре відомі фахівцям з якості: точно вчасно (*just in time*), 5S, кайдзен (концепція безперервного поліпшення), управління потоком створення цінностей (*value stream management*), поке-йока (метод

захисту від помилок) тощо. У цьому списку фахівці-практики виділяють «управління потоком створення цінностей» як один із найрезультативніших інструментів у досягненні цілей концепції «Ощадливе управління».

Методологія «Ощадливе» не встановлює вимог до форми реалізації концепції та необхідної для цього інфраструктури. Тому успіх «Ощадливого управління» багато в чому залежить від ініціативності та організаторських здібностей менеджерів, однак у разі зміни менеджерів усе може завалитися. Концепції «Ощадливе управління» бракує формалізованих зобов'язань з боку вищого керівництва, формалізованого навчання, запланованого виділення ресурсів, відстеження успіху з прийняттям коригувальних дій тощо.

Концепція «Ощадливе управління» не достатньо сфокусована на запитах споживачів. Їх задоволення безпосередньо не пов'язане з її основною метою - усуненням втрат і непродуктивних витрат. У методології «Шість сигм» ключовим елементом є фокус на споживачів. Це підтверджується тим, що всі основні вимірювані показники цієї концепції побудовані на відстеженні взаємозв'язку параметрів процесу і характеристик продукції зі специфікаціями, встановленими споживачами.

У методології «Ощадливе управління» дефекти та невідповідності визнаються одним з основних джерел втрат на підприємстві. Водночас у ній не розглядаються методи статистичного управління процесами для усунення втрат. Концепція «Ощадливе управління» не орієнтована на пошук джерел варіабельності процесів і шляхів зниження варіабельності, що є одним з основних елементів концепції «Шість сигм». Дефекти, які є головною мішенню концепції «Шість сигм», – лише один із багатьох видів втрат на підприємствах.

Як уже було сказано раніше, методологія «Ощадливого управління» виділяє сім видів втрат: перевиробництво, очікування, транспортування, діяльність, що не додає цінності, наявність запасів, переміщення людей, виробництво дефектів. Крім цього, виділяють додаткові види втрат: «помилкова економія», що полягає у використанні дешевої та неякісної сировини і матеріалів, «різноманіття» як результат застосування неуніфікованих елементів у процесах тощо.

У концепції «Шість сигм» не проводять паралелі між якістю та задоволеністю споживачів, з одного боку, і тривалістю та швидкістю

виконання процесів, з іншого. Водночас тривалість процесу безпосередньо пов'язана із задоволеністю споживачів під час надання послуг, а для процесів виробництва – із замороженими коштами у вигляді запасів, що перебувають у режимі очікування. У концепції «Ощадливе управління» аналіз часу, як одного з основних ресурсів процесу, є ключовим напрямом.

Набір інструментів методології «Шість сигм» обмежує можливе коло розв'язуваних завдань. Поліпшення процесу в рамках методології «Шість сигм» проводять, здебільшого, шляхом зниження варіабельності процесів статистичними методами і перепроєктування процесів. У методології «Шість сигм» не беруться до уваги такі можливості для поліпшення процесу, як скорочення непродуктивної діяльності, зниження часу очікування, зменшення запасів і транспортних витрат, оптимізація робочих місць тощо. Усі перераховані можливості повною мірою реалізуються методологією «Ощадливе управління».

Практика використання інтегрованої методології Лін Шість Сигма (*Lean Six Sigma*) на західних підприємствах дала змогу власними силами без значних інвестицій у короткі строки (приблизно рік) досягти вражаючих результатів:

- зниження собівартості продукції та послуг на 30...60 %;
- скорочення часу надання послуг до 50 %;
- скорочення кількості дефектної продукції приблизно у 2 рази;
- підвищення без додаткових витрат обсягу виконаних робіт до 20 %;
- зниження вартості проєктних робіт на 30...40 %;
- скорочення часу виконання проєктів до 70 %.

Складність застосування концепції *Lean Six Sigma* криється в простоті окремих її елементів. При цьому, більша частина проблем пов'язана з неправильним збором і підготовкою даних. Існує кілька основних принципів, що супроводжують успіх, як у застосуванні простих статистичних методів, так і під час реалізації концепції *Lean Six Sigma*: зацікавленість керівництва; виділення ресурсів; досвід успішних проєктів.

Методологія *Lean Six Sigma* дає змогу вдосконалювати діяльність будь-якого бізнесу поступово, від проєкту до проєкту, шляхом створення окремих проєктних колективів (груп) для кожного з проєктів, що реалізуються.

Під час виконання проєктів відповідно до методології *Lean Six Sigma* використовується універсальний підхід, що базується на семи інструментах статистичного аналізу:

- **Контрольний листок** – інструмент для збору даних та їх автоматичного впорядкування для полегшення подальшого використання зібраної інформації.

- **Гістограма** – інструмент, що дає змогу візуально оцінити розподіл статистичних даних, згрупованих за частотою потрапляння даних у певний (заздалегідь заданий) інтервал.

- **Діаграма Парето** – інструмент, що дає змогу об'єктивно уявити та виявити основні чинники, що впливають на досліджувану проблему, і розподілити зусилля для її ефективного розв'язання.

- **Метод стратифікації** (розшаровування даних) – інструмент, що дає змогу здійснити поділ даних на підгрупи за певною ознакою.

- **Діаграма розкиду** (розсіювання) – інструмент, що дає змогу визначити вид і щільність зв'язку між парами відповідних змінних.

- **Діаграма Ісікави** (причинно-наслідкова діаграма) – інструмент, який дає змогу виявити найсуттєвіші чинники (причини), що впливають на кінцевий результат (наслідок).

- **Контрольна карта** – інструмент, що дає змогу відстежувати перебіг перебігу процесу і впливати на нього (за допомогою відповідного зворотного зв'язку), запобігаючи його відхиленням від пред'явлених до процесу вимог.

Контрольний листок (журнал). Для аналізу якості продукції або роботи певної структури підприємства (дільниці, цеху) раціонально використовувати електронні форми ведення різноманітних журналів, прикладами можуть бути журнал браку, журнал виробництва, добові рапорти, що заповнюються в певні періоди часу - день, тиждень, місяць, квартал тощо. Ведення таких документів у електронному вигляді дає змогу розраховувати будь-які сумарні показники, які потім зручно подати у вигляді зведених таблиць із метою аналізу показників роботи за конкретними ознаками. Розробка журналів є досить тривалим процесом і здійснюється фахівцями-технологами об'єкта спільно з фахівцями в галузі інформаційних

технологій. Аналогічний ефект може бути отриманий при створенні бази даних показників якості цеху та інтеграцією їх з електронними таблицями.

Гістограма якості дає змогу наочно відобразити виявлений характер розкиду значень контрольованого параметра, середнє значення, стандартне відхилення та задані межі допуску. Вихідними даними для побудови служать кількості варіантів (частоти), що належать до кожного інтервалу відхилення досліджуваного параметра. По осі абсцис відкладаються кодові позначення інтервалів відхилення параметра, на осі ординат – частоти.

Розрізняють такі основні типи гістограм якості:

- звичайний тип. Гістограма має симетричну дзвоноподібну форму. Середнє значення припадає приблизно на середину розмаху даних. Цей тип свідчить про однорідність вихідних даних, а в статистичному контролі якості – про нормальний перебіг технологічного процесу;

- позитивно (негативно) скошений розподіл. Форма асиметрична. Середнє значення локалізується праворуч (ліворуч) від середини розмаху. Така форма трапляється, коли нижня (верхня) межа регулюється або теоретично, або за значенням допуску, або коли ліве (праве) значення недосяжне;

- розподіл з обривом зліва. Форма асиметрична. Середнє арифметичне локалізується зліва (справа) від середини розмаху. Ця форма трапляється при 100% просіюванні виробів через погану відтворюваність процесу;

- плато (рівномірний і прямокутний розподіли). Така форма трапляється в суміші кількох розподілів, що мають різні середні;

- бімодальний (двопіковий) розподіл. Така форма трапляється, коли змішуються два розподіли, середні значення яких далеко віддалені один від одного;

- розподіл з ізольованим піком. Така форма проявляється за наявності малих включень з іншого розподілу (з іншого процесу), появи помилки вимірювання або в разі порушення нормальності процесу.

Діаграма Парето. Початковими даними для побудови діаграми Парето слугують кількості варіантів, що відносяться до кожного чинника, відповідального за зниження якості продукції, або частоти. На графіку по осі ординат відкладаються частоти, виражені у відсотках. На графіку по осі абсцис відкладаються кодові позначення чинників. Діаграма Парето може

зображуватися по-різному, але спільним є комбінація графіка типу гістограми з ламаною лінією, що відображає накопичений відсоток.

Загальні правила побудови діаграми Парето. Побудова діаграми Парето здійснюється в 5 етапів, які включають: формулювання проблеми, розробку контрольного листка, збір інформації із заповненням контрольного листка і підрахунком підсумків, розробку таблиці для перевірки даних та ранжування отриманих даних за їхньою значущістю.

Діаграма Ісікави (риб'яча кістка). Діаграма Ісікави, вона ж «риб'яча кістка» і «діаграма причинно-наслідкових зв'язків», допомагає категоризувати та візуалізувати потенційні причини виникнення проблеми і докопатися до кореневої. Запропонував цю діаграму японський професор Каору Ісікава в 1950-1951 роках. Тривалий час її використовували для виявлення причин дефектів і відхилень у промисловості, і зрештою вона стала популярним інструментом управління якістю, зокрема одним з основних інструментів Lean Six Sigma.

Діаграма Ісікави має такі переваги:

- дає змогу графічно відобразити взаємозв'язок досліджуваної проблеми і причин, що впливають на цю проблему;
- дає можливість провести змістовний аналіз ланцюжка взаємопов'язаних причин, що впливають на проблему;
- зручна і проста для застосування і розуміння персоналом. Для роботи з діаграмою Ісікави не потрібна висока кваліфікація співробітників, і немає необхідності проводити тривале навчання.

До недоліків цього інструменту якості можна віднести складність правильного визначення взаємозв'язку досліджуваної проблеми та причин у разі, якщо досліджувана проблема є комплексною, тобто є складовою частиною складнішої проблеми.

Контрольна карта призначена для виявлення відхилення характеристики якості продукції, що випускається, від заданих технологічних норм і допусків. Контрольна карта являє собою графік зміни досліджуваної характеристики в часі. На графік додатково наносять попереджувальну межу (нижня межа) і межу регулювання (верхня межа). Межі регулювання – це межі, в яких передбачають утримувати значення досліджуваного параметра, зазвичай вони вужчі, ніж межі допуску. Вихід процесу за одну з меж

регулювання зумовлює необхідність його регулювання (звідси і назва цих меж). Ці межі зображуються на контрольній карті.

Більш детально перераховані інструменти Лін Шість Сигма будуть розглянуті в наступних розділах.

4. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА ВИПРОБУВАНЬ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ

Виходячи з впливу на контрольований продукт, як було зазначено раніше, методи контролю поділяють на руйнівні та неруйнівні [60].

4.1. Руйнівні методи технічного контролю

За допомогою руйнівних методів контролю в металопродукції контролюють усі основні механічні характеристики, макро- і мікроструктуру, інші спеціальні характеристики. Вони містять механічні випробування (на розтягнення, стиснення, кручення, визначення роботи удару за різних температур, жароміцність, твердість, випробування за термічних, електричних і повторно-змінних навантажень, тощо), дослідження структури, корозійні випробування, спеціальні види випробувань, здебільшого труб (Higt Collapse, бортування, роздавання, згинання та ін.).

Руйнівні методи контролю мають такі переваги:

- спрямовані безпосередньо на визначення надійності контрольованого виробу; дають змогу імітувати умови, близькі до експлуатаційних;
- дають змогу отримати кількісні характеристики контрольованого параметра і встановити терміни служби виробу до руйнування за заданих навантажень.

До недоліків руйнівних методів контролю слід віднести таке:

- проводяться на обмеженій частині виробів із партії. Цінність отриманих результатів залежить від стабільності параметрів виробів у партії (інакше поведінка виробу в реальних умовах не відповідатиме результатам проведених випробувань). Вибірковий контроль, яким є руйнівний контроль, неприйнятний для особливо відповідальних виробів космічної, авіаційної та оборонної промисловості;
- призводять або до повного руйнування контрольованого виробу, або до значного погіршення його робочих характеристик. Після електричних або термічних навантажень (без руйнування) необхідно проконтролювати деталь одним із неруйнівних методів контролю, оскільки можливі значні структурні зміни матеріалу виробу, які можуть стати причиною швидкого виходу з ладу коштовного устаткування;

- непридатні для контролю в умовах експлуатації виробу;
- вельми трудомісткі і потребують великої витрати часу висококваліфікованого персоналу. Тому вони економічно не вигідні і застосовуються для обмеженого числа деталей і вузлів.

4.1.1. Механічні випробування

Механічні властивості характеризують здатність матеріалу чинити опір деформації та руйнуванню під дією прикладених навантажень [61, 62].

За характером зміни в часі діючого навантаження механічні випробування можуть бути статичними (на розтягнення, стиснення, вигинання, кручення), динамічними (на ударне вигинання) і циклічними (на втому).

За впливом температури на процес їх ділять на випробування за кімнатної температури, низькотемпературні та високотемпературні (на тривалу міцність, повзучість, релаксацію).

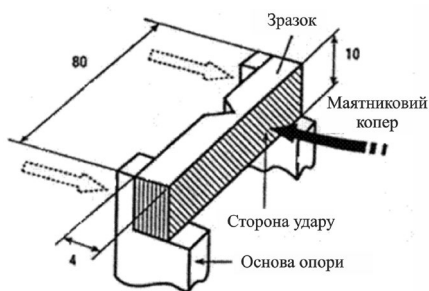
- **Статичні випробування** проводять під час впливу на зразок із певною швидкістю постійно діючого навантаження. Швидкість деформації становить від 10^{-4} до 10^{-1} с^{-1} . Статичні випробування на розтягнення належать до найбільш поширених. Властивості, що визначаються під час цих випробувань, наведені в численних стандартах за технічними умовами на матеріали. Залежно від схеми прикладання навантаження до зразка, розрізняють такі види статичних випробувань: одновісне розтягнення, одновісне стиснення, вигинання, кручення, розтягнення і вигинання зразка з надрізом та тріщиною. Найбільш важливими випробуваннями є ті, за яких у зразку створюють однорідний напружений стан (одновісне розтягування, одновісне стиснення, кручення тонкостінного зразка). Під час таких випробувань визначають основні механічні характеристики матеріалу.

- **Механічні динамічні випробування** – вид руйнівних випробувань, за якого досліджуваний матеріал піддається впливу ударного навантаження і при цьому досягається висока швидкість деформації.

- До динамічних випробувань належать також випробування на лінійні постійні прискорення, дію вібрацій (вібраційні випробування) та акустичного шуму.

• З динамічних випробувань найпоширенішим є випробування на ударне вигинання (ударну в'язкість) [63]. Випробування на ударну в'язкість проводять на маятникових копрах на зразках, що мають надріз, або без надрізу. За масою маятника, його початковою висотою і висотою підйому після руйнування зразка обчислюють відповідну роботу удару (методи Шарпі - ударний вигин та Ізод - ударна міцність). Основною відмінністю методів Шарпі та Ізод (рис. 4.1) є спосіб встановлення випробовуваного зразка. Під час випробування за методом Ізод зразок встановлюють вертикально і затискають у тисках, а під час динамічних випробувань за Шарпі зразок встановлюють вільно в горизонтальному положенні і не затискають. Випробування за Шарпі (ISO 180)

Випробування за Шарпі (ISO 180)



Випробування за Ізод ISO (179)

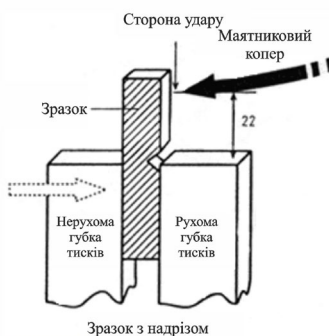


Рис. 4.1. Схеми динамічних випробувань за Шарпі та Ізод

Тривалість випробування не перевищує сотих або тисячних часток секунди. Швидкість деформації становить близько 10^2 с^{-1} . Випробування, як правило, проводять за кімнатної або зниженої температури. У результаті динамічних випробувань зазвичай визначають величину повної і питомої роботи динамічної деформації, а також величину залишкової деформації зразка. Динамічні випробування частіше проводять за схемою вигинання. Цей вид випробувань часто застосовують для оцінки якості зварних з'єднань і дає змогу оцінити схильність металу до крихкого руйнування.

Для металопрокату однією з найпоширеніших якісних характеристик є величина ударної в'язкості, що характеризує питому роботу, яка витрачається на руйнування під час удару зразка з надрізом. Ударну в'язкість випробовують на маятниковому копрі з постійним запасом роботи маятника за зниженої, кімнатної та підвищеної температур.

Метод заснований на руйнуванні ударом маятникового копра зразка з концентратором напружень. У результаті випробування визначають повну роботу, витрачену під час удару K , або ударну в'язкість KC .

Використовують зразки прямокутної форми з концентратором типу U , V , T (тріщина від утомленості). Найпоширенішими зразками є зразки розмірами $55 \times 10 \times 10$ мм з U -концентратом 2×2 мм. Схему маятникового копра та зразки з надрізами різного типу (тип I (U) – круглий надріз (Менанже), тип II (V) – гострий надріз (Шарпі) і тип 15 (T) – з ініційованою тріщиною) представлено на рис. 4.2.

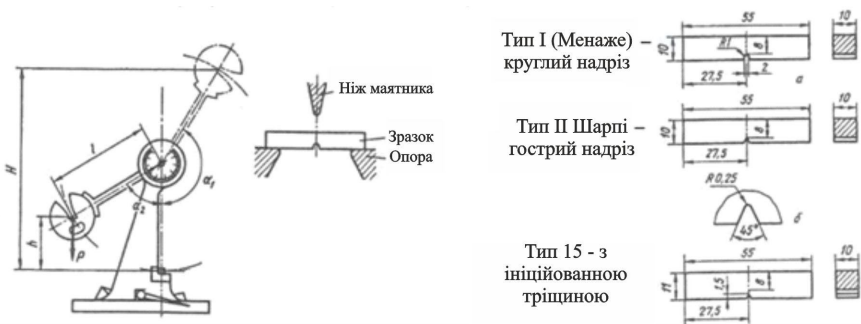


Рис. 4.2. Схема маятникового копра і стандартні зразки з U, V і T-подібним надрізом для випробувань на ударне вигинання

На руйнування зразка ударом витрачається тільки частина енергії маятника, у зв'язку з чим маятник після руйнування зразка продовжує рухатися, відхиляючись на певний кут. Чим більша величина роботи, що витрачається на руйнування зразка, тим на менший кут він відхиляється від вертикалі після руйнування. За величиною цього кута і визначають роботу удару K або роботу, витрачену на руйнування зразка.

Роботу руйнування K відносять до площі поперечного перерізу зразка S_0 у місці зламу і тим самим знаходять KC - ударну в'язкість:

$$KC = K/S_0, \quad (4.1)$$

Залежно від виду концентратора напружень ударна в'язкість позначається KCU , KCV , KCT і має розмірність МДж/м² (МДж/см²).

• **Циклічні випробування** характеризуються багаторазовими змінами навантаження, прикладеного до зразка випробовуваного матеріалу, за величиною і за напрямком. В умовах дії циклічних напружень у металах і сплавах відбувається зародження і поступовий розвиток тріщин, що спричиняє повне руйнування деталі зразка. Це руйнування особливо небезпечне, оскільки може відбуватися під дією напружень, набагато менших за межі міцності і плинності [61].

Процес поступового накопичення ушкоджень у матеріалі під дією циклічних навантажень, що призводить до зменшення довговічності через утворення тріщин і руйнування, називають **втомою**, а властивість протистояти втомі має назву **витривалості**.

Під час проведення циклічних випробувань у зразку через якусь кількість циклів навантаження в поверхневих шарах зароджується тріщина від утомленості, яка потім розвивається вглиб зразка або деталі. Процес поширення втомної тріщини досить тривалий. Він триває доти, доки переріз не виявиться настільки малим, що напруження, які діють у ньому, перевищать руйнівні. Тоді відбудеться швидке руйнування, як правило, крихке через наявність гострого надрізу.

Завдання втомних випробувань – дати кількісну оцінку здатності матеріалів працювати в умовах циклічного навантаження без руйнування.

Сучасні методи випробувань на втому (витривалість) досить різноманітні. Вони відзначаються характером зміни напружень у часі, схемою навантаження (вигинання, розтягнення – стиснення, кручення), наявністю або відсутністю концентраторів напружень. Випробування на втому проводяться за різних температур і в різних середовищах. Вимоги щодо проведення циклічних випробувань регламентуються відповідними стандартами на продукцію.

У процесі будь-якого втомного випробування на зразок діють циклічні напруження, що безперервно змінюються за величиною і часто за знаком (рис. 4.3).

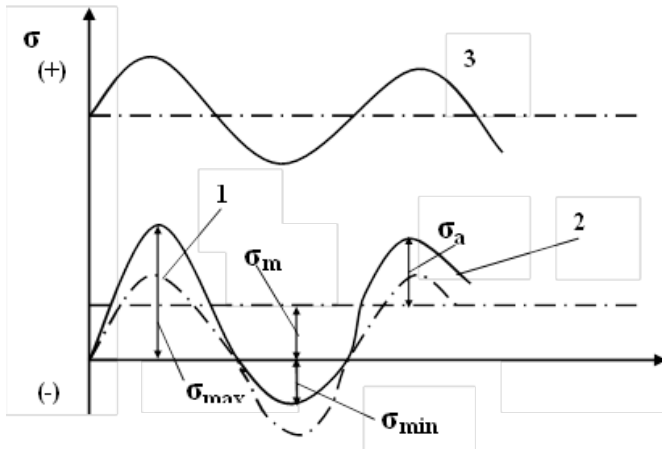


Рис. 4.3. Різновиди циклів напружень під час циклічних випробувань

Найпоширеніша схема навантаження при втомних випробуваннях – вигинання. Особливо проста схема чистого вигинання зразка при обертанні. Навантаження тут прикладається у двох точках, що забезпечує сталість згинального моменту на всій робочій довжині зразка.

Крім схеми чистого вигинання, часто застосовують кругове вигинання закріпленого консольно зразка. Його головка кріпиться в патроні, а до іншого кінця прикладається згинальний момент. Максимальне значення згинальний момент досягає тільки в одному перерізі – поблизу основи консолі, що є недоліком цієї схеми навантаження.

Для випробувань в умовах циклічного розтягування-стиснення використовують гідропульсаційні та резонансні машини. Перші являють собою універсальні машини з гідравлічним приводом для статичних випробувань, забезпечені гідропульсатором. Це однопоршневий масляний насос, який приєднується до робочого циліндра машини. Хід поршня насоса встановлюють відповідно до заданої амплітуди напружень циклу. Резонансні

машини для втомних випробувань здійснюють циклічне розтягнення-стиснення за допомогою незалежної від зразка вібруючої системи.

Первинним результатом втомного випробування одного зразка є число циклів до руйнування (довговічність) за заданих характеристиках циклу. Кінцевою метою випробувань є визначення **межі витривалості (σ_R)** – найбільшого значення максимальної межі циклу, під час дії якої не відбувається руйнування від утомленості зразка після довільно великої або заданої кількості циклів навантаження.

Далі розглянемо детальніше найпоширеніші види механічних випробувань: визначення твердості, випробування на розтягнення (визначення характеристик міцності та пластичності).

Випробування на твердість. Однією з механічних властивостей матеріалу є твердість. Методи визначення твердості залежно від швидкості прикладання навантаження поділяються на статичні та динамічні, а за способом його прикладання – на методи вдавнення і дряпання. Методи визначення твердості належать до статичних методів випробування.

Твердість – це здатність матеріалу чинити опір вдавлюванню в нього твердішого тіла (індентора) під дією зовнішніх сил. Під час випробування на твердість у поверхню матеріалів вдавлюють піраміду, конус або кульку (індентор), у зв'язку з чим розрізняють методи випробувань, відповідно, за Віккерсом, Роквеллом та Брінелем. Крім того, існують менш поширені методи випробування твердості: метод пружного відскоку (за Шором), метод порівняльної твердості (Польді) і деякі інші.

Під час випробування матеріалів на твердість не виготовляють стандартних спеціальних зразків, проте до розмірів і поверхні зразків та виробів висувають певні вимоги.

Твердість за Віккерсом встановлюють шляхом вдавлювання в метал індентора – алмазної піраміди з кутом при вершині 136° під дією постійного навантаження P : 1; 2; 2,5; 3; 5; 10; 20; 30; 50 або 100 кгс і витримки під навантаженням протягом 10 – 15 с. Для визначення твердості чорних металів і сплавів використовують навантаження від 5 до 100 кгс, мідних сплавів – від 2,5 до 50 кгс, алюмінієвих сплавів – від 1 до 100 кгс. Після зняття

навантаження за допомогою мікроскопа знаходять довжину діагоналі відбитка, а твердість HV розраховують за формулою

$$HV = 1,854 - P/d^2, \quad (4.2)$$

де P - навантаження, кгс;

d - діагональ відбитка, мм.

На практиці обчислень не роблять, а користуються готовою розрахунковою таблицею. Твердість за Віккерсом HV вимірюється в кгс/мм², Н/мм² або МПа. Значення твердості за Віккерсом може змінюватися від $HV2060$ до $HV5$ при навантаженні 1 кгс [64] (рис. 4.4).

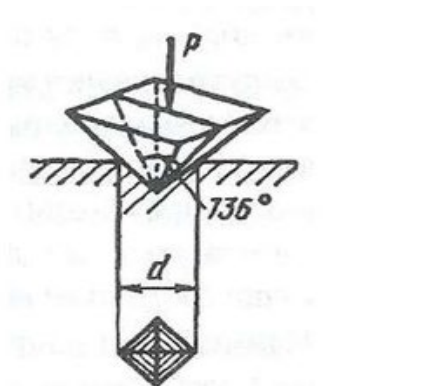


Рис. 4.4. Схема визначення твердості матеріалів за Віккерсом

Твердість за Брінелем визначають шляхом вдавлювання у зразок або виріб сталеві загартовані кульки діаметром 10, 5 або 2,5 мм під дією навантажень 3000, 1000, 750, 500, 250, 625 кгс та ін. [65] (рис. 4.5). Отриманий круглий відбиток на зразку вимірюють під лупою і за таблицями знаходять величину твердості за Брінелем, значення якої не перевищує 450 HB . Твердість за Брінелем майже збігається зі значеннями твердості за Віккерсом.

Твердість HB - це також величина напружень опору вдавненню:

$$HB = P/F_{ot} = P/\pi Dt = 2P/\pi D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right), \quad (4.3)$$

де P - навантаження, кгс;

F_{ot} - площа відбитка, мм²;

t - глибина сегмента відбитка;

D – діаметр кульки, мм;
 d – діаметр відбитка, мм.

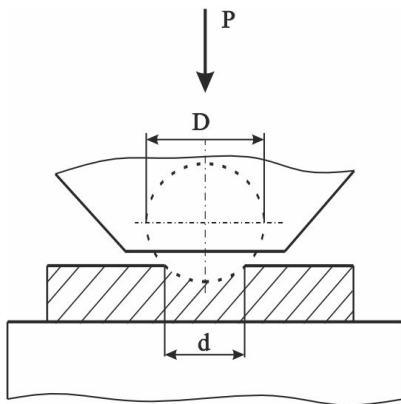


Рис. 4.5. Схема визначення твердості матеріалів за Брінелем

Твердість за Брінелем (HB) має розмірність кгс/мм² або МПа. Наприклад, твердість відпаленої сталі дорівнює 207 HB при навантаженні 3000 кгс, діаметрі кульки 10 мм, діаметрі відбитка 4,2 мм або, з огляду на коефіцієнт переведення: 1 Н = 9,8 кгс, $HB = 2\,028$ МПа. Метод визначення твердості за Брінелем не застосовується для матеріалів, що мають твердість понад 450 HB .

Твердість за Роквеллом визначають вдавлюванням у тіло зразка алмазного конуса з кутом при вершині 120° (шкали A і C) або сталевій кульки діаметром 1,5875 мм (шкала B). При цьому визначають твердість, відповідно, HRA , HRC і HRB . Нині вимірювання твердості за методом Роквелла є найпоширенішим методом, тому що під час використання твердомірів Роквелла не потрібно вимірювати відбиток, число твердості зчитується зі шкали приладу відразу після зняття основного навантаження [66].

Метод полягає у вдавлюванні у випробовуваний зразок індентора під дією двох навантажень, що послідовно прикладаються – попереднього P_0 та основного P_1 , що додається до попереднього, так що загальне навантаження $P = P_0 + P_1$. Після витримки протягом кількох секунд основне навантаження

знімають та вимірюють залишкову глибину проникнення індентора, який при цьому продовжує перебувати під дією попереднього навантаження. Переміщення основної стрілки індикатора на одну поділку шкали відповідає переміщенню індентора на 0,002 мм, яке беруть як одиницю твердості. Попереднє навантаження для всіх шкал однакове – 100 Н.

На рис. 4.6 представлено схему вимірювання твердості за методом Роквелла алмазним або твердосплавним конусом. Під час випробувань вимірюють глибину відновленого відбитка. Шкали *A* і *C* між собою збігаються, оскільки випробування проводять одним і тим самим індентором - алмазним конусом, але за різних навантажень: 500 і 1400 Н відповідно. Твердість за шкалою *A* і *C* визначається як

$$HRC = t/0,002 = 100 - (H - h)/0,002, \quad (4.4)$$

За шкалою *B* (навантаження 900 Н, кулька):

$$HRB = 130 - (H - h)/0,002, \quad (4.5)$$

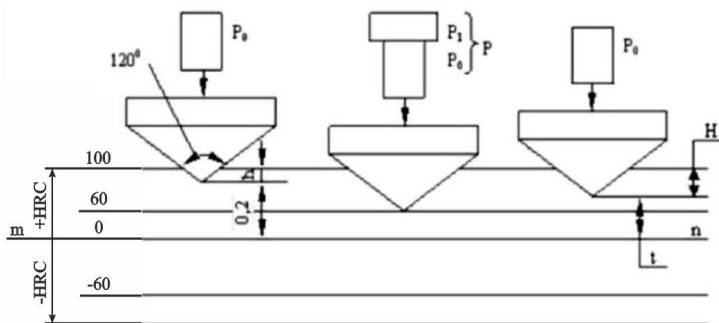


Рис. 4.6. Схема визначення твердості за Роквеллом (індентор – конус)

На практиці значення твердості за Роквеллом не розраховуються за формулами, а зчитуються з відповідної (чорної або червоної) шкали приладу. Шкали *HRC* і *HRA* використовуються для високої твердості, *HRB* – для низької. Число твердості за Роквеллом вимірюють в умовних одиницях, воно є мірою глибини вдавнення індентора під певним навантаженням. Метод визначення твердості за Роквеллом застосовується для матеріалів із твердістю понад 450 *HB*.

Випробування на розтягування матеріалів проводять згідно з відповідними стандартами, якими встановлюють методи статичних випробувань на розтягнення чорних і кольорових металів для визначення при температурі 20°C меж пропорційності, пружності, плинності, тимчасового опору розривання, відносного подовження і відносного звуження, модуля пружності.

Для випробувань застосовують плоскі та циліндричні зразки, вирізані з деталі або спеціально виготовлені. Розміри зразків регламентовані зазначеним стандартом, вони підпорядковуються геометричній подібності та можуть бути короткими і довгими. Для циліндричного зразка береться співвідношення початкової робочої довжини l_0 і вихідного діаметра d_0 : $l = 5d_0$ – короткий зразок, $l = 10d_0$ – довгий зразок. Для плоского зразка обирається співвідношення робочої довжини l_0 і площі поперечного перерізу F_0 : $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$ – короткий зразок, $l_0 = 11,3 \sqrt{F_0}$ – довгий зразок. Циліндричні зразки виготовляються діаметром 3 мм і більше. Зразки складаються з робочої частини завдовжки l_0 і головок, форма і розмір яких відповідають захватам машини [67] (рис. 4.7).

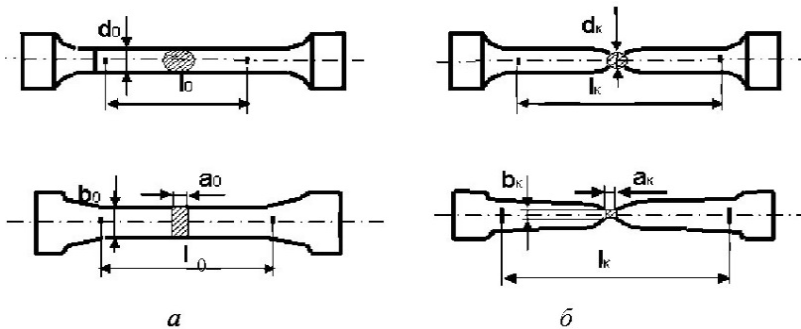


Рис. 4.7. Циліндричні та плоскі зразки до (а) і після (б) випробування на розтягнення

Розтягнення зразка проводять на спеціальних машинах, що дають змогу фіксувати величину прикладеного навантаження і зміну довжини зразка під час розтягування. Ці самі машини дають можливість записувати

зміну довжини зразка під час збільшення навантаження (див. рис. 4.7), тобто первинну діаграму випробування на розтягнення в координатах: навантаження P , H (кН) і абсолютне подовження зразка A , мм.

Вимірюючи величину навантаження в характерних точках діаграми випробувань на розтягнення (рис. 4.8 та рис. 4.9), визначають такі параметри механічних властивостей матеріалів:

$\sigma_{пц}$ – межа пропорційності (точка p);

$\sigma_{0,05}$ – межа пружності (точка e);

σ_T – фізична межа плинності (точка s);

$\sigma_{0,2}$ – межа плинності умовна;

σ_B – тимчасовий опір розриву, або межа міцності (точка b).

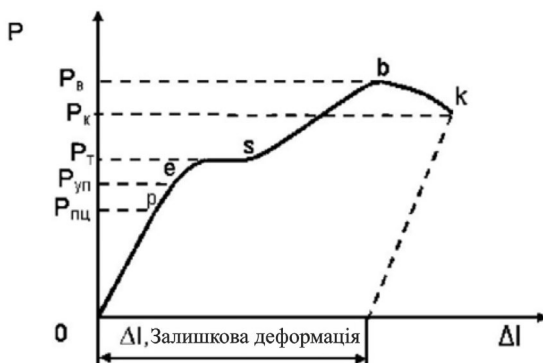


Рис. 4.8. Первинна діаграма розтягування

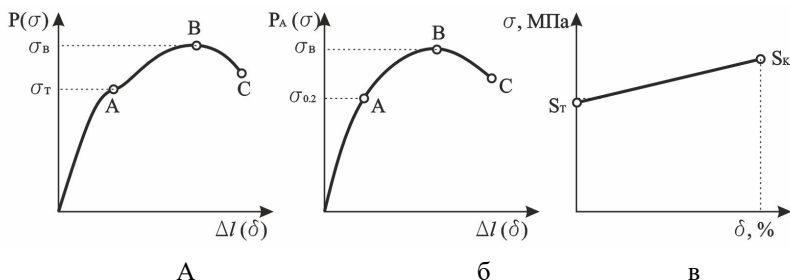


Рис. 4.9. Види діаграм розтягування: а – з майданчиком плинності; б – без майданчика плинності; в – діаграма істинних напружень

Значення 0,05 і 0,2 у записі межі пружності та плинності відповідають величині залишкової деформації Δl у відсотках від l_0 під час розтягування зразка. Напруження під час випробування на розтягування обчислюють шляхом ділення навантаження P , що відповідає характерній точці на діаграмі, на площу початкового поперечного перерізу F_0 робочої частини випробовуваного зразка:

$$\sigma = P_{\text{пл}} / F_0; \sigma = P_{0,5} / F_0; \sigma_m = P_m / F_0; \sigma_s = P_s / F_0, \quad (4.6)$$

де F_0 – площа поперечного перерізу зразка: для циліндричного зразка – $F_0 = \pi d_0^2 / 4$, для плоского зразка – $F_0 = a_0 \cdot b_0$ (де a_0 – початкова товщина; b_0 – початкова ширина зразка).

У точці k встановлюють напруження опору руйнуванню матеріалу.

Межу пропорційності та межу пружності визначають за допомогою тензометра (прилад для визначення величини деформації). Межу плинності фізичну й умовну розраховують, знаходячи навантаження за діаграмою розтягування. Якщо на діаграмі немає майданчика плинності, то для обчислення умовної межі плинності необхідно провести графічні побудови на діаграмі (рис. 4.10). Спочатку знаходять величину залишкової деформації, що дорівнює 0,2 % від l_0 , далі відмічають відрізок на осі деформації, що дорівнює 0,2 % від l_0 , і проводять лінію, паралельну пропорційній ділянці діаграми розтягування, до перетину з кривою розтягування.

Навантаження $P_{0,2}$ відповідає точці їх перетину. Фізична й умовна межа плинності характеризують здатність матеріалу до початку пластичної деформації, тобто опір малій пластичній деформації.

Межу міцності можна підрахувати, використовуючи показання силвимірювача, за максимальним навантаженням P_{max} під час розриву або знайти $P_{\text{max}}(P_b)$ за первинною діаграмою розтягування. Характер деформації під час розтягування в'язких і крихких матеріалів істотно різниться.

Крихкі матеріали після досягнення максимального навантаження швидко руйнуються без значної пластичної деформації, тому σ_b для крихких матеріалів є характеристикою опору руйнуванню, а для пластичних – характеристикою опору деформації.

Напруження руйнування визначають як справжнє. При цьому навантаження руйнування ділять на кінцеву площу поперечного перерізу зразка після руйнування F_K :

$$S = P / F_K . \quad (4.7)$$

Розраховані таким чином величини є характеристиками **міцності матеріалу** [61, 68].

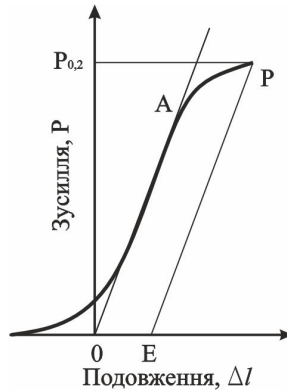


Рис. 4.10. Визначення межі плинності

Пластичність, тобто здатність деформуватися без руйнування, характеризується змінами розмірів зразка. Під час випробування на розтягування визначають такі характеристики пластичності:

– відносне подовження

$$\delta = (l - l_{k0}) / l_0 \cdot 100 \% , \quad (4.8)$$

– відносне звуження

$$\psi = (F_{0k} - F) / F_0 \cdot 100 \% , \quad (4.9)$$

де l_k , F_k – відповідно, довжина робочої частини та площа поперечного перерізу зразка після розтягування.

– модуль пружності (модуль Юнга):

$$E = \sigma / \delta = const . \quad (4.10)$$

Розраховані характеристики механічних властивостей після випробування на розтягнення заносять у протокол.

4.1.2. Металографічні дослідження

Металографічні методи дослідження металів і зварних з'єднань дають змогу визначити розміри, форму і взаємне розташування кристалів, а також неметалеві включення, тріщини, раковини, пори, свищі тощо.

На відміну від класичних методів неруйнівного контролю, якими виявляються дефекти, що вже розвинулися, металографія здатна виявити дефекти на самому початку розвитку – або навіть передумови початку розвитку дефектів у вигляді деяких характерних змін структури металу. Перевага металографічного методу полягає не тільки в простоті, доступності, відносній нескладності застосовуваного устаткування, а й у високій цінності та достовірності інформації, одержуваної під час прямого вивчення макро- і мікроструктури.

За допомогою металографічного дослідження відстежують зміни стану структури металу, які призводять до зниження міцності матеріалу, і відповідно – до зниження міцності виробу або всієї конструкції, її залишкового ресурсу.

Завданням металографічних досліджень є встановлення взаємозв'язку між якісними та кількісними характеристиками структури і фізичними, механічними, хімічними, технологічними та експлуатаційними властивостями металевих матеріалів.

Обсяг і методики проведення металографічних досліджень металів, а також методи оцінки якості регламентуються нормативною документацією, наприклад [69, 70, 71].

Можна виділити кілька основних етапів, які неодмінно присутні під час проведення металографічних досліджень:

- Підготовка мікрошліфів – спеціальних зразків, які ретельно шліфуються, поліруються і промиваються до отримання плоскої поверхні, придатної для детального огляду.
- Вивчення мікроструктури зразка в нетравленому вигляді, безпосередньо після полірування і промивання. Під час огляду під

мікроскопом можна помітити окремі темні ділянки і вкраплення, які можуть являти собою дрібні пори, неметалеві включення, структурні складові.

Макро- і мікроаналіз під час металографічних досліджень металу дає змогу своєчасно виявити його дефекти, що знижують експлуатаційні властивості та надійність виробів у роботі.

Макроаналіз виявляє: вид зламу (крихкий, в'язкий); величину, форму і розташування зерен і дендритів литого металу; дефекти в злитках і виливках (усадочні раковини, газові бульбашки, тріщини); дефекти, які порушують суцільність металу (усадочна пористість, газові бульбашки, раковини, тріщини); хімічну неоднорідність металу, спричинену процесами кристалізації або створену термічною і хіміко-термічною обробкою; розташування волокон у кованих і штампованих заготовках; тріщини, що виникають під час обробки тиском або термічної обробки, дефекти в зварних швах.

Мікроскопічний аналіз є більш тонким методом дослідження структури та дефектів металу. Дослідження мікроструктури здійснюється при великих збільшеннях за допомогою металографічного мікроскопа.

Мікроскопічний аналіз – це вивчення поверхні за допомогою світлових мікроскопів, де збільшення в межах 50...2000 разів дає змогу виявити елементи структури розміром до 0,2 мкм.

Металографічний мікроскоп розглядає метал у відбитому світлі (головна відмінність від біологічного мікроскопа, де предмет розглядають у проходящому світлі). Значно більше збільшення (до 100 000 разів) можна отримати за допомогою електронного мікроскопа, в якому промені світла замінені потоком електронів.

Мікроскопічним аналізом здійснюється:

- оцінка форми і розмірів кристалічних зерен металів і сплавів;
- визначення форми і розмірів неметалевих включень - сульфідів, оксидів, алюмосилікатів, тощо;
- визначення мікропороків – мікротріщин, раковин, пор, тощо;
- аналіз зміни мікроструктури сплавів після термічної, хіміко-термічної обробки та обробки металів тиском;

- визначення хімічного складу деяких структурних складових за їхньою характерною формою і забарвленням після застосування вибіркового травлень.

Крім того, під час проведення металографічних досліджень визначають, за необхідності, величину зерна і вміст альфа-фази (у високолегованих сталях), схильність до міжкристалітної корозії та інші характеристики структури матеріалу.

4.1.3. Корозійні випробування

Корозійні випробування – це дослідження в лабораторних або природних умовах ступеня спротиву руйнуванню конструкційних матеріалів під впливом корозійно-активного середовища або здатності захисних складів перешкоджати корозійному руйнуванню деталей, на які вони нанесені.

Іншими словами, корозійні випробування – це тестування дослідних зразків в умовах, необхідних для визначення їхньої стійкості до корозії [72].

Вперше прискорені корозійні дослідження було проведено 1914 року в умовах соляного туману. З 1939 року цей спосіб випробувань було закріплено в стандарті. В рамках випробувань передбачався тривалий вплив сольового розчину 5% концентрації при температурі +35 °С. Цей метод корозійних випробувань поширений і нині [73].

Основні напрямки корозійних випробувань:

- Дослідження корозійних властивостей різних металевих матеріалів: алюмінієві, магнієві, титанові сплави, сталі та жароміцні сплави і покриття.
- Проведення випробувань з визначення ступеня впливу різних кліматичних факторів, а також агресивних середовищ, палив, мастил на корозійну стійкість матеріалів.
- Дослідження та оцінка ефективності захисту металевих матеріалів від корозії.

За найширшою класифікацією вони поділяються на два основних види: дослідження в штучно створених і природних умовах. Останній вид тестувань називається натурними. У рамках цих випробувань об'єкти поміщають у реальні умови експлуатації, де на них впливають негативні кліматичні чинники. Корозія в таких умовах з'являється і поширюється по

зразках повільно. З цим пов'язаний головний недолік натурних випробувань - тривалий термін отримання результатів.

Випробування у штучних середовищах дають можливість інтенсифікувати вплив агресивних чинників і скоротити термін досліджень.

Розрізняють такі основні види видів корозійних випробувань: прискорені, випробування на воднево-індуковане розтріскування, випробування на стійкість до пітінгоутворення, випробування на стійкість до лужної корозії, випробування на стійкість до міжкристалітної корозії, електрохімічні випробування, випробування на сульфідне корозійне розтріскування під напругою, випробування на загальну корозію.

• **Прискорені корозійні випробування.** Прискорені випробування потрібні для отримання результатів, які за звичайних обставин потребували б тривалого очікування. Необхідність у прискоренні виникає в тих випадках, коли корозія загальмована нанесенням захисного покриття або застосуванням інгібіторів. Процес прискорюється зовнішніми засобами, але без зміни механізму корозії, який потрібно вивчити. Існує кілька способів, якими можна прискорити корозію: підвищити інтенсивність дії корозійно активних речовин, підвищити температуру або частоту зіткнень з корозійними речовинами. Оскільки прискорені методи призначені в основному для випробування захисту від атмосферної, водної та морської корозії, прискорення корозії здійснюють за допомогою вибору умов випробувань. Види прискорених випробувань при дії різних кліматичних умов, а також прискорені випробування при дії різних кліматичних умов.

Переваги прискорених випробувань: різке скорочення часу, необхідного на проведення випробувань, прискорені випробування добре підходять для порівняння поведінки різних металів у даному корозійному середовищі, точний контроль параметрів випробувань: температури, pH , вмісту солей, вологості, тощо; за допомогою прискорених випробувань можна судити про ефективність заходів для запобігання корозії, а також їх легко порівнювати між собою.

Недоліки прискорених випробувань: прискорені випробування придатні тільки для якісних оцінок, у таких випробуваннях неможливо виявити ефекти, зумовлені тривалим впливом корозійного середовища, результати випробувань придатні тільки для порівняння засобів захисту або

корозійних середовищ між собою, для отримання статистично значущих результатів доводиться проводити випробування на великій кількості зразків з усередненням швидкості корозії.

• **Випробування на воднево-індуковане розтріскування (ВІР, або НІС)** за стандартом *NACE TM 0284* [80]. Випробування проводять для оцінки стійкості сталей трубопроводів і судин високого тиску до ВІР, що викликане поглинанням водню у водному середовищі, яке містить сірководень. Дана методика випробувань регламентується вимогами стандарту *NACE MR 0175, EFC-16*. Метод випробування передбачає витримування випробувальних зразків без напруги в одному з трьох стандартних випробувальних розчинів. Схильність сталей до НІС оцінюють металографічно з підрахунком коефіцієнта чутливості матеріалу до розтріскування (*CSR*), коефіцієнта довжини тріщини (*CLR*) і коефіцієнта товщини тріщини (*CTR*). На рис. 4.11 представлено зразок після випробувань на ВІР.

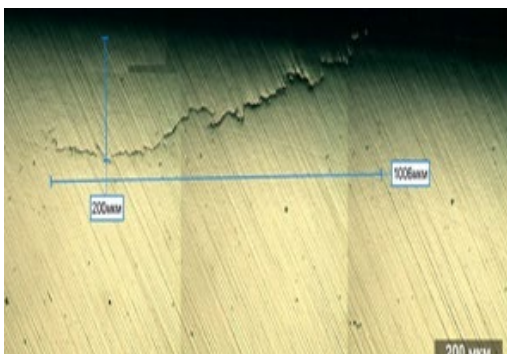


Рис. 4.11. Зразок металу після проведення випробувань на ВІР

• **Випробування на стійкість до пітінгоутворення** за стандартом *ASTM G48*. Метод полягає у витримуванні зразків нержавіючих сталей у розчині трихлориду заліза ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) з подальшим визначенням втрати маси зразків. Для випробувань застосовують плоскі прямокутні зразки розміром 20 x 30 мм і товщиною від 0,8 до 5 мм з отвором для підвішування діаметром 3 мм. Від кожної плавки (партії) матеріалу або виду його обробки

відбирають і випробовують паралельно не менше ніж п'ять зразків [77] (рис. 4.12, 4.13).



Рис. 4.12. Наскрізні пітінги в зразках сплаву ЕП1718 після випробувань на пітінгову корозію впродовж 72 годин за температурою 50 °С у розчині 10 % FeCl_3

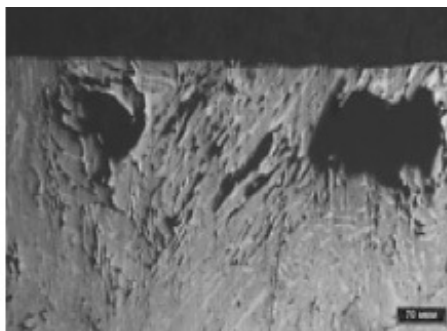


Рис. 4.13. Підповерхневі пітінги на зразку сталі 08X17H5M3

Випробування на стійкість до лужної корозії за стандартом *ASTM G48* [77]. Для випробувань на стійкість до лужної корозії на двох найбільших за площею сторонах зразка закріплюють фторвуглецеві блоки (*TFE*) за допомогою кілець ущільнювачів або подвійної петлі та витримують у 10 %-розчині ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), а для зразків використовують пластини розмірами 20x30 мм і товщиною від 0,8 до 5 мм. Поверхня зразків готується з використанням абразивного паперу, далі зразки знежирюють і зважують з точністю до 0,001 г. Тривалість випробувань – 72 год.



Рис. 4.14. Зовнішній вигляд зразка дуплексної нержавіючої сталі після випробувань на щілинну корозію

Випробування на стійкість до міжкристалітної корозії (МКК) за стандартом *ASTM A262-15*(2021) [74]. Випробування на стійкість до МКК проводяться для нержавіючих сталей і корозійно-стійких сплавів. Залежно від хімічного складу сталі та сплаву і їхнього призначення обирають один із методів випробувань, регламентованих стандартом *ASTM A262*. Найпоширенішим є метод АМУ [75], сутність якого полягає в тому, що зразки сталі витримують у киплячому водному розчині сірчаної кислоти та сірчаної кислоти в присутності металічної міді (стружка чи дріт), з тривалістю витримки в киплячому розчині ($8,00 \pm 0,25$) год. Тривалість випробувань визначають як сумарну кількість годин кипіння. Оцінка результатів випробувань на МКК відбувається за допомогою візуального огляду або за допомогою оптичної металографії зразка після вигинання.



Рис. 4.15. Зразки після випробувань на стійкість до МКК

• **Електрохімічні випробування** за різними, залежно від вимог замовника, стандартами, наприклад *ASTM G3* [76] та ін., які регламентують усі особливості проведення випробувань, оцінювання та оформлення результатів. Електрохімічні методи досліджень дають змогу оцінити швидкості корозії в середовищах, що розглядаються, можливість контактної корозії для вуглецевих і легованих сталей, корозійностійких матеріалів, покриттів; дають змогу оцінити ефективність інгібіторів, потенціали корозії, потенціали пітінгоутворення. Електрохімічні дослідження проводять у відкритих і герметичних осередках для газонасичення чи деаерації за кімнатних і підвищених (до 70 °C) температурах.

• **Випробування на сульфідне корозійне розтріскування під напругою** за стандартом *NACE TM 0177 (СКРН, або SSC)* [77, 79]. Для цих корозійних випробувань використовується спеціальний стенд для корозійних випробувань. Найбільш поширеним обладнанням для цього виду випробувань є стенд «Кортест». Стенд дає змогу проводити випробування на корозійне розтріскування під напруженням різних зразків за стандартами *NACE* (рис. 4.16).

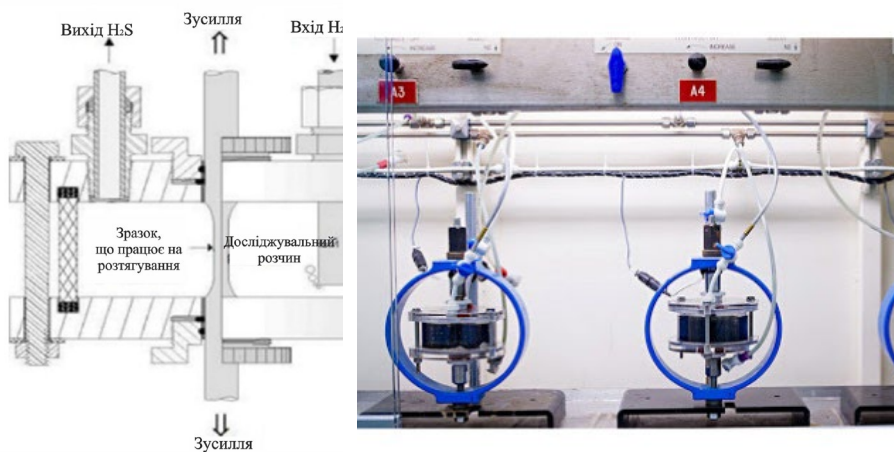


Рис. 4.16. Схема та загальний вигляд випробувального стенда «Кортест» для випробувань матеріалів під навантаженням у середовищі H₂S

Проведення цих випробувань дає змогу оцінити стійкість матеріалу під час одночасного впливу корозійного середовища, що містить H_2S , і навантажень на розтягування. Насичення випробувального розчину сірководнем відбувається шляхом барботування комірки зі зразком 100 % газоподібним H_2S . Тривалість випробувань – 720 год. Зразки оцінюються візуально на наявність або відсутність тріщин.

• **Випробування на загальну корозію** за стандартом *ASTM G31* [82]. Метою випробувань на загальну корозію є визначення швидкості корозії для сталей і сплавів у середовищах, що цікавлять. Корозійне середовище моделює експлуатаційні впливи експлуатаційних середовищ і, як правило, підбирається під конкретний запит споживачів. Оцінка результатів випробувань проводиться гравіметрично і за допомогою візуального огляду. Тривалість випробування за кожного методу залежить від мети випробування, природи випробовуваних металів, сплавів і засобів захисту, обраних критеріїв і методу оцінювання їхньої корозійної поведінки і може становити 24; 48; 96; 240; 480; 720; 2016 годин. (рис. 4.17).



Рис. 4.17. Зразки після випробувань в автоклаві (3,5 % NaCl, $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$)

4.1.4. Спеціальні види механічних випробувань.

Спеціальні види механічних випробувань використовуються коли треба визначити спроможність металевих виробів (найчастіше труб) не втрачати свої механічні властивості при їх подальшій обробці та

експлуатації. Розглянемо найбільш поширені види спеціальних механічних випробувань.

Випробування на стійкість труб до зминання (*Higt Collapse*).

Існує спеціальний клас безшовних обсадних труб із високою стійкістю до зминання (труби категорії *High Collapse*), які застосовують під час розробки нафтових і газових родовищ у складних геологічних умовах. Такі труби здатні чинити опір більшому тиску зминання без втрати стійкості профілю труби. Для чисельної оцінки стійкості обсадних труб, вони піддаються натурним випробуванням на установці всебічного зминання.

Для проведення випробувань, від готової труби відбирається три зразки відповідно до методики проведення випробувань:

- зразок для визначення рівня залишкових напружень у трубі;
- зразок для визначення механічних властивостей металу труби (межа плинності, межа міцності);
- зразок для проведення випробування на зминання.

Зразок, що відбирається для визначення залишкових напружень, являє собою частину труби і має довжину, що дорівнює двом зовнішнім діаметрам труби. Зразок для визначення механічних властивостей також являє собою частину труби довжиною 400 мм. Механічні властивості визначаються під час випробування зразка на розтягнення. Зразок для випробування на зминання залежно від діаметра труби має довжину від 915 до 2400 мм.

Зразок труби під час випробування на зминання навантажується зовнішнім тиском до моменту втрати стійкості профілю. Для труб цього класу напруження, що виникають у трубі, мають на 20...30 % перевищувати межу плинності.

Випробування на вигинання: під час випробувань на вигинання деформація відбувається в середній точці матеріалу, що піддається випробуванням, а вигинальна сила спричиняє увігнуту поверхню або вигинання від руйнування. Випробування на вигинання зазвичай проводять для визначення пластичності або стійкості зазначеного матеріалу до руйнування. Сила прикладається до випробувального зразка в його середній точці, щоб сформувати увігнуту поверхню з радіусом кривизни, що визначається відповідно до базового стандарту. Випробування на вигинання можна проводити на будь-якій універсальній випробувальній машині, що

використовується для випробувань на розтягнення. Зразок встановлюють на опорну плиту в нижньому захопленні і деформують згинальним ножом, що кріпиться у верхньому захопленні машини. Зразок згинається при піднятті нижнього або опусканні верхнього захоплення [83].

Критерієм придатності продукції може бути: заданий кут загинання зразків, поява першої тріщини під час загинання на кут, що дорівнює або більший від заданого, можливість загинання пластини до паралельності або зіткнення сторін. Існують також стандартизовані норми на перегинання листа, стрічки і дроту, в яких фіксують задану кількість перегинів, після яких з'явилися тріщини або зразок зруйнувався.

Випробування матеріалу на вигинання дає змогу визначити гнучкість, міцність на вигинання, міцність на розтягування і опір руйнуванню матеріалу. Ці властивості дають змогу прогнозувати поведінку матеріалу під час експлуатації під тиском. Якщо матеріал починає ламатися або повністю ламається під час випробування на кручення в трьох або чотирьох точках, неминуче, що цей матеріал викличе катастрофу в будь-якій конструкції.

Випробування на сплющування труб. При випробуванні на міцність сталеві труби розрахунок на сплющування відбувається наступний процес: випробуваний зразок (фрагмент труби, близько 20–50 мм довжиною), поміщається між площинами, що вдавлюють її, до позначеної технічним завданням відстані. Для технічної правильності та чистоти зразок матеріалу перед проведенням випробування на сплющування труб необхідно перпендикулярно надрізати на глибину не більше 0.8 діаметра.

Після закінчення сплющування візуально не повинні спостерігатися: ні деформації, ні розриви, ні інші фізичні ушкодження. Про результати проведеного випробування на сплющування труб складається відповідний лабораторний висновок (протокол) із зазначенням умов та результатів проведеного тесту. Протокол випробування дає оцінку відповідності та якості наданого матеріалу. Усі дослідження проводяться відповідно до ДСТУ EN ISO 8492:2022 [84].

Випробування на кручення. Кручення здійснюється двома різними за величиною і протилежно спрямованими крутними моментами, які прикладаються до кінців зразка в площинах, нормальних його поздовжньої осі.

Особливо часто ці випробування використовують для оцінки властивостей матеріалів валів і дроту та зварних з'єднань. Методика випробувань зразків з будь-яких матеріалів діаметром не менше 5 мм стандартизована [85, 86].

Випробування на кручення проводять на спеціальних машинах, які повинні забезпечувати надійне центрування зразка, плавність навантаження і відсутність сил, що згинають, можливість досить точного задання і вимірювання величини крутного моменту. Використовуються машини з горизонтальним і вертикальним розташуванням зразка. Максимальний крутний момент може змінюватися від 60 Нм до 2 Нм.

Як міру деформації в процесі випробування на кручення фіксують кут закручування. За аналогією з іншими статичними випробуваннями під час кручення визначають умовні межі пропорційності, пружності, плинності, міцності, а також істинну межу міцності. Але всі ці властивості виражають не через нормальні, а через дотичні напруження.

Різновидом випробувань на кручення є проба на скручування дроту діаметром $d \leq 10$ мм. Зразок завдовжки $100d$ затискають у твердих губках захоплень і скручують під час обертання одного з них із постійною швидкістю (30...90 об/хв). У результаті випробування визначають число обертів активного захвата до моменту руйнування дроту. Це число і вважають критерієм його якості (пластичності).

Випробування на зсув (зріз). Проведення таких випробувань актуальне для виробів, які в процесі експлуатації зазнають зсувних навантажень. У багатьох з'єднаннях деталей машин скріплювальні елементи (анкерні болти, заклепки, шпонки, болти, вставлені без зазору, гвинтові різьблення і т. д.) працюють на зріз. Під час призначення допустимих напружень для таких елементів необхідно використовувати результати випробувань, що моделюють їхню роботу в з'єднанні, тобто під час перерізання [61]. Це дає змогу визначити небезпечне напруження, а саме межу міцності під час зрізу $\tau_{пч}$. Випробування циліндричних зразків на зріз проводять на спеціальному пристрої (рис. 4.18). Зразок з'єднує обидві частини пристрою на зразок болта або заклепки.

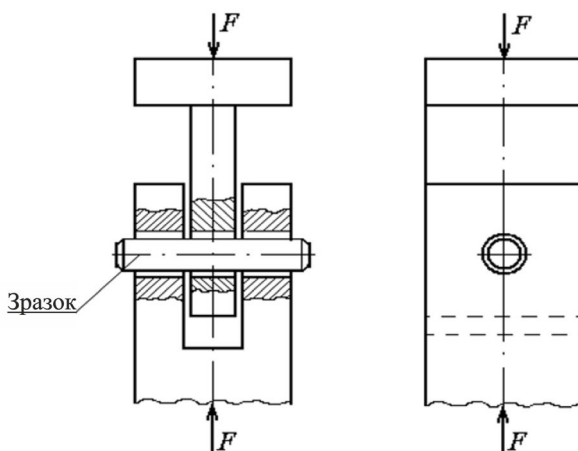


Рис. 4.18. Пристрій для випробувань на зріз

Принцип роботи пристрою такий. Під дією сил, що стискають пристрій, його верхня частина (вушко) просувається в нижній (вилка). Цьому руху перешкоджає зразок. Під час збільшення сили відбувається зсув середньої його частини відносно крайніх, і зразок перерізається по двох площинах. Очевидно, що випробування можна проводити і за дії розтягувальних сил.

Випробування на бортування труб полягає у відбортовуванні відрізка труби з утворенням фланця заданого діаметра D (рис. 4.19). Таке випробування широко застосовується, наприклад, у виробництві котлів із димогарними трубами [87].

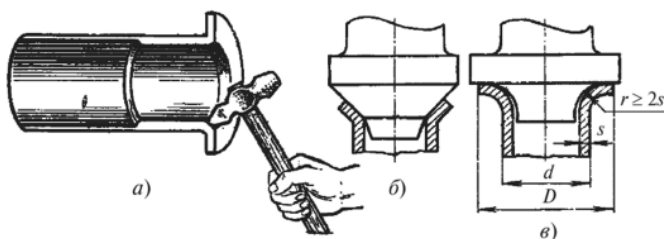


Рис. 4.19. Проби на бортування: а – без оправки; б і в – з оправкою

Площина різу має бути перпендикулярна до поздовжньої осі труби, а також забезпечена прямокутність торців із зовнішньою стінкою. Краї зразка мають бути закруглені, а внутрішні і зовнішні поверхні зразка очищені від окалини, іржі та бруду.

Випробування на бортування проводять плавним відбортюванням на 90° кінця зразка за допомогою двох загартованих і шліфованих оправок до одержання заданого діаметра. Перед випробуванням робочі частини обох оправок і внутрішня поверхня зразка труби, яка відбортюється, мають бути покриті консистентним мастилом (солідолом).

Зразок встановлюють торцем на ковадло або важку плиту, у нього вставляють шліфовану конусну оправку (рис. 4.19, б) з кутом конуса 90° і кінець зразка злегка роздають ударами молотка. Для забезпечення стійкості зразок під час процесу роздавання потрібно встановити у важке кільце заввишки, що дорівнює 0,75 висоти зразка, з отвором, відповідним зовнішньому діаметру зразка. Кінець зразка доцільно роздати, плавним тиском під пресом.

Потім змінюють оправку і переносять зразок з опорним кільцем і оправленням під ручний механічний прес або в лещата і плавно відбортюють зразок на 90° до отримання заданого діаметра. Довжина зразка для випробування має бути не меншою, ніж 0,51D фланця. Радіус оправки r має бути не меншим, ніж дві товщини стінки труби.

Випробування має проводитися за незмінного положення оправки. Обертальний рух оправки або зразка не допускається. Швидкість впровадження цієї оправки має бути від 20 до 80 мм/хв. Випробування проводять за температури навколишнього середовища, але не нижче 9...10 °С.

Величина бортування у відсотках обчислюється за формулою

$$X = (D - d) - 100/d \%, \quad (4.11)$$

де D – діаметр відбортюваного фланця, мм; d – зовнішній діаметр труби, мм.

При бортуванні у зоні згинання не повинно бути тріщин, надривів, розшарувань або інших подібних дефектів.

4.2. Неруйнівні методи технічного контролю (НК)

Під неруйнівними методами контролю розуміють, як правило, методи контролю за непрямыми ознаками, що не змінюють (на відміну від руйнівних методів) якості, параметрів, характеристик та експлуатаційних властивостей виробу. Початковою інформацією для неруйнівних методів контролю є викликані наявністю у виробі дефектів різного роду аномалії в реєстрованих фізичних параметрах. Це можуть бути спотворення потоку теплового випромінювання; зміни забарвлення спеціальних контролюючих покриттів; розсіювання, відбиття і поглинання ультразвукових або електромагнітних хвиль, корпускулярного потоку тощо. За характером аномалій робляться висновки про наявність дефектів у виробі, їхні особливості (тип дефекту, розміри, форма, місце розташування) і причини виникнення.

Винятком є випробування зварних і безшовних труб внутрішнім гідростатичним тиском, під час яких показники якості труб (міцність тіла труби, відсутність протікання в різьбовому з'єднанні, відсутність непроварів зварного шва) визначають за прямими ознаками – падінням тиску всередині труби.

Умовно всі методи неруйнівного контролю якості продукції можна розділити на три групи: випробування металопродукції (труби, балони) внутрішнім гідростатичним тиском; візуально-оптичний контроль, зокрема капілярна дефектоскопія; та дефектоскопія, що ґрунтується на виявленні дефектів за допомогою різного роду випромінювань (рентгівівське, γ -випромінювання) і різного роду полів (електричне, магнітне, теплове, акустичне тощо).

Переваги неруйнівних методів контролю:

- Визначення та вимірювання основних параметрів виробу можна проводити в процесі його виробництва, випробування, експлуатації або ремонту без порушення режиму функціонування та зміни його характеристик.
- Можливість контролю якості в динамічному режимі, зокрема під час прискорених випробувань.
- Підвищення об'єктивності та достовірності контролю під час технічного обслуговування.

- Можливість виявлення прихованих (глибинних) дефектів на кшталт повітряних раковин, непропаю, відшарувань у багатошаровій конструкції тощо, визначення ступеня небезпеки виявлених дефектів для нормального функціонування виробу.

- Можливість використання багатьох неруйнівних методів контролю як профілактичного заходу, здатного попередити катастрофічні руйнування виробу.

- Неруйнівні методи контролю мають велику точність, надійність і чутливість. Застосування цих методів і аналіз результату випробувань сприяє поліпшенню параметрів виробу і знаходженню оптимальних конструкторських рішень.

- Вартість неруйнівних методів контролю нижча, ніж вартість руйнівних методів, що застосовуються для вимірювань одних і тих самих параметрів виробів.

- При неруйнівних методах знижуються витрати на виробництво, оскільки неякісні деталі виявляються на початковому етапі виготовлення виробів.

- Сучасні методи неруйнівних випробувань дають змогу проводити 100 %-вий контроль продукції і в багатьох випадках автоматизувати операції контролю.

Незважаючи на очевидні переваги неруйнівних методів контролю перед руйнівними, їм також притаманні свої недоліки:

- Неруйнівні методи контролю, як правило, є непрямыми методами (наприклад, для виявлення неметалевих включень у сплавах або металах використовують електромагнітні поля, за зміною напруженості яких судять про наявність дефекту в контрольованому виробі).

- Вплив різних дефектів на термін служби і надійність виробу не може бути встановлений за допомогою неруйнівних методів контролю. Зв'язок між непрямыми вимірюваннями та експлуатаційною надійністю має бути визначений іншими способами.

- Результати випробувань мають переважно якісний характер, а не кількісний. З їхньою допомогою можна виявити дефект або простежити механізм руйнування, але неможливо, здебільшого, визначити термін служби виробу до руйнування.

- Результати більшості методів неруйнівного контролю потребують кваліфікованого розшифрування та інтерпретації і великої підготовчої роботи: обстеження однотипних виробів, підготовки зразків дефектів (складання таблиці дефектів), а також підготовки і тренування обслуговуючого персоналу.

Усі відомі способи неруйнівного контролю (їх налічується понад 100), називають методами неруйнівного контролю (МНК). МНК, засновані на фізичних законах, умовно групують у види і класифікують за трьома ознаками:

- за принципом взаємодії фізичного поля або речовини з контрольованим об’єктом;
- за вихідним інформативним параметром (відмінні властивості проникаючої речовини або фізичного поля, що реєструються після його взаємодії з предметом контролю);
- за способом отримання первинних відомостей (сукупності властивостей проникаючої речовини або фізичного поля, що реєструються після закінчення його впливу на контрольований об’єкт).

Застосовуючи тільки один метод або вид неруйнівного контролю, неможливо отримати повне уявлення про якість виробу і виявити всі дефекти, різні за типорозмірами, формою, розташуванням або орієнтацією.

Під час практичного використання методів неруйнівного контролю необхідно враховувати їхні специфічні особливості. Більшість дефектів можуть бути виявлені, як правило, не одним, а кількома методами неруйнівного контролю, що характеризуються різною чутливістю, рівнем достовірності, складністю, тривалістю контролю та іншими параметрами. Це вимагає розв’язання завдання раціонального вибору методів неруйнівного контролю з урахуванням специфіки методів і контрольованих виробів.

Залежно від фізичних явищ, покладених в основу методів неруйнівного контролю, вони підрозділяються на такі види: оптичні, капілярні, теплові, радіаційні, акустичні, магнітні, електромагнітні, електричні, радіохвильові тощо.

У загальному випадку неруйнівні методи контролю охоплюють збирання й оцінювання інформації, що здійснюються чутливим елементом (датчиком) або використовуючою енергією і середовищем (рідинами,

променями тощо), які зазнають змін під час взаємодії з контрольованим матеріалом або виробом.

НК дає змогу визначити якість злитків, заготовок, виробів, перевірити ефективність удосконалення всього виробничого процесу. Дає можливість ретельно відібрати придатну частину металу. За допомогою кожного окремо взятого методу вирішують обмежене коло завдань технічного контролю. Немає, і не може бути універсального методу. Тому вибір методу НК і розроблення методики контролю слід починати з ретельного аналізу можливих видів дефектів виробу, характеру їхньої появи та розвитку.

4.2.1. Гідравлічні випробування.

Випробування внутрішнім гідростатичним тиском (гідравлічні випробування) є обов'язковими для контролю якості значної частки сортаменту безшовних сталевих труб (контроль міцності тіла труби), 100 % контроль протікання у різьбовому з'єднанні для обсадних і насосно-компресорних труб і контроль міцності тіла труби, а також 100 % контроль зварних труб (контроль суцільності зварного шва). Гідравлічні випробування здійснюються на спеціальному обладнанні – гідравлічних пресах. Випробування проводять у такий спосіб: у внутрішню порожнину герметично закритої з обох кінців труби нагнітають воду або емульсію, тиск рідини доводять до нормованого рівня і трубу витримують під цим тиском упродовж часу, визначеного відповідними стандартами або технічними умовами [88].

4.2.2. Візуально-оптичні методи неруйнівного контролю

Будь-який технічний контроль якості металопродукції, в основному, починається з візуального огляду виробу листа, сортового прокату, поковки тощо неозброєним оком або за допомогою відповідних оптичних приладів (лупи, спеціальних мікроскопів тощо).

Візуальна дефектоскопія дає змогу виявити тільки поверхневі дефекти (тріщини, полонини, заходи тощо) у виробах, відхилення від заданих геометричних розмірів, дефекти покриттів, нанесених на металеву основу [89].

Мінімальний розмір дефектів, що виявляються неозброєним оком, становить 0,1...0,2 мм, тому робочі місця осіб, які здійснюють контроль, зазвичай оснащуються лупами чотири-десятикратного збільшення зображення. Однак, і в цьому разі виявлення дрібних дефектів призводить до максимального напруження зору, не дає належного ефекту і вимагає оснащення робочих місць контролерів досконалішою технікою – мікроскопами з діапазоном збільшень 30...4000X і більше, що дає змогу зменшити розмір дефектів, що виявляються, до десятків мікрон і менше.

Значного поширення метод оптичного контролю набув у зв'язку зі створенням оптичного квантового генератора. За його допомогою здійснюють контроль геометричних розмірів виробів зі складною конфігурацією, несучільностей, неоднорідностей, деформацій, вібрацій, внутрішніх напружень прозорих об'єктів, концентрацій, чистоти газів і рідин, товщини плівкових покриттів, шорсткості поверхні виробів.

Одним із найперспективніших напрямів візуальних методів контролю є голографічні методи у видимому діапазоні оптичного випромінювання.

Серед методів оптичної голографії особливе місце посідає голографічна інтерферометрія. Цей метод контролю, заснований на інтерференції хвиль, уперше був запропонований у 1948 р. фізиком Д.Габором. У процесі контролю якості на фотоплівку одночасно із «сигнальною» хвилею, розсіяною об'єктом, спрямовувалася «опорна» хвиля від того ж джерела світла. Під час інтерференції цих хвиль виникала картина, що містила повну інформацію про об'єкт, яка фіксувалася на світлочутливій поверхні – голограмі. Під час опромінення голограми або її ділянки опорною хвилею видно об'ємне зображення контрольованого об'єкта з реєстрацією можливих змін цього об'єкта. Голограму можна отримувати за допомогою хвиль будь-якої природи і будь-якого діапазону частот.

Основними елементами установки для реалізації голографічної інтерферометрії є джерело випромінювання (лазер), оптичні елементи для формування та розподілу світлових пучків і реєструвальний елемент (фотопластинка).

Інтерферограми дають багату інформацію щодо розподілу локальних деформацій і дозволяють виявити потенційно надійні ділянки. Контроль якості оптично прозорих деталей, виявлення неоднорідностей скла, контроль

і вимірювання геометричних розмірів інтегральних схем, якість поверхні напівпровідників і вивчення деформацій, пов'язаних із локальними перегріваннями виробів, – далеко не повна сфера застосування голографічної інтерферометрії в радіоелектроніці та електротехніці, які ми розглядаємо.

4.2.3. Капілярний і магнітопорошковий методи неруйнівного контролю

Магнітопорошковий і капілярний методи неруйнівного контролю спрямовані на виявлення дефектів, що тільки виходять на поверхню виробу.

Методи капілярної дефектоскопії поділяють на колірні та люмінесцентні.

Капілярна дефектоскопія ґрунтується на штучному підвищенні світло- і кольороконтрастності поверхневих дефектів (тріщин, раковин, несучільностей, пористості) виробів із металів, кераміки, металокераміки, скла, полімерних та гумових виробів відносно неушкодженої ділянки шляхом проникнення спеціальних індикаторних речовин (пенетрантів) у поверхневі макродефекти виробу під дією капілярного тиску.

Попередньо підготовлений контрольований виріб (поверхня має бути очищена від нагару, шлаку, фарби, металевої плівки тощо) поміщається в резервуар, заповнений фарбувальною або люмінесцентною рідиною. Рідина (пенетрант) повинна легко проникати в тріщини і пори та затримуватися в них. Пенетрант повинен мати малу в'язкість, повинен добре розчиняти фарбу або люміноформ, не викликати корозії матеріалу виробу. Як пенетранти використовують склади на основі бензин-скипідар, бензол-скипідар-керосин тощо. До складу люмінесцентних пенетрантів входять гас, норіол, автол, трансформаторне масло тощо. Після змочування виробу пенетрантом, промивання і просушування, на його поверхню наносять шар швидковисихаючого покриття – проявника (водноспиртовий розчин каоліну або окису магнію). Пенетрант, що проник у поверхневі дефекти виробу, забарвлює покриття в червоний колір, завдяки чому на білому тлі чітко проявляються поверхневі сліди дефектів.

Під час використання люмінесцентного методу після змочування поверхні контрольованого виробу пенетрантом, промивання та нанесення тонкого шару проявника (окис магнію або силікагель), виріб висвітлюють

ультрафіолетовим світлом – відбувається люмінесценція індикаторної речовини, що потрапила у поверхневі дефекти, у променях ультрафіолетового світла. Результати капілярної дефектоскопії фіксуються фотографічно.

Чутливість капілярної дефектоскопії визначається абсолютними розмірами дефектів і обмежується верхньою і нижньою межами їх виявлення. Нижньою межею чутливості є різні тупикові несущільності з шириною розкриття менше ніж 1 мк, верхньою – не більше ніж 0,4 мм будь-якої протяжності. Дефекти з більшою шириною розкриття піддавати капілярній дефектоскопії не можна, зважаючи на інтенсивне вимивання пенетранта з гирла пороків металу. Цей метод придатний для виявлення несущільностей із поперечними розміром 0,1 – 500 мкм, зокрема наскрізних, на поверхні чорних і кольорових металів, сплавів, кераміки, скла тощо. Широко застосовується для контролю цілісності зварного шва [90, 91] (рис. 4.20).

1 стадія – попереднє очищення поверхні, щоб барвник міг проникнути в дефекти на поверхні;

2 стадія – нанесення пенетранта. Пенетрант, зазвичай червоного кольору, наноситься на поверхню шляхом розпилення, пензлем або зануренням об'єкта контролю у ванну;

3 стадія – видалення надлишків пенетранта;

4 стадія – нанесення проявника. Після просушування відразу ж на об'єкт контролю наноситься проявник, зазвичай білого кольору, тонким рівним шаром;

5 стадія – контроль. Інспектування починається безпосередньо після закінчення процесу проявлення і закінчується згідно з різними стандартами не більше, ніж через 30 хв.

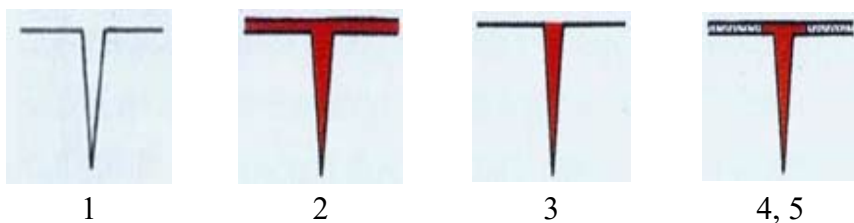


Рис. 4.20. 5 стадій виявлення дефектів капілярним методом

Під час капілярного методу контролю вироби, як правило, оглядають неозброєним оком або із застосуванням лупи 2...4-х кратного збільшення. Як еталон, з яким порівнюють дефекти на виробах, що перевіряються, використовують зразки контрольованих виробів, виготовлені з того самого матеріалу, за тією самою технологією, з дефектами, близькими за розмірами до нижньої межі чутливості методу. Крім робочих еталонів зазвичай мають бути і контрольні. Обидва еталони повинні мати паспорт з описом і фотографією наявних на них вад матеріалу, виявлених капілярним методом.

Магнітна (магнітопорошкова) дефектоскопія заснована на дослідженні викривлень створеного магнітним дефектоскопом магнітного поля, що виникає у місцях дефектів у виробах із феромагнітних матеріалів. Магнітопорошковий метод призначений для виявлення поверхневих і підповерхневих (на глибині до 1,5...2 мм) дефектів типу порушення суцільності матеріалу виробу: тріщини, волосовини, розшарування, що виходять на поверхню, пори тощо. Індикатором слугує магнітний порошок (наприклад, закис-окис заліза) або його суспензія в мастилі. Для виявлення магнітних полів над дефектами на контрольовані ділянки наносять феромагнітні частинки, що перебувають у зваженому стані в рідині (мокрый метод) або в повітрі (сухий метод). Чутливість методу магнітної дефектоскопії залежить від магнітних характеристик матеріалів, індикаторів, які застосовують, режимів намагнічування виробу та ін. [92] (рис. 4.21).

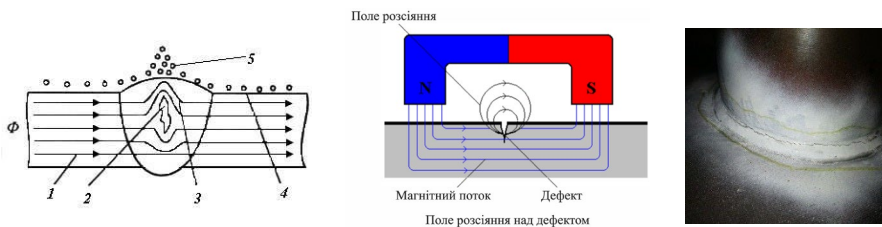


Рис. 4.21. Магнітопорошковий метод дефектоскопії (МТ)

Магнітний потік (1) у бездефектній частині виробу не змінює свого напрямку; якщо ж на шляху його трапляються ділянки зі зниженою магнітною проникністю, наприклад, дефекти (2) у вигляді розриву суцільності металу

(тріщини, неметалеві включення і т. ін.), то частина силових ліній (3) магнітного поля виходить із деталі назовні і входить у неї назад, при цьому виникають місцеві магнітні полюси (N і S) і, як наслідок, магнітне поле над дефектом. Оскільки магнітне поле над дефектом неоднорідне, то на магнітні частинки (4), що потрапили в це поле, діє сила, яка прагне затягнути частинки в місце найбільшої концентрації магнітних силових ліній, тобто, до дефекту. Частинки в області поля дефекту намагнічуються і притягуються одна до одної як магнітні диполі під дією сили так, що утворюють ланцюгові структури, орієнтовані за магнітними силовими лініями поля. У результаті відбувається скупчення магнітних частинок над дефектом у вигляді валика (5). Ширина валика з осілого порошку значно більша за ширину тріщин, волосин, тому магнітопорошковим методом можна виявити найдрібніші тріщини з шириною розкриття 0,001 мм, глибиною 0,01 мм і більше, а також інші дефекти. Довжина валика порошку порівнянна з довжиною дефекту. З іншого боку, цей метод не дає об'єктивної інформації про глибину дефекту, тому він не придатний для розв'язання завдань дефектометрії, в цьому разі для визначення глибини.

Під час магнітопорошкового методу контролю застосовують чотири види намагнічування: циркулярне, поздовжнє (полюсне), комбіноване і в обертовому магнітному полі:

- *Циркулярний* – вид намагнічування, за якого магнітне поле замикається всередині деталі, а на її кінцях не виникають магнітні полюси.
- *Поздовжній (полюсний)* – вид намагнічування, за якого магнітне поле спрямоване вздовж деталі, утворюючи на її кінцях магнітні полюси.
- *Комбінований* – вид намагнічування, за якого деталь перебуває під впливом двох або більше магнітних полів із неоднаковим напрямком.
- *В магнітному полі, що обертається* – вид намагнічування, за якого деталь поміщають у магнітне поле з постійною зміною напрямку.

На практиці найчастіше використовуються перші три види намагнічування. Це дуже актуально для польових робіт, де часто спостерігається повна відсутність електроенергії.

Електростатична дефектоскопія заснована на використанні електростатичного поля, в яке поміщають виріб. Для виявлення поверхневих тріщин у виробах із неелектропровідних матеріалів (скла, пластмас,

порцеляни), а також із металів, вкритих тими ж матеріалами, виріб обпилюють тонким шаром порошку крейди з пульверизатора з ебонітовим наконечником (порошковий метод). Частинки крейди при цьому отримують позитивний заряд і в результаті неоднорідності електростатичного поля скупчуються біля країв тріщин. Перед запиленням деталі необхідно змочити іоногенною рідиною.

4.2.4. Теплові (термографічні) методи неруйнівного контролю

Теплові методи неруйнівного контролю ґрунтуються на зв'язку між тепловим потоком і температурним градієнтом, що виникає за наявності дефектів у досліджуваних об'єктах. Якість деталей, вузлів і виробів загалом оцінюють як за характером розподілу температури, так і за зміною температури окремих ділянок їхньої поверхні.

Теплове (інфрачервоне) зображення дефекту отримують у відбитому, прохідному або власному випромінюванні досліджуваного виробу.

Принципова схема теплового методу неруйнівного контролю для випадку відбитого випромінювання показана на рис. 4.22.

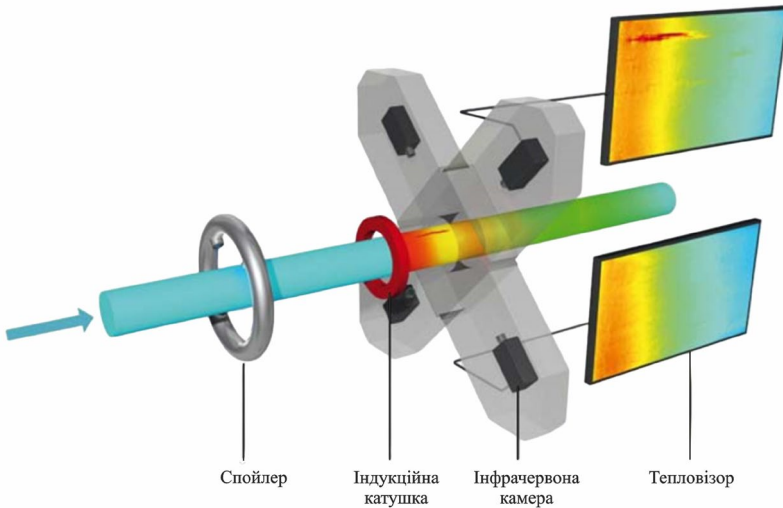


Рис.4.22. Схема теплового (термографічного) методу НК

Для контролю виробу під час нагрівання тепла енергія у формі інфрачервоного випромінювання потрапляє на поверхню контрольованого виробу. Тепло проникає у виріб зі швидкістю, що залежить від внутрішніх його характеристик. Дефектні ділянки у виробі змінюють тепловий потік. Швидкість поширення тепла вимірюється теплочутливим приймачем - радіометром, що сприймає інфрачервоне (ІЧ) випромінювання від поверхні. Якщо тепло рівномірно поширюється випробовуваною поверхнею, воно проникає рівномірно і у виріб. За наявності дефекту однорідність теплового потоку порушується, і навколо дефекту тепловий потік згущується - з'являється гаряча точка. На цьому принципі засновані теплові (інфрачервоні) дефектоскопи, що застосовуються для виявлення поверхневих дефектів до 3 мм на глибині 1...1,5 мм.

У низці випадків під час контролю може бути використане власне теплове (інфрачервоне) випромінювання об'єктів під час їхнього функціонування в робочому або спеціально обраному контрольному режимах. Так, наприклад, спостереження й оцінка теплового поля електричної схеми може бути використана для визначення тих складових елементів схеми, які змінили свою характеристику, працюють у відмінному від нормального теплового режимі або вийшли з ладу. Аналогічно приховані дефекти в друкованих платах (мікротріщини, підтрукуювання, відшаровування та ін.), впливаючи на умову тепловиділення і теплопередачі, істотно змінюють температурне поле в місці дефекту. Структурна схема тепловізора містить: оптичну систему, скануючий пристрій, приймач інфрачервоного випромінювання, блок індикації. Оптична система збирає інфрачервоне випромінювання і фокусує його на багатоеlementну мозаїку чутливих ділянок приймачів випромінювання. Чутливі елементи перетворюють оптичні сигнали у відповідні електричні, які потім посилюються і відтворюються у вигляді зображення на відеоконтрольному пристрої. Методика тепловізійного контролю включає проведення як якісного, так і кількісного аналізу термограм. У першому випадку тепловий режим оцінюється за яскравістю зображення на відеоконтрольному пристрої, на порівнянні термограм з еталонними. Кількісний аналіз проводиться за розподілом обчисленої та істинної температури поверхні об'єкта. Визначення істинної температури здійснюється шляхом масштабування

термограми відповідно до калібрувальних характеристик. Важливою властивістю теплового методу неруйнівного контролю є те, що він дає змогу контролювати якість у часі (динамічний режим контролю).

Крім розглянутих теплових методів слід зазначити також:

- Термоелектричну дефектоскопію, засновану на вимірюванні електрорушійної сили (термоелектрична електрична сила), що виникає в замкнутому ланцюзі під час нагрівання місця контакту двох різнорідних матеріалів. Якщо один із цих матеріалів узяти за еталон, то за заданої різниці температур гарячого і холодного контактів величина і знак термо-ЕРС визначатиметься хімічним складом другого матеріалу.

- Використання температурно-чутливих фарб і складів, що змінюють колір або плавляться за певних режимів роботи виробу.

- Люмінесцентні методи, засновані на зміні інтенсивності світіння деяких люмінофорів під дією ультрафіолетового випромінювання, залежного від температури.

- Рідкокристалічні методи, засновані на використанні властивостей деяких хімічних сполук, забарвлення яких чутливе до температури, зворотньо змінюється зі зміною температури внаслідок дифракції та інтерференції в тонких плівках.

- Фотоемальсійні методи, що використовують властивості фотографічних емульсій, швидкість прояву яких залежить від температури.

4.2.5. Радіаційні та рентгенографічні методи неруйнівного контролю

Методи з використанням проникаючого випромінювання отримали назву радіаційної дефектоскопії. Радіаційні методи неруйнівного контролю ґрунтуються на реєстрації зображення, що отримується в результаті різного ослаблення корпускулярного потоку ділянками контрольованого об'єкта. Проникаючі випромінювання особливо ефективні під час виявлення несуцільностей у литті та зварних конструкціях, у пайках електричних схем.

Для контролю використовують потоки нейтронів, електронів, позитронів, важких заряджених частинок (протонів, альфа-частинок тощо), а також рентгенівське або гамма-випромінювання. Можливості виявлення дефектів виробу залежать як від виду випромінювання, його енергії, так і від

технічних характеристик обладнання, що використовується. Реєстрація зображення, що отримується «просвічуванням» виробу, проводиться на фотоплівці (нейтронографія, рентгенографія тощо) або на спеціальному флуоресцентному чи телевізійному екранах (рентгеноскопія), з підкресленням градацій у щільності тіні різними кольорами спектра [93].

Основною характеристикою випромінювання для задач контролю є проникаюча здатність, що залежить від поглинання випромінювання матеріалів виробу. Методи радіаційного контролю дають змогу розглянути внутрішню структуру, але не забезпечують виявлення площинних дефектів, особливо розміщених уздовж напрямку випромінювання тощо.

Нейтронний радіографічний контроль здійснюється переважно потоками нейтронів різних енергій. Як джерела нейтронного потоку використовують радіоізотопи з мінімальною густиною потоку нейтронів ($10 \dots 10^4 \text{ c}^{-1} \text{ м}^{-2}$), прискорювачі (густина потоку $10^3 - 10^6 \text{ c}^{-1} \text{ м}^{-2}$) або реактори (густина потоку до $10^8 \text{ c}^{-1} \text{ м}^{-2}$).

Радіоізотопні радіографи від малої до середньої роздільної здатності характеризуються портативністю, але великим часом експозиції (десятки хвилин).

Більш висока роздільна здатність і менший час експозиції забезпечується при використанні потоку нейтронів з прискорювачів і тим більше з реакторів. Електронна дефектоскопія здійснюється за допомогою пучка електронів, виведеного з бетатронів або лінійних прискорювачів. Реєстрація електронів, що пройшли, відбитих або розсіяних виробом, здійснюється радіографуванням на плівку за допомогою чутливих до електронних потоків перетворювачів сцинтиляційного типу з виходом на телевізійний екран (чутливість близько 0,3 % від товщини виробу), а також спектрометричним методом (чутливість досягає 0,05 %). Недоліком методу є обмежена глибина контролю (до 3 мм), зумовлена порівняно малим пробігом електронів.

Позитронна дефектоскопія (де джерелом є позитрони, що випускаються радіоактивним матеріалом) дає змогу визначити початок втомного руйнування в металах ще до появи втомних тріщин. Оскільки позитрони притягуються до лінійних дефектів кристалічної решітки, що виникають до появи втомної тріщини, середній час життя позитрона можна

пов'язати з наявністю дефектів або областей втоми в матеріалі. Це дає змогу контролювати характеристики пластичної деформації в таких процесах, зокрема, як загартування, відпуск або термообробка.

Дефектоскопія з використанням потоків важких заряджених частинок включає в себе протонну радіографію, протонну інтроскопію (просвічування виробу). Під час протонної радіографії фіксується слід (трек) руху частинки за допомогою чутливої плівки або термопластика. У зоні дефекту відбувається зміна напрямку сліду, який може бути вимірянний. Під час протонної інтроскопії за допомогою бульбашкової або іскрової камер, що реєструють, фіксують напрямок і енергію протона, що пройшов через контрольований виріб. Це дає змогу встановити місце розташування, розміри дефектів, а також властивості матеріалу дефектної зони (атомний номер, заряд ядра). Чутливість цих методів при оцінці локальних змін густини – до 0,3 %, що в багато десятків разів перевищує чутливість рентгенівських методів контролю.

Основним обмеженням під час використання радіаційних методів неруйнівного контролю є можливість радіаційного пошкодження контрольованого виробу.

Рентгенівські методи неруйнівного контролю ґрунтуються на реєстрації тіньового зображення, одержуваного в результаті «просвічування» контрольованого виробу рентгенівськими променями (електромагнітними коливаннями з довжиною хвилі від 10^{-6} до 10^{-8} м). Поглинання рентгенівських променів залежить від щільності середовища та атомного номера елементів, що утворюють матеріал середовища. Наявність таких дефектів, як тріщини, раковини і чужорідні включення, призводить до того, що промені, які проходять через матеріал, послаблюються різною мірою. Реєструючи розподіл інтенсивності променів, що проходять, можна визначити наявність і розташування різних неоднорідностей матеріалу.

Методи контролю з використанням рентгенівських променів поділяють на методи рентгеноскопії та методи рентгенографії. Рентгеноскопія – візуалізація тіньового рентгенівського зображення на рентгенівському флуоресцентному або телевізійному екранах. Рентгенографія – отримання тіньового зображення (рентгенограми) на

рентгенівській плівці (касета з рентгенівською плівкою розміщується в рентгенівському пучку за виробом).

Чутливість методів рентгенодефектоскопії визначається відношенням протяжності дефекту в напрямі просвічування до товщини деталі в цьому перерізі і сталевих деталей порівняно невеликої товщини (до 80 мм) і у виробках з легких сплавів товщиною до 250 мм. Промислові рентгенівські установки забезпечують енергію випромінювання від 5 до 400 кев ($1 \text{ ев} = 1,60210 \cdot 10^{19} \text{ Дж}$).

Для рентгенівської дефектоскопії використовують апарати, основними елементами яких є рентгенівська трубка, джерело живлення і пристрій для керування режимом трубки. У промисловій дефектоскопії як джерела у-випромінювання найчастіше використовують тулій Tm^{170} , селен Se^{75} , іридій Ir^{192} , цезій Cs^{137} і кобальт Co^{60} . Це штучні радіоізотопи (нукліди), які отримують у ядерних реакторах під час опромінення речовин у нейтронних потоках або під час обробки продуктів розпаду, що утворюються в реакторах. Блок-схеми рентгенотелевізійного та радіографічного контролю наведено на рис. 4.23.

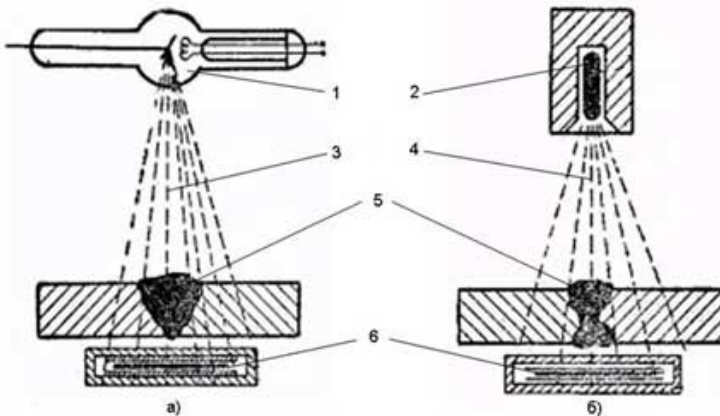


Рис.4.23. Блок-схема рентгенотелевізійного (а) і радіографічного (б) контролю: 1 – рентгенівська трубка; 2 – ампула з радіоактивною речовиною у свинцевому кожусі; 3 – рентгенівські промені; 4 – гамма-промені; 5 – об'єкт контролю (наприклад, зварний шов); 6 – касета з рентгенівською плівкою

Широкого поширення набули також рентгенотелевізійні мікроскопи, що дають змогу виявляти дефекти, розміри яких не перевищують одиниць і десятків мікрон. Рентгеновські методи неруйнівного контролю є одними з найефективніших методів діагностики та дефектоскопії в машинобудуванні, металургії (виявлення раковин, тріщин, ліквідаційних включень у литих і зварювальних виробках), у радіоелектроніці (визначення внутрішніх монтажних дефектів, поломок деталей, обривів і замикання провідників), у медицині тощо.

Гамма-дефектоскопія має ту саму фізичну сутність основи, що й рентгенодефектоскопія, але при цьому використовують гамма-промені (електромагнітні коливання з довжиною хвилі менш як 10^{-10} м), які випромінюють штучні радіоактивні ізотопи різних металів (кобальту, цезію, європію, танталу та ін.). Під час гамма-дефектоскопії використовують енергію випромінювання від кількох десятків Кев до 1...2 Мев для просвічування деталей великої товщини. Апаратура для гамма-дефектоскопії порівняно з рентгенодефектоскопічною проста, джерело випромінювання компактне.

Під час роботи з джерелами рентгеновського та гамма-випромінювання має бути забезпечений біологічний захист.

Нині дедалі більшого поширення набувають установки радіографічного контролю геометричних параметрів металопрокату (здебільшого листа) і гарячекатаних труб у реальному часі в процесі виробництва, що дають змогу здійснювати контроль виконання тих чи інших технологічних операцій і оперативно впливати на ліквідацію виявлених відхилень.

На рис. 4.24 показано спрощену функціональну схему одного із простих товщиномірів листів, побудованого на компенсаційній схемі з безпосереднім виміром товщини за інтенсивністю випромінювання, що пройшло. Товщину листа визначають за різницею інтенсивностей джерел випромінювання, що падають на перетворювачі Π_1 і Π_2 . Для зниження потоку випромінювання, що падає на перетворювач Π_2 , він часто закритий екрануючою шторкою ЕШ, що слугує для встановлення початкового показання товщиноміра. Електричні сигнали перетворювачів Π_1 і Π_2

надходять на диференціальний підсилювач ДП, тому в разі відхилення товщини відносно мінімального значення, встановленого під час налаштування, на його виході отримують сигнал того чи іншого знака. Інтегруючий блок ІНТ усереднює імпульсні сигнали, що надходять від підсилювача ДП, і створює напругу постійного струму, що подається на вимірювальний прилад ВП, який показує відхилення товщини аркуша від відношення до мінімального значення. Температура контролюваного об'єкта (КО) не впливає на процес проходження заряджених частинок через лист, і відповідно не впливає на точність вимірювання товщини стінки. Аналогічним методом вимірюють товщину стінки труби. Вимірювання можна проводити в гарячому та холодному стані труби.

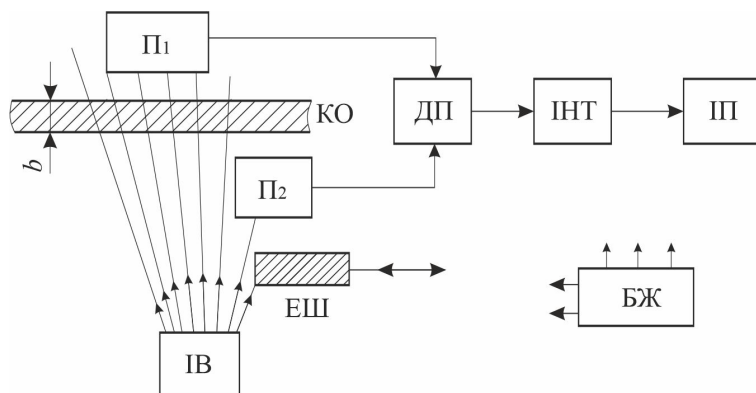


Рис. 4.24. Функціональна схема радіоізотопної товщинометрії листа

Принцип вимірювання товщини стінки гарячої труби в технологічному потоці полягає в тому, що гамма-випромінювання від радіоактивного джерела проникає крізь трубу і потрапляє в іонізаційну камеру, де фіксується зменшення енергії заряджених частинок, завдяки чому можна вирахувати масу і, відповідно, подвійну товщину стінки труби. Як джерело радіоактивного випромінювання найчастіше використовується ізотоп Цезію (Cs^{137}). Через подвійну товщину стінки труби обчислюється середня товщина стінки в кожному контрольованому перерізі. Процес товщинометрії здійснюється неперервно, тобто можна отримати інформацію про товщину

стілки труби за однією утворюючою, або за кількома утворюючими, якщо прилад багатоканальний. На сьогодні відомі радіоізотопні товщиноміри для гарячих труб в 1...13-ти канальному виконанні. Якщо труба під час вимірювання товщини стінки обертається (наприклад, у косовалковому стані), вимір товщини стінки труби після цього стану може здійснюватися з достатньою точністю на товщиномірі, який має меншу кількість каналів випромінювання, ніж на трубах, які через товщиномір проходять без обертання (стани поздовжнього плющення).

4.2.6. Ультразвукові методи неруйнівного контролю

Порівняно з іншими методами НК, ультразвукові методи дають змогу виявляти дефекти різноманітної форми та орієнтації незалежно від їхнього залягання, володіють високою продуктивністю, відносно низькою вартістю, можливістю контролю виробу в разі одностороннього доступу. Недоліками є труднощі контролю грубозернистих матеріалів (наприклад, аустенітних сталей), а також тонкостінних виробів з товщиною менше 4 мм. Ультразвукові методи НК широко використовуються для остаточної здачі (приймання) продукції, а також для вхідного і проміжного (міжопераційного) контролю.

Ультразвукові методи засновані на реєстрації параметрів пружних акустичних коливань (хвиль), що збуджуються і (або) виникають у контрольованому об'єкті.

Загальний принцип роботи ультразвукових дефектоскопів полягає в тому, що якщо в контрольованому виробі є дефекти і на них потрапляє промінь ультразвуку, то він змінює свій напрямок на дефекті. Індикатор, вловивши цю зміну, миттєво показує, що у виробі присутній дефект.

Акустичні коливання являють собою механічні коливання частинок пружного середовища і характеризуються частотою, інтенсивністю та видом. Процеси поширення цих коливань у середовищі називають акустичними хвилями. Види коливань здебільшого визначаються властивостями пружного середовища і способом їх створення. У рідинах і газах, що мають пружність об'єму, акустичні коливання поширюються з однаковою швидкістю в усіх напрямках. У тілах, що характеризуються, крім пружності об'єму, ще й пружністю форми (зсувною пружністю) і відмінністю деформацій

розтягнення-стиснення залежно від напрямку (для анізотропних тіл), закономірності поширення акустичних хвиль значно складніші.

Коливання з частотою до 16...20 Гц називають інфразвуковими. Коливання з частотою від 16...20 до $(15...20) \cdot 10^3$ Гц становлять діапазон чутності, що сприймається людським вухом. При збільшенні частоти коливань звуку понад 20 кГц він переходить в ультразвук. Під час неруйнівного контролю металевих матеріалів використовують частоти ультразвуків діапазону 0,5...25 МГц. Верхня межа зумовлена зниженням прозорості більшості матеріалів. Використання хвиль із частотами нижче 0,5 МГц у низці завдань (наприклад, контроль радіоелектронної апаратури) може призвести до руйнувань унаслідок резонансу компонентів досліджуваних виробів або до передчасного старіння.

Основними параметрами хвилі є довжина хвилі та період. Число циклів, здійснених за одну секунду, називається частотою і вимірюється в Герцах (Гц). Час, необхідний, щоб здійснити повний цикл, називається періодом і вимірюється в секундах. Взаємозв'язок між частотою і періодом хвилі наведено у формулі:

$$f = 1/T, \quad (4.12)$$

де f – частота, Гц; T – період, с.

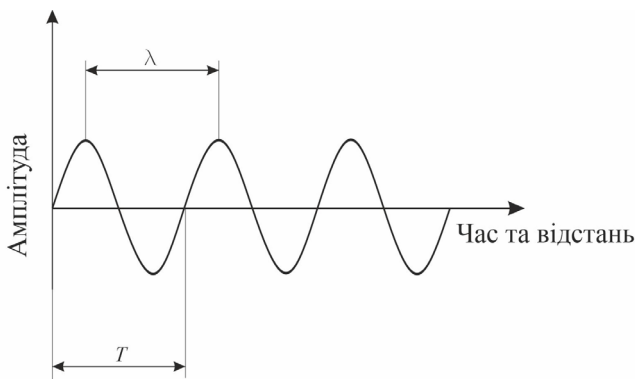


Рис. 4.25. Основні параметри ультразвукової хвилі

Поширення акустичної ультразвукової хвилі в матеріалі відбувається з певною постійною швидкістю, що визначається властивостями середовища. Поширення хвилі супроводжується утворенням у матеріалі зон, у яких частинки перебувають в однаковому коливальному стані (фазі). Мінімальну відстань між такими зонами називають довжиною хвилі (λ , м), яка пов'язана зі швидкістю поширення C , м/с (константа матеріалу) і частотою коливань f , Гц виразом:

$$\lambda = C/f, \quad (4.13)$$

де λ – довжина хвилі, м; C – швидкість звуку, м/с

У твердих речовинах для поздовжніх хвиль швидкість звуку:

$$C_l = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}, \quad (4.14)$$

де C_l – швидкість звуку для поздовжніх хвиль, м/с;

E – модуль пружності, Па;

μ – коефіцієнт Пуассона;

ρ – густина, кг/м³.

Для поперечних хвиль вона визначається за формулою

$$C_t = \frac{\sqrt{G}}{\rho}, \quad (4.15)$$

де C_t – швидкість звуку для поперечних хвиль, м/с;

G – модуль зсуву, Па.

Довжина хвилі визначає чутливість ультразвукового контролю: під час ультразвукової дефектоскопії (УЗД) можуть бути виявлені несуттєвості з розміром, що перевищує подвоєне значення довжини хвилі. При цьому необхідно враховувати, що зменшення довжини хвилі (збільшення частоти коливань) призводить до збільшення загасання ультразвукових хвиль. Змінити довжину ультразвукової хвилі в конкретному матеріалі можна тільки шляхом зміни частоти збуджуваних коливань.

Важливе значення в дефектоскопії має такий параметр ультразвукових коливань як амплітуда A , м – найбільше відхилення частинки, що коливається, від положення рівноваги. У твердому тілі амплітуда коливального руху частинок у середовищі пропорційна градієнту тиску

відносно середнього тиску в середовищі. Енергію, яку хвиля переносить через деяку поверхню за одиницю часу, називають густиною енергії.

Напрямок коливань частинки в твердих тілах може бути різним щодо напрямку поширення хвилі.

Основними параметрами середовища, що визначають поширення енергії ультразвукової хвилі, є акустичний опір, швидкість поширення звуку та коефіцієнт поглинання. Втрати на поглинання характеризують матеріал, крізь який проходить ультразвук, і, отже, несуть інформацію про фізичні властивості цього матеріалу. Відношення інтенсивностей прямої та відбитої хвиль залежить від фактора неузгодженості, що характеризує співвідношення опорів на межі розділу середовищ. Для межі середовищ типу «рідина-метал» значення фактора розбалансування дорівнює 20, для меж середовищ типу «газ-метал» – 10^5 . У першому випадку відбувається відбиття 80 % енергії падаючої хвилі, у другому – практично 100 %. Різкі зміни акустичного опору спричиняються різного роду розшаруваннями матеріалів, мікропористістю, а також тисками та напруженнями, що виникають у матеріалах.

За характером зміщення частинок і поширення коливань хвилі бувають декількох типів: поздовжні (зміщення частинок збігається з напрямком поширення коливань), поперечні (зміщення частинок відбувається в напрямі, перпендикулярному напрямку поширення коливань).

Ультразвуковий контроль (УЗК) заснований на реєстрації зміни параметрів пружних хвиль, що вводяться в контрольований об'єкт і поширюються в ньому. Ультразвуковий контроль поділяється на методи:

- відображення;
- проходження;
- комбіновані (використовують як відображення, так і проходження);
- власних частот та імпедансні (використовують залежність повного механічного опору (імпедансу) контрольованого виробу від якості з'єднання його окремих елементів між собою).

У методах відбиття аналізують відбиття імпульсів пружних хвиль від неоднорідностей або меж об'єкта контролю (ОК), у методах проходження – вплив параметрів ОК на характеристики хвиль, що пройшли через нього. Комбіновані методи використовують вплив параметрів ОК як на відбиття, так і на проходження пружних хвиль. У методах власних частот про властивості

ОК судять за параметрами власних або вимушених коливань (їхніх частот і величини втрат) усього ОК або його частини. В імпедансних методах інформативним параметром слугує механічний імпеданс ОК у зоні його контакту з перетворювачем. Пасивні методи НК класифікують за характером аналізованих сигналів. Усі ці методи ультразвукової дефектоскопії стандартизовані міжнародними і національними стандартами (див., наприклад [94 – 97]).

Методи відбиття використовують інформацію, що отримується за відбиттям акустичних хвиль у ОК. На рис. 4.26 наведено схеми різних методів відбиття.

Ехо-метод (рис. 4.26, а) заснований на реєстрації ехосигналів від дефектів - несучільностей. Він схожий на радіо- і гідроЛокацію. Інші методи відбиття застосовують для пошуку дефектів, які погано виявляються ехо-методом, і для дослідження параметрів дефектів. Найпоширенішим різновидом ехо-методу є ехо-імпульсний метод.

Ехо-імпульсний метод дає найбільшу інформацію про об'єкт контролю порівняно з іншими ультразвуковими методами, оскільки дає змогу не тільки виявити внутрішні (поверхневі) дефекти типу порушення суцільності, а й визначити глибину їхнього залягання в товщі матеріалу, орієнтацію і розміри. Метод може бути застосований для контролю виробів, виготовлених із будь-яких матеріалів, у яких можна викликати збудження пружних коливань й одержати відлуння-сигнал від дна виробу. Дефектоскопічний контроль на основі відлуння-імпульсного методу ґрунтується на використанні коротких ультразвукових імпульсів, що подають на поверхню контрольованого виробу, а потім відбивають від протилежної поверхні у вигляді відлуння. Відлуння сигнал може бути прийнятий тим же п'єзоелементом, який використовується для збудження імпульсу. Широко поширене застосування роздільних датчиків, у корпусі яких розташовано два п'єзоелементи - один для збудження, інший для приймання ультразвукових коливань, а час приймання луна-сигналу від задньої поверхні використовують для визначення товщини стінки труби або товщини листа.

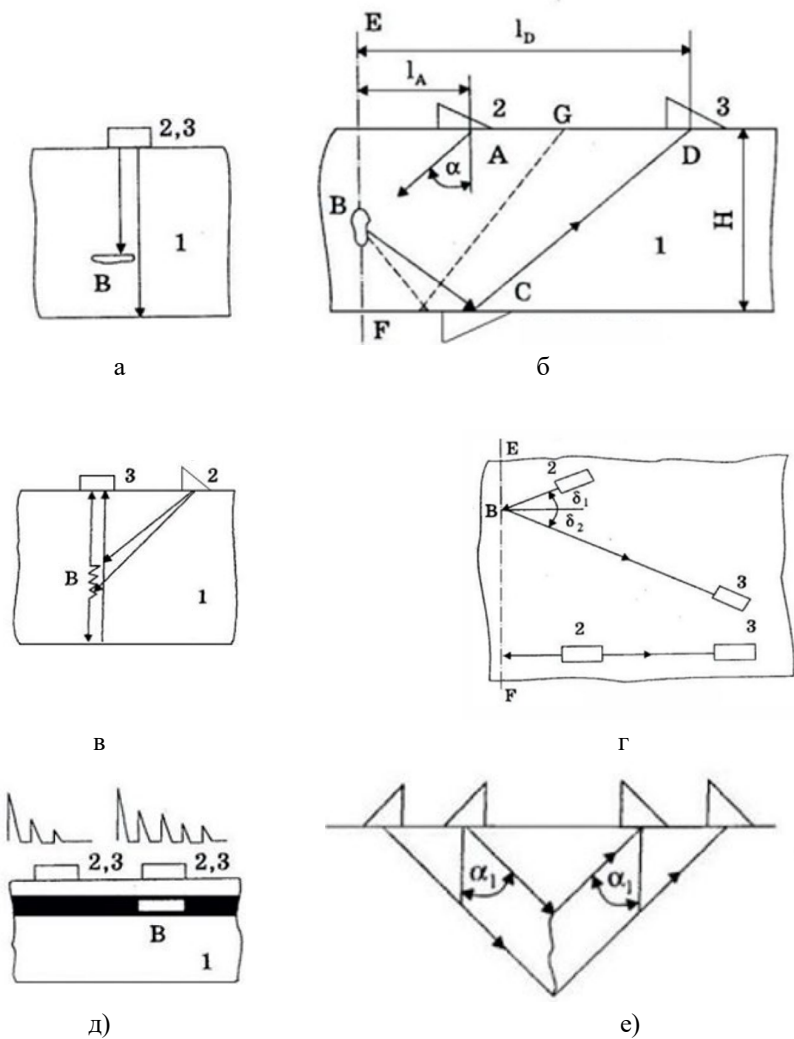


Рис. 4.26. Методи відбиття: а – ехо-метод; б – ехо-дзеркальний; в – дельта-метод; г – ревербераційний; д – дифракційно-часовий

Ехо-імпульсний метод реалізує принцип радіолокації пружних механічних коливань середовища. Пружні хвилі, як і світлові, під час

проходження через об'єкт контролю зазнають розсіювання, заломлення, поглинання і відбиття, тобто для пружних хвиль справедливі закони геометричної оптики. Ехо-метод є найуніверсальнішим і заснований на надсиланні у виріб коротких імпульсів ультразвукових коливань спеціальним випромінювачем (вібратором) і реєстрації індикатором інтенсивності та часу приходу ехо-сигналів, відбитих від дефектів. Випромінювач і індикатор можуть бути сумішені в одному датчику, що працює в імпульсному режимі, чергуючи свої функції, тобто працюючи спочатку як випромінювач, а потім як індикатор. Для контролю виробу датчик ехо-дефектів сканує його поверхню. Цей метод дає змогу виявляти дефекти, відбивна поверхня яких має площу близько 1 мм².

При ехо-імпульсному методі пружні коливання у виріб вводять за допомогою спеціальних перетворювачів. Основним елементом такого перетворювача, як правило, є п'єзопластина.

У деякий момент часу генератор радіоімпульсом збуджує механічні коливання п'єзопластини. Одночасно зі збудженням пружних коливань пластини запускається розгортка індикатора дефектоскопа. На екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ) виробляється зондувальний імпульс. Пружні коливання, поширюючись у матеріалі контрольованого об'єкта, досягають протилежного боку виробу і, відбившись від нього, повертаються до п'єзопластини, збуджуючи в ній механічні коливання. У результаті прямого п'єзоефекту на електродах п'єзопластини виникає змінна напруга, що надходить на підсилювач, а потім на вертикальні відхиляючі пластини ЕПТ. На індикаторі дефектоскопа з'являється імпульс *b*, званий донним (від дна виробу).

Таким чином, товщина об'єкта контролю «переводиться» в тимчасову діаграму на індикаторі ультразвукового дефектоскопа. Якщо в матеріалі виробу буде дефект типу порушення суцільності (тріщина, неметалева включення в металі, газова раковина тощо), то частина ультразвукової енергії відіб'ється від нього, і на екрані ЕПТ сформується відповідний імпульс. Цей імпульс може з'явитися тільки між зондувальним і донним імпульсами. Швидкість розгортки дефектоскопа прямо пропорційна шляху, пройденому пружними коливаннями в матеріалі. Якщо налаштувати дефектоскоп на швидкість поширення коливань у середовищі, то місце розташування

імпульсу на ЕПТ вкаже на глибину залягання дефекту, а за амплітудою імпульсу можна оцінити розмір виявленого дефекту. Уявімо, що відстань від поверхні виробу до дефекту буде зменшуватися. Тоді й ехо-сигнал від нього наблизатиметься до зондувального імпульсу, а за деякої мінімальної відстані «дефект - поверхня введення» ехо-сигнал від дефекту «накриється» зондувальним імпульсом. Ця мінімальна відстань, з якої ми отримуємо інформацію про наявність дефекту, називається «мертвою» зоною. Для ехо-імпульсного методу «мертва» зона є принципово непереборною величиною, а її значення завжди вказується в технічному описі приладу.

З протилежного боку виробу також існує «мертва» зона, яка породжується виникненням донного імпульсу, що діє подібно до зондувального.

Під час контролю ультразвуковим ехо-імпульсним методом фахівці стикаються з поняттями роздільної здатності за дальністю і за фронтом. Роздільна здатність за дальністю визначається мінімальною відстанню Δr між двома роздільно виявленими дефектами, розміщеними на одній вертикальній осі, що збігається з напрямком поширення пружних коливань. Роздільна здатність по фронту характеризується мінімальною відстанню між двома однаковими точковими дефектами, що залягають на одній глибині. На екрані дефектоскопа контролер повинен спостерігати два імпульси (роздільна здатність за дальністю), що перетинаються на рівні 0,5 від максимальної амплітуди. Якщо контролер встановив, що під час переходу від одного дефекту до іншого амплітуда відлуння-сигналу зменшилася на значення 0,5 від максимальної амплітуди (відлуння-сигнал від одного дефекту), то відстань між дефектами і є роздільною здатністю за фронтом. Часто оператор приймає зменшення амплітуди, пов'язане з роздільною здатністю по фронту, за випадкові відхилення амплітуди ехо-сигналу.

Під час розроблення методики контролю ультразвуковим ехо-імпульсним методом слід враховувати той факт, що дефекти можуть бути об'ємними, плоскими, лінійними і точковими.

Ехо-дзеркальний метод (рис. 4.26 б) ґрунтується на аналізі акустичних імпульсів, дзеркально відбитих від донної поверхні об'єкта контролю C і дефекту B , тобто тих, що пройшли шлях $ABCD$. Варіант цього методу, розрахований на виявлення вертикальних дефектів, називають

методом тандем. Для його реалізації під час переміщення перетворювачів 1 і 3 підтримують постійним значення $l_A + l_D = 2Htg\alpha$ (де H - товщина ОК). Тоді виявлятимуться дефекти в перерізі EF . Для отримання максимального (дзеркального) відбиття від неперпендикулярних дефектів значення $l_A + l_D$ варіюють. Інший варіант ехо-дзеркального методу передбачає переміщення перетворювачів 2 і 3 з різних боків ОК. Його іноді називають методом тандем-дуєт. При цьому зберігається принцип дзеркального відображення від вертикального дефекту та донної поверхні. Застосування методу тандем-дуєт доцільне у випадках, коли під час контролю методом тандем перетворювачі 2 і 3 надто зближуються і заважають один одному.

Ще один варіант ехо-дзеркального методу – з трансформацією типів хвиль на дефекті (T -тандем). Перетворювач 2 випромінює поперечну хвилю під кутом введення α більшим за 57° (для сталі). Кут падіння на вертикальний дефект $90^\circ - \alpha$ буде меншим за критичний, тож відбудеться часткова трансформація поперечної хвилі в поздовжню, спрямовану в бік дна ОК. Відбиту поперечну хвилю надалі не використовують, а відбита від дефекту поздовжня хвиля (показана штриховими лініями) далі відіб'ється від дна ОК і приймається іншим перетворювачем у точці G . Для реалізації цього варіанта ехо-дзеркального методу потрібна менша відстань від перетворювачів до осі зварного шва.

Дельта-метод (рис. 4.26 в) заснований на використанні дифракції хвиль на дефекті. Частина поперечної хвилі від випромінювача 2, що падає на дефект, розсіюється на всі боки на краях дефекту В, причому частково перетворюється на поздовжню хвилю. Частина цих хвиль приймається приймачем 3 поздовжніх хвиль, розташованим над дефектом, а частина відбивається від донної поверхні і також надходить на приймач. Варіанти цього методу передбачають можливість переміщення приймача 3 по поверхні, зміни типів випромінюваних і прийнятих хвиль.

Ревербераційний метод (рис. 4.26, г) ґрунтується на аналізі часу об'ємної реверберації, тобто процесу поступового загасання звуку в деякому об'ємі – контрольованому об'єкті. Під час контролю використовується один суміщений перетворювач 2, 3. Під час контролю двошарової конструкції в разі неякісного з'єднання шарів час реверберації в шарі 1, з яким контактує перетворювач, буде більшим, а в разі доброякісного з'єднання шарів –

меншим, тому що частина енергії переходитиме в інший шар. Цей метод набув широкого поширення під час контролю контактного зварювання.

Дифракційно-часовий метод (*ToFD – Time of Flight Diffraction*) (рис. 4.26 д) засновано на прийомі хвиль, розсіяних на кінцях дефекта, причому можуть випромінюватися і прийматися як поздовжні, так і поперечні хвилі. На рис. 4.26 д представлено випадок, коли випромінюються поперечні хвилі, а приймаються поздовжні. Практичного застосування, однак, набув варіант, за якого випромінюються і приймаються поздовжні хвилі, оскільки вони першими приходять на приймач і за цією ознакою їх легко відрізнити від трансформованих хвиль. Основними інформаційними характеристиками *ToFD* є:

- час приходу сигналу, знаючи який можна визначити реальний розмір несутцільності;
- фаза першої півхвилі сигналу від дифракції на краях несутцільності, завдяки якій можна встановити тип несутцільності.

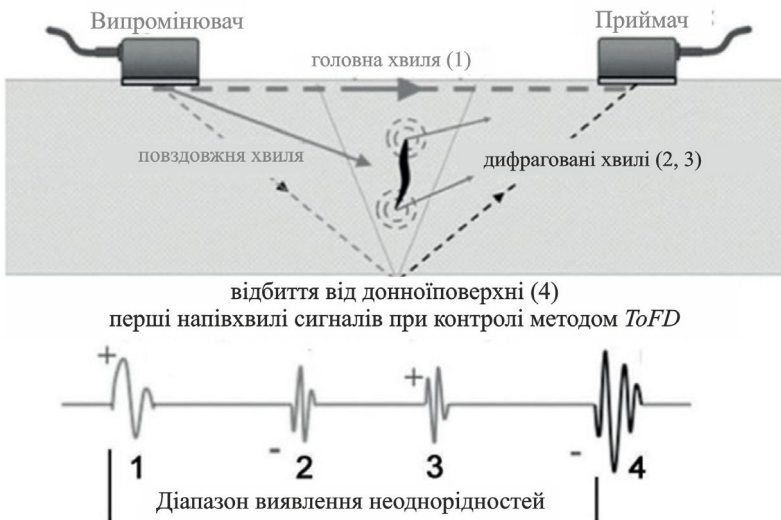


Рис. 4.27. Принцип дифракційно-часового методу УЗК (*ToFD*)

Під час методу *ToFD* зазвичай використовують два ПЕП, що працюють у роздільному режимі, водночас сканування здійснюють шляхом лінійного переміщення пари перетворювачів, розташованих на фіксованій відстані один від одного, уздовж ділянки контролю.

Найсуттєвіші переваги *ToFD* під час контролю зварних швів порівняно зі стандартним ехо-методом полягають у такому:

- можливість досягнення більш високої точності під час проведення вимірювань, як правило, ± 1 мм, а під час повторного обстеження $\pm 0,3$ мм;
- майже повна незалежність імовірності виявлення дефекту від його орієнтації;
- під час калібрування апаратури враховуються тільки тимчасові характеристики;
- висока продуктивність контролю, оскільки сканування проводять уздовж шляхом поздовжнього переміщення акустичного блоку вздовж шва;
- документування та зберігання результатів контролю;
- повна відтворюваність результатів контролю.

До недоліків *ToFD*-методу можна віднести:

- відсутність критеріїв для класифікації несучільностей за небезпекою (ступенем впливу на якість);
- підповерхневі несучільності, розташовані близько до поверхні контрольованого виробу, можуть бути приховані головною хвилею, у зв'язку з чим знижується ймовірність їх виявлення.

Когерентні методи віддзеркалення відрізняються від інших методів віддзеркалення тим, що як інформаційний параметр крім амплітуди і часу приходу імпульсів використовується також фаза сигналу. Завдяки цьому підвищується на порядок роздільна здатність методів відбиття і з'являється можливість спостерігати зображення дефектів, близькі до реальних. Найефективнішим когерентним методом є комп'ютерна акустична голографія.

Методи проходження, які частіше називають тіньовими, засновані на спостереженні зміни параметрів акустичного сигналу (наскрізного сигналу), який пройшов через об'єкт контролю.

Тіньовий метод ультразвукового контролю ґрунтується на збудженні пружних коливань у матеріалі виробу та реєстрації зміни амплітуди пружних

коливань, що пройшли через виріб, а також на реєстрації зміни амплітуди пружних коливань, що пройшли через виріб, і вимагає двостороннього доступу до контрольованого виробу. Суть методу полягає в тому, що перетворювач, під'єднаний до генератора ультразвукових коливань, розташовують з одного боку виробу, а перетворювач, який приймає коливання, що пройшли через виріб, – з протилежного боку.

Як уже було сказано, тіньовий метод вимагає розташування випромінювача й індикатора один проти одного з приміщенням випробуваного об'єкта (наприклад, листового матеріалу) між ними. За відсутності в тілі листа дефекту ультразвукові коливання проходять крізь нього і сприймаються датчиком індикатора. За наявності на шляху ультразвукового пучка дефекту значної величини змінюється напрямок поширення коливань, так що датчик індикатора потрапляє в область «звукової тіні» і не сприймає хвиль. Ультразвук може передаватися випробуваному виробу через тонкий шар мастила, зануренням деталі в рідину (іммерсійний спосіб) або шляхом безпосереднього контакту випромінювача з випробовуваним виробом. Таким методом виявляються дефекти діаметром до 1 мм у сталевих листах товщиною до 10 мм.

Використовуючи бездефектну ділянку виробу, налаштовують прилад так, щоб амплітуда на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ) сигналу, що пройшов через виріб, дорівнювала A_0 . Якщо у виробі трапляються внутрішні дефекти на кшталт порушення суцільності, то амплітуда A_0 зменшиться в результаті утворення за дефектом ультразвукової тіні.

Чутливість методу оцінюється за формулою

$$K = A_{\min} / A_0, \quad (4.16)$$

де $A_{\min}$ - мінімальна амплітуда, яку може зареєструвати прилад за даного налаштування.

Гранична чутливість методу пов'язана з дифракцією пружних хвиль на дефекті і порівнянна з довжиною хвилі генератора ультразвукових коливань.

Дзеркально-тіньовий метод ультразвукового контролю є різновидом тіньового методу і заснований на аналізі зміни амплітуди сигналу, відбитого від дна виробу. Метод має перевагу перед тіньовим – можливість використовувати односторонній доступ до виробу.

Тіньовий і дзеркально-тіньовий методи застосовують для контролю: прямих металевих одношарових безшовних одношарових труб, виготовлених із чорних і кольорових металів (виявляють порушення цілісності, розташовані на внутрішній і зовнішній поверхні); стикових, нахльосткових, кутових і таврових зварних швів (виявляють тріщини, непровари, неметалеві вclusions).

Для реалізації тіньового і дзеркально-тіньового методів застосовують дефектоскопи загального призначення.

Тіньові методи УЗ дефектоскопії мають такі різновиди:

- амплітудний метод проходження;
- часовий метод проходження;
- метод багаторазової тіні;
- акустична мікроскопія;
- ультразвукова томографія.

На початковому етапі розвитку використовували безперервне випромінювання, а ознакою дефекту було зменшення амплітуди наскрізного сигналу, спричинене звуковою тінню, що утворюється дефектом. Тому термін «тіньовий» адекватно відображав зміст методу. Однак надалі застосування розглянутих методів розширилося. Методи почали застосовувати для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів, коли контрольовані параметри (пружні постійні, коефіцієнт загасання, густина тощо) не пов'язані з порушеннями суцільності, що утворюють звукову тінь. При цьому в більшості випадків безперервне випромінювання було замінено імпульсним. Істотно розширено також число інформативних параметрів наскрізного сигналу, до яких, крім амплітуди, додалися фаза, час приходу і спектр. Таким чином, тіньовий метод може розглядатися як окремий випадок більш загального поняття «метод проходження». Під час контролю методами проходження випромінювальний і приймальний перетворювачі розташовують по різні боки ОК або контрольованої його ділянки. У деяких методах проходження перетворювачі розташовують з одного боку ОК на певній відстані один від одного. Інформацію отримують, вимірюючи параметри наскрізного сигналу, що пройшов від випромінювача до приймача.

Амплітудний метод проходження (або амплітудний тінювий метод) заснований на реєстрації зменшення амплітуди наскрізного сигналу під впливом дефекту, який утрудняє проходження сигналу і створює звукову тінь. Для контролю цим методом можна використовувати той самий імпульсний дефектоскоп, який вмикають за роздільною схемою, причому випромінювальний і приймальний перетворювачі розташовують з різних боків ОК. Іноді застосовують спеціалізовані простіші за схемою прилади.

Часовий метод проходження (часовий тінювий метод) заснований на вимірюванні запізнювання імпульсу, викликаного огинанням дефекту. Інформаційним параметром слугує час приходу наскрізного сигналу. Метод ефективний під час контролю матеріалів із великим розсіюванням УЗ, наприклад, бетону, вогнетривкої цегли тощо.

Метод багаторазової тіні аналогічний до амплітудного методу проходження (тінювого), але про наявність дефекту судять за амплітудою наскрізного сигналу (тінювого імпульсу), який багаторазово (зазвичай дворазово) пройшов між паралельними поверхнями виробу. Метод чутливіший за тінювий або дзеркально-тінювий, оскільки хвилі проходять через дефектну зону кілька разів, але менш завадостійкий.

Акустична мікроскопія відрізняється від ехо-методу підвищенням на один-два порядки частоти УЗ, використанням гострого фокусування і автоматичним або механізованим скануванням об'єктів невеликого розміру. У результаті вдається зафіксувати невеликі за розміром зміни акустичних властивостей в ОК. Метод дає змогу досягти роздільної здатності в соті частки міліметра. Можлива акустична мікроскопія з використанням проходження хвиль.

Термін «**ультразвукова томографія**» застосовують до різних систем візуалізації дефектів відлунням і тінювим методами. Тим часом цей термін спочатку застосовували до ультразвукових систем, у яких намагалися реалізувати підхід, що повторює рентгенівську томографію, тобто наскрізне прозвучування ОК за різними напрямками з виділенням особливостей ОК, отриманих за різних напрямків променів.

Активні комбіновані методи містять ознаки як методів відображення, так і методів проходження і бувають таких видів:

- дзеркально-тінювий;

- відлуння-тіньовий.

Дзеркально-тіньовий метод заснований на вимірюванні амплітуди донного сигналу. За технікою виконання (фіксується ехо-сигнал) це метод відбиття, а за фізичною сутністю (вимірюють ослаблення дефектом сигналу, що двічі пройшов ОК) він близький до тіньового методу, тому його відносять не до методів проходження, а до комбінованих методів. Цей метод часто застосовують спільно з ехо-методом. Спостерігають одночасно за появою ехо-сигналів і за можливим ослабленням донного сигналу дефектами, які не дають чітких ехо-сигналів і погано виявляються ехо-методом. Це може бути скупчення дуже дрібних дефектів або дефект, розташований так, що відбитий від нього сигнал іде вбік і не потрапляє на приймальний перетворювач.

Ехо-тіньовий метод заснований на аналізі як минулих, так і відбитих хвиль.

Існують також інші активні методи, що знаходять обмежене застосування для контролю металів. Це, наприклад, ехо-наскрізний метод, методи власних коливань, імпедансні методи та інші.

Нині на промислових підприємствах найбільшого поширення набули такі ультразвукові методи: відбитого випромінювання (ехо-імпульсний метод); минулого випромінювання (тіньовий, дзеркально-тіньовий); резонансний; акустико-емісійний.

Акустико-емісійний метод ґрунтується на реєстрації та аналізі пружних хвиль, що виникають у твердих тілах, які піддаються пластичній деформації або зламу.

В основі методу лежить факт виявлення дефектів, що випромінюють пружні хвилі, які поширюються на всі боки рівномірно. Досягаючи спеціальних ширококутових перетворювачів (їх має бути щонайменше три), прикріплених до контрольованого об'єкта, пружні хвилі (коливання) перетворюються на електричні сигнали, реєстрація яких дає змогу встановити зародження та розвиток тріщин у реальному масштабі часу та їхні координати.

Акустичну емісію характеризують загальним числом імпульсів за час спостереження за об'єктом контролю; інтенсивністю, що визначається як число імпульсів за секунду; максимальним значенням обвідного прийнятого

сигналу; амплітудним розподілом сигналів; піковою амплітудою сигналів тощо.

Перевага цього методу полягає в тому, що він задовго до можливого руйнування виробу сигналізує оператору контролю про втомні тріщини, що зароджуються, а за його допомогою виявляють і реєструють лише тріщини, що розвиваються, тобто виявляють найнебезпечніші дефекти. Тому акустико-емісійний метод класифікує дефекти не за розмірами, а за ступенем їхньої небезпеки під час виготовлення виробів та їхньої експлуатації.

Акустико-емісійний метод має досить високу чутливість до зростання дефектів, виявляє збільшення тріщин на 1...10 мкм, причому, вимірювання можна проводити в робочих умовах за наявності механічних і електричних шумів. Метод дає змогу отримувати інформацію без застосування сканування поверхні контрольованого об'єкта – кілька нерухомо закріплених на поверхні виробу перетворювачів реєструють зародження або розвиток тріщин у будь-якому місці виробу.

Неоднорідність матеріалів не є суттєвим обмеженням (як у разі застосування інших ультразвукових методів) при контролі якості виробів. Його можна застосовувати і для контролю якості розшарувань композиційних матеріалів.

Резонансний метод заснований на визначенні власних резонансних частот пружних коливань (частотою 1...10 МГц) під час збудження їх у виробі. Цим методом вимірюють товщину стінок металевих виробів із точністю до 1 %.

На основі використання ультразвукових методів створено ультразвукові товщиноміри, призначені для вимірювання товщини плоских виробів, труб, прутків тощо з металевих матеріалів за одностороннього доступу до об'єкта вимірювання. Товщиноміри застосовують для контролю товщини виробів, виготовлених із матеріалів, що мають швидкість поширення ультразвукових хвиль у діапазоні 4000...6500 м/с.

Ультразвукові методи НК застосовують для контролю якості металів, сплавів, металокераміки, композиційних матеріалів. Виявляють внутрішні, підповерхневі та поверхневі дефекти типу порушення суцільності; дають змогу контролювати великогабаритні вироби та заготовки (5 і більше метрів); використовують для контролю якості лиття, поковок, прутків, труб, деталей і

конструкцій машин у період виробництва й експлуатації; методи допускають автоматизацію контролю та можуть застосовуватися в потоковому виробництві; ультразвукові товщиноміри широко застосовують у виробництві для вимірювання товщини листів, прокату, труб і т.д.

Перспективним напрямком є використання методу фазової реєстрації – ультразвукової голографії. Контроль із використанням голограми дає змогу виявити, наприклад, в алюмінієвому блоці порожнини діаметром до 0,5 мм.

Особливе значення мають ультразвукові методи неруйнівного контролю для контролю якості шва та навколошовної зони зварних з'єднань, зокрема, зварних труб і трубопроводів.

Оцінювання якості за результатами ультразвукового контролю проводиться за такими критеріями:

- величина відбитого від несучільності сигналу;
- умовна протяжність несучільності;
- тип несучільності.

Попередньо чутливість дефектоскопа і зону контролю налаштовують з використанням стандартних зразків підприємства, геометричні розміри (кривизна, товщина), матеріал і якість підготовки поверхні яких відповідають ОК. У стандартному зразку підприємства виконано штучний відбивач, тип і розміри якого визначають вимогами нормативної документації на конкретний виріб. Амплітуда ехо-сигналу від штучного відбивача вивірюється за глибиною за допомогою тимчасового регулювання чутливості (ТРЧ) і приймається за бракувальний рівень (рис. 4.28). Якщо під час контролю реального об'єкта амплітуда ехо-сигналу від несучільності перевищить бракувальний рівень, то така несучільність вважається неприпустимою.

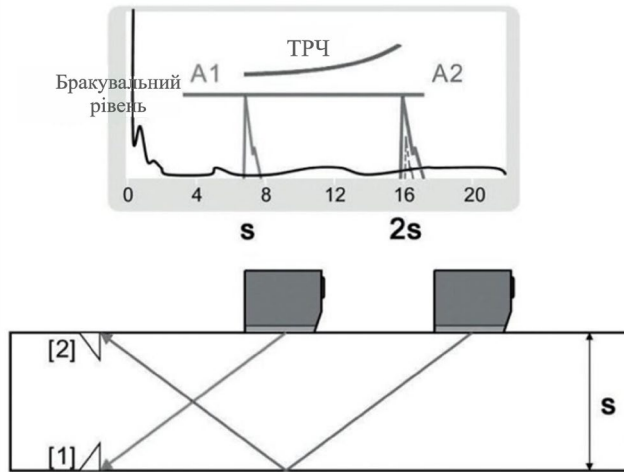


Рис. 4.28. Налаштування бракувального рівня чутливості дефектоскопа та зони контролю.

Пошук несучільностей здійснюється, як правило, на рівні фіксації, який на 6 дБ вищий за бракувальний (тобто чутливість на рівні фіксації вдвічі вища). Умовну протяжність дефектів уздовж шва вимірюють як відстань між крайніми положеннями перетворювача, переміщуваного уздовж шва й орієнтованого перпендикулярно до нього. При цьому крайніми положеннями перетворювача вважають ті, за яких амплітуда ехо-сигналу від несучільності зменшується до рівня фіксації. Максимально допустима умовна протяжність несучільності задається нормативною документацією на об'єкт контролю [98].

Тип несучільності визначають з огляду на її умовну протяжність, глибину залягання і форму ехо-сигналу (один пік або кілька). У більшості нормативних документів несучільності класифікують на такі типи:

- протяжні (у перерізі та в корені шва);
- нетривалі;
- скупчення і ланцюжки.

Тип несумісності визначає критерії допустимості за умовною протяжністю і сумарною умовною протяжністю на оцінювальній ділянці (як

правило, 300 мм).

Переміщення перетворювача здійснюють поверхнею навколошовної зони, зачищеної від бризок розплавленого металу, що має шорсткість не менше $Rz40$. Сканування проводять паралельно зварному шву з одночасним зворотно-поступальним рухом у напрямку, перпендикулярному до нього. У процесі переміщення перетворювача вісь ультразвукового променя повертають щодо лінії поперечного переміщення на $10 - 15^\circ$ (рис. 4.29). Переміщення ПЕП здійснюють у зоні, обмеженій з одного боку краєм валика посилення, з іншого – відстанню L_{max} :

$$L_{max} = 2s \cdot \operatorname{tg} \alpha - n + 3TB, \quad (4.17)$$

де s – товщина стінки об'єкта контролю, мм;

α – кут введення, град;

n – стріла перетворювача, мм;

$3TB$ – ширина зони термічного впливу, мм.

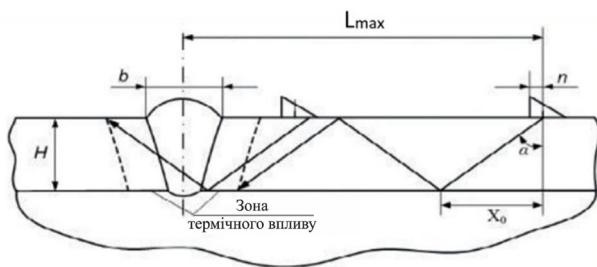


Рис. 4.29. Сканування зварного з'єднання

Під час сканування важливо стежити за наявністю акустичного контакту. У разі появи ехо-сигналу на рівні фіксації необхідно визначити її умовну протяжність і максимальну глибину залягання. Оцінку за амплітудним критерієм (величина відбитого сигналу відносно бракувального рівня) необхідно проводити, встановивши перетворювач у положення, за якого досягається максимум ехо-сигналу. Оскільки орієнтація несучильності може вплинути на величину відбитого сигналу і на її умовну протяжність, контроль необхідно проводити з двох боків шва.

Одним із варіантів ехо-методу, застосовуваним для контролю сталевих

і поліетиленових труб малої товщини та діаметра, є контроль роздільно-суміщеними похилими перетворювачами «хордового» типу з еластичним протектором (рис. 4.30).

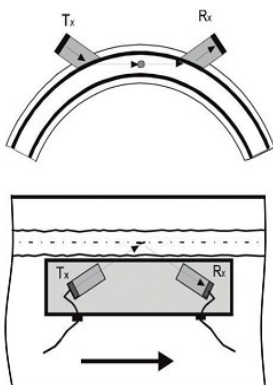


Рис. 4.30. Ультразвуковий контроль перетворювачами «хордового» типу

Схема контролю, наведена на рис. 4.30, дає змогу проводити контроль, переміщаючи перетворювач тільки вздовж шва. Оцінювання несущільностей проводиться за амплітудним критерієм і умовною протяжністю, глибина залягання несущільності не визначається. Несущільності виявляються з однаковою чутливістю незалежно від глибини залягання. Еластичний протектор забезпечує поглинання поверхневої хвилі та щільне прилягання перетворювача до поверхні труби.

Широке застосування в промисловості знаходять дефектоскопи, що реалізують принцип фазованих решіток (ФР) [96]. Сутність методу ФР полягає в тому, що фронт хвилі, яку випромінює перетворювач, формується завдяки узгодженому поданню електричних сигналів на кожний п'єзоелектричний елемент, що входить до антенних решіток (рис. 4.31).

Застосування дефектоскопів із ФР дає змогу випромінювати в об'єкт контролю промінь, що хитається в площині падіння ультразвукової хвилі, і фокусувати його.

У результаті контролю дефектоскопами з фазованими решітками електронним скануванням формується растрова секторна розгортка області

сканування (зображення S -типу), на якій амплітуда ехо-сигналу від відбивача кодується кольором.

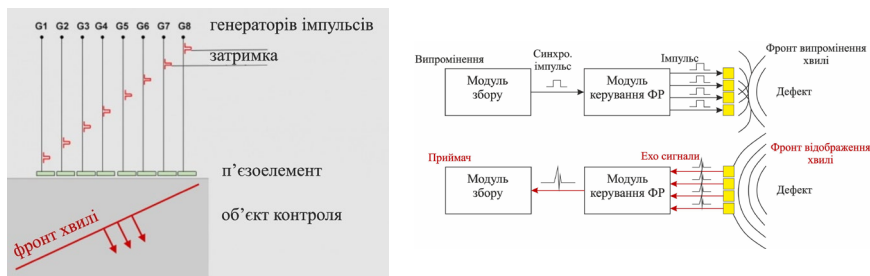


Рис. 4.31. Принцип формування фронту хвилі схема дефектоскопа на фазованих решітках при використанні ФР

Застосування ФР у процесі ультразвукового контролю якості зварних з'єднань дає змогу скоротити час сканування завдяки заміні серії П-подібних переміщень перетворювача під час сканування, однією операцією, а також дає змогу візуалізувати несучільності в перерізі зварного шва і навколошовної зони.

Найбільшого поширення як випромінювачі ультразвуку набули електроакустичні перетворювачі. У переважній більшості випромінювачів ультразвуку цього типу, а саме в п'єзоелектричних, магнітострикційних перетворювачах, електродинамічних, електромагнітних та електростатичних випромінювачах, електрична енергія перетворюється на енергію коливань будь-якого твердого тіла (випромінювальної пластинки, стрижня, діафрагми тощо), що й випромінює в навколишнє середовище акустичні хвилі.

В ультразвукових методах контролю якості найбільшого поширення набуло використання **п'єзоелектричного ефекту** (від грец. *πίεζω* (*piézō*) – тисну, стискаю) – ефект виникнення поляризації діелектрика під дією механічних напружень (прямий п'єзоелектричний ефект). Існує і зворотний п'єзоелектричний ефект – виникнення механічних деформацій під дією електричного поля. Як п'єзодіелектрики можуть використовуватися натуральні та штучні кристали, полімери (скловолокно), п'єзокераміка, напівпровідники [98].

Крім розглянутих типів ультразвукових дефектоскопів, існує низка ультразвукових дефектоскопів і різного роду вимірювачів геометричних параметрів контрольованих об'єктів, дія яких заснована на лазерному збудженні ультразвукових коливань.

Метод лазерної генерації ультразвуку ґрунтується на використанні імпульсних лазерів із тривалістю імпульсу від десятків наносекунд до фемтосекунд ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) з досить високою піковою потужністю. Лазерне випромінювання поглинається в приповерхневому шарі спеціального середовища, званого оптоакустичним генератором, або матеріалі досліджуваного середовища. За рахунок поглинання електромагнітної енергії відбувається короткочасне локальне нагрівання речовини, її подальше розширення і релаксація цього збудження, що і призводить до генерації ультразвукових хвиль (оптоакустичний ефект). При перевищенні деякого порога потужності лазерного імпульсу відбувається абляція матеріалу генеруючого середовища. Спектральний склад лазерного ультразвукового імпульсу визначається тривалістю лазерного імпульсу, розміром і формою плями фокусування лазерного випромінювання, а також властивостями генерувального середовища.

Методи лазерної ультразвукової дефектоскопії можна розділити на кілька видів. За наявності контакту між системою діагностики і досліджуваним зразком – на контактну і безконтактну. За методом приймання ультразвукових хвиль – на діагностику за допомогою одиничного приймального елемента й антени приймальних елементів.

Контактна лазерна дефектоскопія. Прилад для контактної лазерної ультразвукової діагностики має кілька конструктивних складових (рис. 4.32): імпульсний лазер; лазерний ультразвуковий перетворювач, що містить у собі оптоакустичний генератор, приймальний елемент і підсилювач; система збирання та оброблення даних. Під час використання таких систем оператор має притискати перетворювач до обстежуваного об'єкта, попередньо забезпечивши імерсійний контакт.

Для прикладних застосувань найчастіше використовують наносекундні лазери, випромінювання від яких через оптичне волокно підводиться до генератора. За рахунок оптоакустичного ефекту відбувається збудження ультразвуку, який потім поширюється через матеріал зразка.

Можливе використання зазначеного типу систем під час роботи «на просвіт» і «на відбиття».

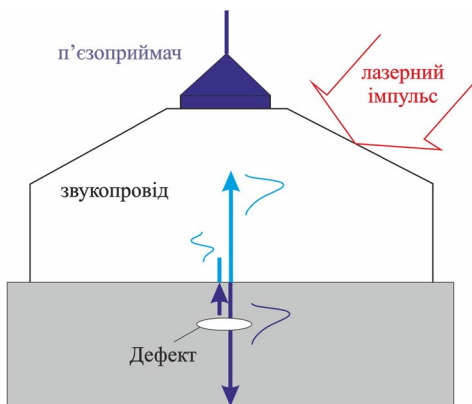


Рис. 4.32. Контактна лазерно-оптична система НК

Основними перевагами контактного лазерного ультразвуку перед іншими методами генерації є те, що звуковий сигнал є коротким, ширококутовим і аперіодичним, що не має бічних пелюсток. Це забезпечує високу поздовжню роздільну здатність, високу чутливість вимірювань. З огляду на те, що генерація і приймання в методі лазерного ультразвуку розділені, під час використання цього методу немає проблеми «мертвої зони», характерної для ультразвуку, генерованого і реєстрованого п'єзоелектричними перетворювачами.

Безконтактний лазерний ультразвуковий контроль. Ультразвукові хвилі можна детектувати за допомогою низки оптичних методів. Більшість із них використовує лазери з безперервним випромінюванням, або з досить великою тривалістю імпульсів. Усі оптичні методи тією чи іншою мірою засновані на інтерферометрії.

Принципова схема безконтактної лазерної ультразвукової діагностики (рис. 4.33) полягає в наступному. В одну точку на поверхні об'єкта фокусують два лазери – імпульсний і безперервний. Імпульсне лазерне випромінювання за рахунок оптико-акустичного ефекту спричиняє генерацію ультразвукових хвиль у ділянці біля поверхні, які надалі поширюються в

товщу об'єкта. Безперервний лазер працює в режимі інтерферометра – вимірюється різниця фаз між електромагнітними опорною хвилею і хвилею, відбитою від поверхні об'єкта. Зміна різниці фаз зумовлена локальним коливанням поверхні об'єкта, викликаним проходженням ультразвукових хвиль. Таким чином, основна перевага безконтактного методу полягає в можливості його застосування для діагностики в агресивних середовищах, за високих температур тощо. Однак роздільна здатність, що забезпечується, і співвідношення сигнал/шум нижчі, ніж у разі використання контактного методу.

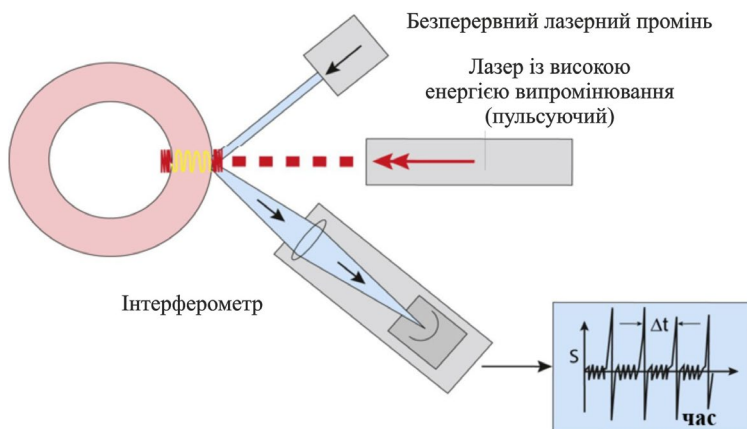


Рис. 4.33. Лазерно-ультразвуковий принцип вимірювання

Останнім часом контактний лазерний ультразвук знайшов найбільше застосування в задачах неруйнівного контролю та дослідження структури матеріалів і технологічних виробів. Усі застосування будуються на аналізі інформації про час приходу зареєстрованого імпульсу, амплітуди імпульсу, його тривалість, а також на основі аналізу спектрів. Далі наведені завдання, що вирішуються з використанням лазерного ультразвуку, які одночасно зустрічають труднощі при застосуванні інших методів.

Ультразвук із лазерним джерелом збудження має низку переваг порівняно з ультразвуком, в основі якого лежить п'єзоефект. До таких показників належать: аперіодична форма сигналу, висока поздовжня

роздільна здатність, відсутність так званої «мертвої зони», що дає змогу суттєво розширити можливості лазерно-ультразвукової дефектоскопії.

Зокрема, аперіодична форма сигналу дає змогу:

- знаходити дрібні дефекти;
- визначати товщини з високою точністю, у тому числі при високих температурах;
- виконувати прецизійне вимірювання швидкості ультразвукових хвиль;
- виконувати прецизійне вимірювання пружних модулів твердих тіл;
- визначати розподіл залишкових напружень у матеріалах;
- визначати зернистість металів.

Висока поздовжня роздільна здатність дає змогу:

- виявляти мікротріщини;
- проводити діагностику шаруватих матеріалів (наприклад, композитних), вимірювати пористість і пошкодження структури;
- визначати якість адгезії.

Відсутність «мертвої зони» дає можливість:

- тестування товщини покриттів;
- діагностики порушень покриттів і верхніх шарів багат шарових виробів;
- діагностики клейових з'єднань між покриттям і підкладкою (наприклад, під час нанесення полімерних ізоляційних покриттів на труби для трубопроводів).

Безконтактний лазерний ультразвук у теперішній час знайшов досить широке застосування. З його допомогою, наприклад, здійснюється контроль товщини металу під час гарячого прокату, контроль профілю безшовних сталевих труб у процесі гарячої прокатки, контроль розмірів виробів складної форми тощо.

Лазерно-ультразвукова система для вимірювання в режимі реального часу товщини стінки гарячекатаних труб, оболонок і гільз складається з лазерного блока для генерації ультразвукових хвиль безконтактним методом, детектувального лазера, під'єданого до системи визначення відбитої ультразвукової хвилі, оптичного пірометра для безконтактного визначення

температури, оптичного одноосового визначника швидкості для визначення місця, де здійснювали вимір, цифрового блока збирання й оброблення інформації.

У лазерних системах вимірювання контрольованих геометричних параметрів металопродукції (наприклад, діаметр і овальність безшовних труб, геометричних параметрів зварних з'єднань) зазвичай використовується метод триангуляції (здатність лазерного променя розповсюджуватися в добре колімованій формі, тобто з малою розбіжністю на великі відстані). Лазерний промінь висвітлює точку, відстань до якої від лазерного пристрою необхідно виміряти, розсіяне або дзеркальне відображення від цієї точки контролюються детектором, який встановлюють на деякій відстані від лазерного променя, такої, щоб джерело лазерного випромінювання, об'єкт і детектор утворили трикутник. На детекторі лінза фокусує відбите світло на ПЗС-матриці, і положення яскравої плями на чипі показує напрямок вхідного світла, тобто кут між лазерним променем і поверненим світлом, звідки відстань і може бути розрахована. від «прилад із зарядовим зв'язком»), або *CCD-матриця* (скор. від англ. «*charge-coupled device*») - спеціалізована аналогова інтегральна мікросхема, що складається зі світлочутливих фотодіодів, виконана на основі кремнію, використовує технологію ПЗС - приладів із зарядовим зв'язком.

Висока швидкість виявлення дає змогу відстежувати положення рухомої або віброуючої частини, наприклад, будь-якої машини. Отримана точність може, як правило, досягати однієї тисячної частки відстані. Для розсіяного відбиття відстань може бути обмежена вимогою отримати певну відбиту оптичну потужність; у разі дзеркального відбиття можна виміряти набагато більші відстані, але потрібне будь-яке кутове вирівнювання в напрямку вимірювання.

Принцип триангуляції також може бути реалізовано за допомогою лазерного променя, у напрямку якого здійснюється швидке сканування у двох вимірах. Таким чином, можна отримати тривимірні (*3D*) зображення.

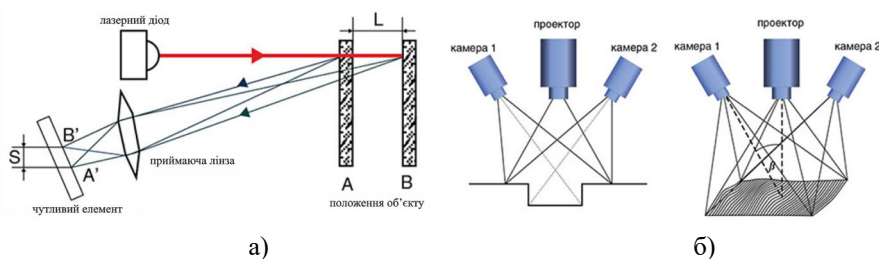
Вимоги до лазерного джерела. В ідеалі, лазерне джерело для триангуляції повинно мати високу якість пучка, щоб висвітлити невелику пляму на великій відстані. Так само потрібна певна оптична потужність, особливо для цілей з розсіяним відбиттям.

Такий сканер випускає лазерний промінь і, заміряючи час, за який промінь повернеться на приймач, розраховує відстань до точки. Знаючи вертикальний і горизонтальний кути повороту сканера і відстань до точки, програмне забезпечення визначає положення кожної точки в системі координат. За одну секунду такий сканер може зібрати до мільйона точок.

Лазерна тріангуляція і технологія структурованого підсвічування - це два схожих за своєю ідеєю принципи оцифрування об'єктів із габаритом від кількох міліметрів до десяти метрів із високою якістю і дуже високою точністю [98].

3D-сканери, що використовують принцип лазерної тріангуляції, працюють за схемою, зображеною на рис.4.34,а. Цей принцип роботи заснований на розрахунку відстані від випромінювача лазера до точки через співвідношення трикутників з використанням відомих параметрів системи.

3D-сканери, що використовують принцип структурованого підсвічування, працюють за схемою, зображеною на рис.4.34,б. Цей принцип роботи схожий на принцип роботи людських очей. Лінії світла згинаються на об'єкті, а дві камери дивляться на лінії під двома відомими кутами. Знаючи параметри системи, програмне забезпечення розраховує положення точок.



Для вимірювання геометрії безшовних гарячих труб у потоці виробництва найчастіше використовують комбіновані вимірювальні системи, що складаються з блоку радіоізотопної товщинометрії (4...14-ти канальний) і блоку лазерного вимірювання зовнішнього діаметру й овальності (як правило, 12 або 24-х канальний).

Пристрій безконтактного вимірювання геометричних параметрів зварного з'єднання призначений для отримання цифрової моделі профілю зварного з'єднання в режимі реального часу і подальшого вимірювання параметрів шва. Використовується, зокрема, для контролю параметрів шва під час виробництва зварних труб для магістральних трубопроводів.

Лазерний триангуляційний 2D модуль із вбудованою мікропроцесорною системою керування дає змогу з високою точністю вимірювати профіль об'єкта без механічного контакту з ним. У лазерному модулі використовується принцип триангуляції. Розгорнутий в ідеальну пряму лінію лазерний промінь проектується на поверхню контрольованого об'єкта. Світлова лінія повторює форму профілю об'єкта в перерізі. Зображення світлової лінії проектується на фотоматрицю. За координатами зображення на фотоприймачі мікропроцесор обчислює реальні координати світлової лінії (профіль). У процесі вимірювань проводиться динамічний контроль потужності відбитого світла і придушення фонових засвічень. Для отримання тривимірної форми поверхні об'єкта використовується переміщення лазерного модуля за допомогою скануючого пристрою. Для синхронізації вимірювань профілю використовуються сигнали датчика переміщення.

Контрольовані параметри: ширина і висота валика посилення, міжваликові западання, зовнішнє зміщення крайок, лускатість, розміри поверхневих дефектів (пори, тріщини, подрізи). Похибка вимірювання (лінійність), не більше $\pm 0,1$ мм.

4.2.7. Електромагнітні методи неруйнівного контролю

Серед електромагнітних методів неруйнівного контролю найбільш поширеним і перспективним є метод вихрових струмів [99].

Струмовихрева дефектоскопія заснована на збудженні в металевих контрольованих виробах вихрових струмів змінним магнітним полем датчика дефектоскопа. Вихрові струми створюють своє поле, протилежне за знаком збудливому. У результаті взаємодії цих полів змінюється повний опір котушки датчика, що і відзначає індикатор. Показання індикатора окрім електропровідності та магнітної проникності металу, розмірів виробу залежать також від змін електропровідності через структурні неоднорідності

або порушення суцільності металу, що саме й використовується під час побудови струмошвидкісних (електроіндуктивних) дефектоскопів. Датчики струмовихревих дефектоскопів виготовляють у вигляді котушок індуктивності, усередині яких поміщають виріб (прохідні датчики) або які накладають на виріб (накладні датчики).

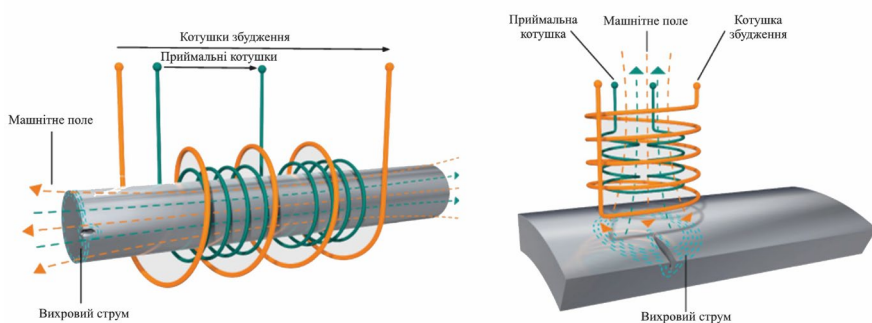


Рис. 4.35. Схема струмовихревої дефектоскопії

Головною перевагою електромагнітного методу неруйнівного контролю є його велика універсальність. Електромагнітні індуктивні дефектоскопи дають змогу виявляти поверхневі тріщини завглибшки в кілька мікрон за протяжності їх у кілька десятих часток міліметра, оцінювати внутрішню напругу в металевому виробі, оцінювати забрудненість високоелектропровідних металів (міді, алюмінію), контролювати якість термічного оброблення, визначати глибину шарів хіміко-термічного оброблення з точністю до 3%, сортувати деякі матеріали за марками, вимірювати електропровідність неферомагнітних матеріалів із точністю до 1%.

На цьому ж принципі засновані й прилади – товщиноміри, що використовують інформацію вихрових струмів про електрофізичні властивості покриттів і тієї основи, на яку вони нанесені. За допомогою таких товщиномірів можна вимірювати ізоляційні, металеві та неметалеві покриття на магнітних і немагнітних металах, а також неелектропровідні покриття на металах (кераміка, теплоізоляція тощо).

Нині розроблено і використовують велику кількість приладів, заснованих на застосуванні методу вихрових струмів і призначених для контролю розмірів, дефектів і електромагнітних властивостей різних промислових виробів.

Вихрострумові методи засновані на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, які наведені збудливою котушкою в електропровідному об'єкті контролю. Щільність вихрових струмів в об'єкті залежить від геометричних і електромагнітних параметрів об'єкта, а також від взаємного розташування вимірювального та вихрового струмового перетворювача (ВСП) і об'єкта. Як перетворювач використовують зазвичай індуктивні котушки (одну або кілька). Синусоїдальний (або імпульсний) струм, що діє в котушках ВСП, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідному об'єкті. Електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушки перетворювача, наводячи в них ЕРС або змінюючи їхній повний електричний опір. Реєструючи напругу на затискачах котушки або її опір, отримують інформацію про властивості об'єкта і про положення перетворювача щодо нього.

ЕРС (або опір) перетворювача залежить від багатьох параметрів об'єкта контролю, тобто інформація, що подається сигналом перетворювача, є багатопараметровою. Це визначає як перевагу, так і труднощі реалізації вихрострумових методів (ВСМ). З одного боку, ВСМ дають змогу здійснити багатопараметричний контроль; з іншого, потрібні спеціальні прийоми для розділення інформації про окремі параметри об'єкта. Під час контролю одного з параметрів вплив інших на сигнал перетворювача стає таким, що заважає, тому цей вплив необхідно пригнічувати. Особливість вихрострумового контролю в тому, що його можна проводити без контакту перетворювача й об'єкта. Їхня взаємодія відбувається зазвичай на відстанях, достатніх для вільного руху перетворювача щодо об'єкта (від часток міліметра до кількох міліметрів). Тому цими методами можна отримувати хороші результати контролю навіть за високих швидкостей руху об'єктів. На сигнали перетворювача практично не впливають вологість, тиск і забрудненість газового середовища, радіоактивні випромінювання, забруднення поверхні об'єкта контролю непровідними речовинами.

Отримання первинної інформації у вигляді електричних сигналів, безконтактність і висока продуктивність визначають широкі можливості автоматизації вихрострумowego контролю. Простота конструкції перетворювача – ще одна перевага ВСМ. У більшості випадків котушки поміщають у запобіжний корпус і заливають компаундами. Завдяки цьому вони стійкі до механічних і атмосферних впливів, можуть працювати в агресивних середовищах, у широкому інтервалі температур і тисків.

ВСМ засновані на збудженні вихрових струмів, а тому застосовуються переважно для контролю якості електропровідних об'єктів: металів, сплавів, графіту, напівпровідників. Їм властива мала глибина зони контролю, що визначається глибиною проникнення електромагнітного поля в контрольоване середовище.

Незважаючи на зазначені обмеження, ВСМ широко застосовують для дефектоскопії, визначення розмірів і структуроскопії матеріалів і виробів.

У дефектоскопії за допомогою ВСМ виявляють дефекти типу несучільностей, що виходять на поверхню або залягають на невеликій глибині (в електропровідних смугах, прутках, трубах, дроті, залізничних рейках, дрібних деталях тощо), наприклад, різноманітні тріщини, розшарування, заковування, раковини, неметалеві включення і т. д. За сприятливих умов і малого впливу чинників, що заважають, вдається виявити тріщини глибиною 0,1...0,2 мм, протяжністю 1...2 мм (за умови використання накладного перетворювача) або протяжністю близько 1 мм і глибиною 1...5% від діаметра контрольованого дроту або прутка (за умови використання перетворювача прохідного).

ВТМ дають змогу успішно вирішувати завдання контролю розмірів виробів. Цими методами вимірюють діаметр дроту, прутків і труб, товщину металевих листів і стінок труб у разі одностороннього доступу до об'єкта, товщину електропровідних (наприклад, гальванічних) і діелектричних (наприклад, лакофарбових) покриттів на електропровідних основах, товщину шарів багат шарових структур, що містять електропровідні шари. Вимірювані товщини можуть змінюватися в межах від мікрометрів до десятків міліметрів. Для більшості приладів похибка вимірювання 2 ... 5 %. Мінімальна площа зони контролю може бути доведена до 1 мм², що дає змогу вимірювати товщину покриття на малих об'єктах складної

конфігурації. За допомогою ВТМ вимірюють зазори, переміщення та вібрації в машинах і механізмах.

Структурний стан металів і сплавів впливає на їхні електричні та магнітні характеристики. Завдяки цьому виявляється можливим контролювати не тільки однорідність хімічного складу, а й структуру металів і сплавів, а також визначати механічні напружки. Широко застосовують вихрострумові вимірювачі питомої електричної провідності та інші прилади для сортування металевих матеріалів і графітів за марками (за хімічним складом). За допомогою вихрострумових приладів контролюють якість термічної та хіміко-термічної обробки деталей, стан поверхневих шарів після механічної обробки (шліфування, нагартування), виявляють залишкові механічні напруження, виявляють втомні тріщини в металах на ранніх стадіях їхнього розвитку, виявляють наявність α -фази тощо.

За робочим положенням щодо об'єкта контролю ВСП-перетворювачі ділять на прохідні, накладні та комбіновані.

Накладні ВСП зазвичай являють собою одну або кілька котушок, до торців яких підводиться поверхня об'єкта. Котушки таких перетворювачів можуть бути круглими коаксіальними, прямокутними, прямокутними хрестоподібними, із взаємно перпендикулярними осями тощо.

Накладні перетворювачі виконують із феромагнітними осердями і без них. Завдяки феромагнітному сердечнику (зазвичай феритовому) підвищується абсолютна чутливість перетворювача і зменшується зона контролю за рахунок локалізації магнітного потоку. Прокідні ВСП ділять на зовнішні, внутрішні, окружні. Відмітна здатність прохідних ВСП полягає в тому, що в процесі контролю вони проходять або зовні об'єкта, охоплюючи його (зовнішні), або всередині об'єкта (внутрішні), або занурюються в рідкий об'єкт (заглибні). Зазвичай прохідні ВСП мають однорідне магнітне поле в зоні контролю, внаслідок чого радіальні рухи однорідного об'єкта контролю не впливають на прохідний сигнал перетворювача. Для цього довжина збуджуваної обмотки має щонайменше в 3...4 рази перевищувати її діаметр, а довжина вимірювальної обмотки, розміщеної в середині обмотки збуджувальної, має бути значно меншою за довжину останньої. Однорідне поле отримують також, застосовуючи збуджувальну обмотку, виконану у вигляді кілець Гельмгольца, а вимірювальну – у вигляді короткої котушки.

Комбіновані перетворювачі являють собою комбінацію накладних і прохідних ВСП. До них належать також ВСП у вигляді лінійно-протягнутих витків або рамок, які можна умовно назвати лінійними.

Особливий різновид являють собою екранні ВСП, що відрізняються тим, що їхні збуджувальні та вимірювальні обмотки розділені контрольованим об'єктом. Розрізняють накладні екранні та прохідні екранні ВСП - відповідно перетворювачі першого і другого типів.

За видом перетворення параметрів об'єкта у вихідний сигнал ВСП поділяють на трансформаторні та параметричні. У трансформаторних, що мають щонайменше дві обмотки (збуджувальну та вимірювальну), параметри об'єкта контролю перетворюються на напругу вимірювальної обмотки, а в параметричних, які мають, як правило, одну обмотку, – на комплексний опір. Перевага параметричних ВСП полягає в їхній простоті, а недолік, який у трансформаторних ВСП виражений значно слабше, – залежно вихідного сигналу від температури перетворювача.

За способом з'єднання обмоток розрізняють абсолютні та диференціальні ВСП.

Вихідний сигнал абсолютного ВСП визначається абсолютним значенням параметрів об'єкта, а диференціального - приростами цих параметрів. Вихідний сигнал диференціального ВСП залежить від абсолютних значень параметрів об'єкта, але за малих приростів цих параметрів можна вважати, що він визначається тільки приростами. Накладними ВСП контролюють здебільшого об'єкти з плоскими поверхнями та об'єкти складної форми. Ці перетворювачі застосовують також, коли потрібно забезпечити локальність і високу чутливість контролю. Зовнішніми прохідними ВСП контролюють лінійно-протягнуті об'єкти (дріт, прутки, труби тощо); застосовують їх і під час масового контролю дрібних виробів. Внутрішніми прохідними ВСП контролюють внутрішні поверхні труб, а також стінки отворів у різних деталях. Прохідні ВСП дають інтегральну оцінку контрольованих параметрів по периметру об'єкта, тому вони мають меншу чутливість до локальних варіацій його властивостей.

Занурювальні ВСП застосовують для контролю рідких середовищ, екранні накладні – для контролю листів, фольги, тонких плівок, а екранні прохідні – для контролю труб.

Контроль методом магнітних полів розсіювання. У цьому випадку безпосередньо магнітний потік розсіювання виникає на розкритих поверхневих дефектах. Що більша частота струму яра, то ближче до поверхні протікає намагнічувальний струм (скін-ефект). У місцях дефекту магнітний потік виходить на поверхню виробу. Це явище називається магнітним потоком розсіювання і відображається у вигляді сигналу на панелі управління. Розрізняють два способи контролю: магнітним потоком розсіювання змінного поля і магнітним потоком розсіювання постійного поля (рис. 4.36) [99].

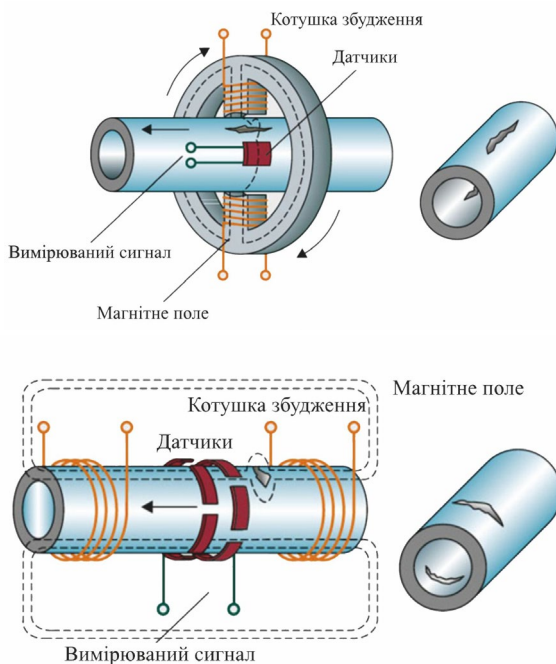


Рис. 4.36. Схема контролю магнітним потоком полів розсіювання

Під час контролю магнітним потоком розсіювання постійного поля (англ. *Constant field* або скорочено *DC*) виріб намагнічується по всьому

поперечному перерізу. У такий спосіб можна виявити дефекти на зовнішній і внутрішній поверхні труби. Імовірність виявлення внутрішніх дефектів знижується зі збільшенням товщини стінки труби.

Під час контролю магнітним потоком розсіювання змінного поля (англ. *Alternating field* або *AC*) два магнітні ярма, що обертаються, через які проходить змінний струм, безконтактним способом намагнічують контрольований виріб у поперечному напрямку. Магнітний потік концентрується на поверхні виробу, що зумовлює високу чутливість до поверхневих дефектів у мікронному діапазоні, починаючи з глибини близько 100 мкм.

Магнітоіндукційний контроль (МІК). Цей спосіб дефектоскопічного контролю ґрунтується на явищі виникнення електричного струму, електричного поля або електричної поляризації під час зміни магнітного поля в часі або під час руху матеріального середовища в магнітному полі. Магнітоіндукційний (магнітодинамічний) метод контролю ґрунтується на законі електромагнітної індукції, коли наведена в замкнутому контурі е. д. с. пропорційна зміні в часі зчеплення цього потоку з магнітним потоком магніту. Якщо розміри контуру постійні і він не змінює свого положення відносно вектора магнітної індукції, то використовується так звана трансформаторна е. д. с. у разі змінних магнітних полів. Якщо ж вектор магнітної індукції постійний, то можна змінювати магнітний потік у часі, змінюючи положення контуру відносно вектора магнітної індукції, внаслідок чого виникає так звана електрорушна сила (ЕРС) руху.

У магнітоіндукційній дефектоскопії частіше використовують ЕРС руху, коли об'єкт контролю намагнічують постійним полем, а рухомий контур виконують у вигляді тонкошарової катушки. Найзручнішими є три типи об'єктів контролю: плоскі довгі з поперечними дефектами з поздовжнім переміщенням катушки, циліндричні, коли катушка обертається по колу, і плоскі - у цьому разі здійснюється обертання катушки в площині об'єкта контролю. При цьому треба враховувати дві особливості в організації контролю: індукційна катушка реагуватиме тільки на зміну поля, а не на його абсолютну величину; необхідно, щоб швидкість відносного переміщення катушки та об'єкта контролю була постійною, щоб зв'язок між градієнтом вимірюваного поля і вихідним сигналом був однозначним [99] (4.37).

У приймальній обмотці вимірювальної котушки генерується напруга, яка залежить від провідності матеріалу контролюваного виробу (електричний параметр), форми і розміру кривої гістерезису (аналіз гістерезису дає змогу здійснювати контроль як феромагнітних і аустенітних сталей, так і кольорових металів) (магнітний параметр).

Оскільки крива гістерезису великою мірою залежить від таких параметрів матеріалу виробу, як твердість, склад сплаву і його структура, ці параметри можна ефективно визначити за магнітними властивостями.

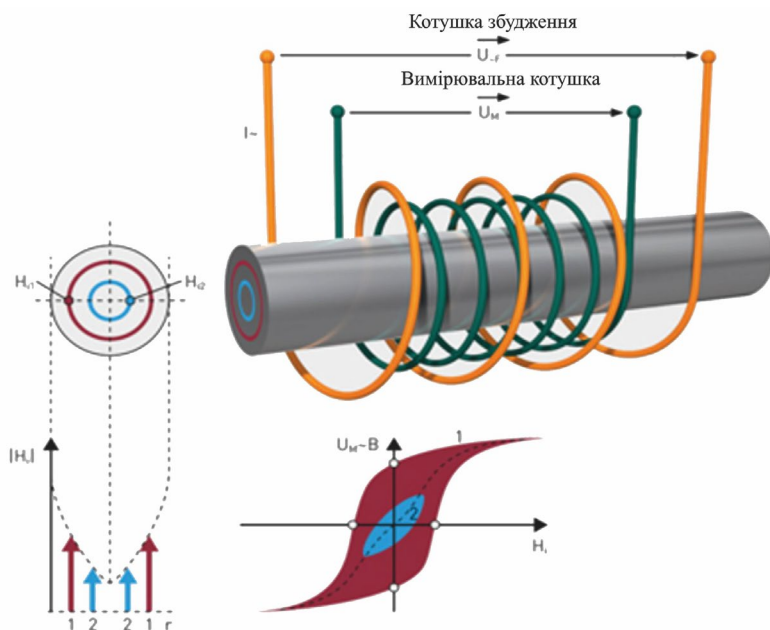


Рис. 4.37. Схема магнітоіндукційного контролю

Змінюючи напруженість збудливого поля, можна цілеспрямовано вибрати ту ділянку модуляції кривої гістерезису, на магнітний параметр якої особливий вплив чинить параметр матеріалу контролю, що знаходиться. Крім того, шляхом вибору частоти збудження можна окремо вивчати властивості поверхні або внутрішнього об'єму виробу.

4.2.8. Резонансні випробування та оцінка геометричних відхилень

Акустичний резонансний контроль (АРК) як метод неруйнівного контролю ґрунтується на збудженні зразка зовнішнім механічним імпульсом [100]. Удар молотком по зразку є придатним методом для імпульсного збудження [101]. Альтернативними методами збудження є, наприклад, падіння кульки, падіння зразка, лазерні імпульси або імпульси стисненого повітря [100]. В ідеалі такий імпульс забезпечує постійну енергію на всіх частотах, що змушує зразок вібрувати у притаманних йому власних модах (коливаннях) і відповідних власних частотах [102]. Ці коливання є довготривалими, оскільки досягається резонанс всередині зразка. Інші частоти, які не відповідають збудженим власним модам (коливанням) - тобто не є резонансними - швидко згасають [103].

Демпфірування призводить до повільного затухання резонансних коливань, які з часом згасають через внутрішнє тертя зразка.

Власні моди (кливання), що виникають, власні частоти і коефіцієнти демпфування представляють вібраційні характеристики зразка. Фізичний сигнал є результатом вимірювання за допомогою мікрофона, лазерного вібрметра або акселерометра [100]. Відхилення та дефекти впливають на вібраційні характеристики зразка, який використовується для якісного порівняння [104]. Таким чином, АРК порівнює виміряний фізичний сигнал досліджуваного зразка з еталонним сигналом вже відібраних зразків, які знаходяться в межах специфікацій компонента (частина ОК). Вже є перші дослідження, які аналізують можливість локалізації дефектів у компонентах на основі імпульсного збудження та даних моделювання. Дослідницька група під керівництвом Лай і Сун виявила можливість локалізації дефектів з теоретичної точки зору, а також те, що вплив декількох дефектів можна спростити за допомогою лінійної суперпозиції [105]. Крім того, вони виявили, що зміни власних частот компонента через зміну фізичних властивостей, таких як щільність, можна розрахувати за допомогою лінійної регресійної моделі [106]. Іншими дослідниками був проаналізований вплив типу дефекту (порожнина, тріщина, змішаний) на розташування дефекту на основі даних моделювання [107].

Лехнер та ін. у 2022 році показали, що можна локалізувати порожнини в литих компонентах на основі моделювання компонента за допомогою MSE

[108]. Вони визначили наявні власні частоти декількох зразків алюмінієвого компонента і розрахували середні власні частоти та статистичний розподіл кожної власної частоти. За допомогою виразу (4.18) експериментальні результати можна порівняти з результатами моделювання для тих самих власних частот.

Розраховані власні частоти можна виразити як функцію (формула 4.18) геометричних відхилень в позиції з координатами x і y . Мінімізація виразу 4.18 призводить до геометрії компонента, яка має найбільш подібні акустичні властивості до випробуваного зразка. Таким чином, геометричні відхилення, такі як порожнини або інші деформації, можуть бути оцінені на основі методу імпульсного збудження.

Власні частоти середнього зразка позначаються через f_i , тоді як власні частоти зразка з порожниною позначаються через g_i , де i – номер певної власної моди. Вираз 4.18 описує член, який мінімізується відносно змінних x та y (координати дефекту). Мінімальна середньоквадратична похибка для всіх власних частот дає прогнозоване положення дефекту або деформацію компонента.

$$\Delta f_i = \frac{f_i^{sim} - g_i^{sim}(x, y)}{f_i^{sim}} \quad (4.18)$$

У виразі 4.19 відносний вплив дефекту в симуляції порівнюється з впливом дефекту в експериментальних зразках. Мінімум по відношенню до всіх n власних частот призводить до прогнозування положення порожнини. Кожна власна частота нормалізується за допомогою першої власної частоти у відповідному спектрі. Це зменшує вплив флуктуацій жорсткості в наборі зразків. В ідеалі, симуляція точно моделює геометрію і матеріал кожної деталі. Однак неточності імітаційної моделі порівняно з кожним зразком є результатом виробничих допусків, наприклад, варіацій геометрії та пружних констант. Обидва ці параметри сильно залежать від поточних умов процесу, які можуть змінюватися від деталі до деталі.

Тому необхідна відмовистійка постановка задачі мінімізації. Таке відносне порівняння є перевагою, оскільки неточності в імітаційній моделі можна ігнорувати до тих пір, поки на відносний вплив порожнини не впливає.

$$\min(x, y) \left\{ \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i^{exp}/f_1^{exp} - g_i^{exp}/g_1^{exp}}{f_i^{exp}/f_1^{exp}} - \frac{f_i^{sim}/f_1^{sim} - g_i^{sim}(x, y)/g_1^{sim}(x, y)}{f_i^{sim}/f_1^{sim}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4.19)$$

Крім того, для покращення результатів прогнозування та врахування виробничих допусків використовується компенсація за різні фізичні властивості зразків. Маса визначається і використовується для адаптації виміряних власних частот за допомогою лінійної регресійної моделі, аналогічної до розрахунку, запропонованого Сюй та ін. [106], які виявили, що лінійна функція здатна описати вплив зміни густини до 3 %.

Тому для кожної власної частоти розраховується коефіцієнт, який найкраще описує лінійну функцію між масою і кожною власною частотою. Ці коефіцієнти використовуються для корекції відхилення від середнього значення маси, що реалізується в кінцево-елементному моделюванні.

Точність локалізації залежить від положення дефекту в компоненті та розсіювання продукту внаслідок процесу лиття.

За допомогою даного алгоритму можна перевіряти металеві деталі і автоматично обчислювати оцінку, чи відповідає компонент специфікаціям, чи ні, всього за кілька секунд, порівняно з набагато більшим часом і зусиллями при рентгенівській томографії.

5. ОСНОВИ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ.

Статистичний контроль якості зародився в 30-х роках XX століття у зв'язку з промисловим застосуванням контрольних карт, винайдених доктором Уолтером Шухартом (США) [113]. Разом з тим, батьківщиною сучасної статистики можна вважати Велику Британію, про що свідчить ухвалення в 1935 р. британських стандартів серії 600, заснованих на статистичному аналізі Карла Пірсона [114].

У промисловості статистичні методи контролю якості застосовуються вже не одне десятиліття, але ці методи і дотепер не стали невід'ємною частиною робіт з поліпшення якості, а також повсякденним інструментом виявлення причин помилок під час виготовлення продукції. Пов'язано це з тим, що пропонувалися надто складні методи, які були розраховані тільки на інженерно-технічних працівників, використовувалася математична мова, досить важка для розуміння.

Кардинальні зміни настали після того, як у Японії після 50-х років XX століття зрозуміли, що, незалежно від того, наскільки хороші британські, американські або інші методи, їх не можна імпортувати до Японії в тому вигляді, в якому вони є; що для того, щоб домогтися успіху, потрібно створювати свої методи. Всесвітньо відомий японський фахівець у галузі управління якістю Каоро Ісікава вважав: «ми пропонували людям занадто складні методи, тоді як на тому етапі вистачило б і простих» [115]. У Японії до реальних умов було адаптовано найпростіші статистичні методи. Цим методам навчили у спеціально створених гуртках якості весь персонал фірм, починаючи з керівників і закінчуючи виробничими робітниками, всіляко заохочували розв'язування конкретних проблем, що виникають на робочому місці, або самостійно, або за допомогою інших робітників.

Вивчення й аналіз японської практики свідчить про те, що широке впровадження автоматизованих виробничих процесів, робототехніки, гнучких автоматизованих комплексів у принципі неможливе без використання статистичних методів контролю якості. Актуальність цих

методів контролю якості за сучасного рівня високотехнологічного виробництва стала ще більш злободенною, ще більш необхідною.

У результаті, вже до кінця 70-х років XX століття Японія стала світовим лідером за якістю таких товарів масового попиту, як автомобілі, телевізори, копіювальна, фото- і кінотехніка, інтегральні схеми, побутова електроніка. Японські товари і зараз продовжують тіснити на світових ринках американські товари і товари західноєвропейських країн.

Статистичні методи є одним із численних засобів забезпечення якості, і успіх у цій галузі визначається правильним поєднанням усіх наявних засобів залежно від конкретних умов. Застосування статистичних методів при впровадженні стандартів ISO серії 9000 набуває особливої значущості, тому що тільки за їхньою допомогою можливе об'єктивне підтвердження стабільності процесів і якості продукції підприємства, і без чого неможливо розв'язувати питання сертифікації продукції та технологічних процесів [116].

5.1. Загальна характеристика статистичних методів аналізу та контролю якості технологічних процесів і продукції.

Основним завданням статистичних методів контролю є забезпечення виробництва придатної до вживання продукції та надання корисних послуг з найменшими витратами. Із цією метою проводять аналіз нових операцій або інші дослідження, спрямовані на забезпечення виробництва придатної до вживання продукції.

За ступенем складності статистичні методи можна умовно поділити на три категорії [117]:

I. Елементарні (стандартні) статистичні методи, що включають сім японських інструментів контролю якості (контрольний аркуш, гістограма, діаграма розкиду, метод стратифікації, аналіз (діаграма) Парето, діаграма Ісікави, контрольна карта). Для підприємств, які поставили за мету впровадження міжнародних стандартів з управління якістю та ощадливого виробництва, обов'язковим є оволодіння цими інструментами всім виробничим персоналом – від робітників до вищих керівників.

II. Проміжні (спеціальні) статистичні методи, до яких належать теорія вибірових обстежень, статистичний вибіровий контроль, методи проведення статистичних оцінок і визначення критеріїв, методи застосування

сенсорних перевірок (експертні оцінки), кореляційний і регресійний аналізи. Володіти та вміти застосовувати ці методи повинен інженерно-технічний персонал виробничих підрозділів, служб контролю якості та технологічного забезпечення виробництва.

III. Передові (аналітичні) статистичні методи, що включають методи планування та розрахунку експериментів, багатофакторний і дисперсійний аналіз, методи дослідження операцій. Уміти застосовувати спеціальні статистичні методи має інженерно-технічний персонал дослідницьких і проектних підрозділів.

Впровадження статистичних методів контролю дає позитивні результати за такими показниками підвищення ефективності роботи підприємства:

- підвищення якості сировини, що купується;
- економія сировини та робочої сили;
- підвищення якості виробленої продукції;
- зниження кількості браку;
- зниження витрат на проведення контролю;
- поліпшення взаємозв'язку між виробництвом і споживачем;
- полегшення переходу виробництва з одного виду продукції на інший.

Одним з основних принципів контролю якості за допомогою статистичних методів є прагнення підвищити якість продукції, здійснюючи контроль на різних етапах виробничого процесу.

Залежно від поставлених цілей з управління якістю продукції на підприємстві, статистичні методи можуть застосовуватися для:

- статистичного аналізу точності та стабільності технічних характеристик продукції, технологічних процесів, обладнання тощо;
- статистичного регулювання та управління технологічними процесами;
- статистичного приймального контролю якості продукції та її оцінки.

Статистичний аналіз точності та стабільності технологічних процесів передбачає встановлення статистичними методами значень показників точності та стабільності технологічного процесу і визначення закономірностей його протікання в часі.

Статистичний аналіз застосовується в тих випадках, коли за обмеженим числом спостережень необхідно вирішувати такі практичні завдання:

- визначити фактичне значення показників точності та стабільності технологічного процесу, обладнання або якості продукції;
- виявити ступінь впливу випадкових і систематичних факторів на точність і стабільність технологічного процесу та якості продукції;
- обґрунтувати технічні норми і допуски на продукцію;
- виявити резерви виробничого і технологічного процесу;
- обґрунтувати вибір технологічного обладнання та засобів вимірювань для виготовлення продукції;
- виявити можливість та обґрунтувати доцільність впровадження статистичних методів у виробничий процес;
- оцінити надійність технологічних систем;
- обґрунтувати необхідність реконструкції технологічного процесу або ремонту технологічного обладнання та інших заходів щодо вдосконалення технологічного процесу;
- при періодичних перевірках технологічної точності устаткування і оснащення в процесі контролю дотримання технологічної дисципліни виготовлення продукції основного виробництва;
- при проведенні внутрішньозаводської атестації технологічних процесів;
- під час встановлення нового технологічного обладнання та приймання обладнання після ремонту;
- при аналізі та оцінці показників виробничого процесу і якості продукції тощо.

В умовах серійного, дрібносерійного і дослідного виробництва статистичний аналіз насамперед впроваджують для систематичного оцінювання точності технологічного устаткування і раціональної організації робіт на цьому устаткуванні.

У комплексній системі управління якістю продукції та менеджменту якості статистичні методи контролю є найбільш прогресивними. Вони засновані на застосуванні методів математичної статистики до систематичного контролю за якістю виробів і станом технологічного процесу

283

з метою підтримання його стійкості та забезпечення заданого рівня якості продукції, що випускається.

Статистичні методи контролю виробництва і якості продукції мають низку переваг перед іншими методами. По-перше, вони є профілактичними, по-друге, дають змогу в багатьох випадках обґрунтовано перейти до вибіркового контролю й у такий спосіб знизити трудомісткість контрольних операцій, а по-третє, створюють умови для наочного представлення динаміки зміни якості продукції та настроювання процесу виробництва, що дає змогу вчасно вживати заходів для запобігання браку не лише контролерам, а й працівникам цеху – робітникам, бригадирам, технологам, майстрам тощо.

Статистичні методи управління якістю продукції активно використовують під час аналізу технологічного процесу з метою його необхідного настроювання, точності та приведення до статистично стійкого стану, для здійснення поточного контролю з метою регулювання та підтримання процесу в стані, який забезпечує задані якісні параметри, під час проведення вибіркового статистичного приймального контролю якості готової продукції, а також під час розроблення та впровадження проектів безперервного поліпшення за методологією Лін Шість Сигма [59].

Алгоритм розроблення та впровадження статистичних методів і статистичного контролю якості та технологічних процесів включає такі етапи, наведені на рис. 5.1.

Процес впровадження статистичних методів контролю якості та технологічних процесів починається з вибору об'єкта контролю і закінчується безперервним або доволі частим моніторингом вимірювань параметрів процесів і якості продукції з метою оперативної реакції на появу будь-яких відхилень від заданих параметрів, їхнього аналізу та вироблення коригувальних дій. Пов'язано це з тим, що на стабільність технологічних процесів і, відповідно, якості продукції впливає значна кількість різноманітних чинників, багато з яких досить складно, або й неможливо вимірити. Якщо мати на увазі продукцію металургійного виробництва, – це нерівномірність хімічного складу, фізико-механічних властивостей, температури нагріву, кваліфікації персоналу, зношеність устаткування і технологічного інструменту тощо.

Далі детальніше розглянемо інструменти статистичного аналізу та контролю.

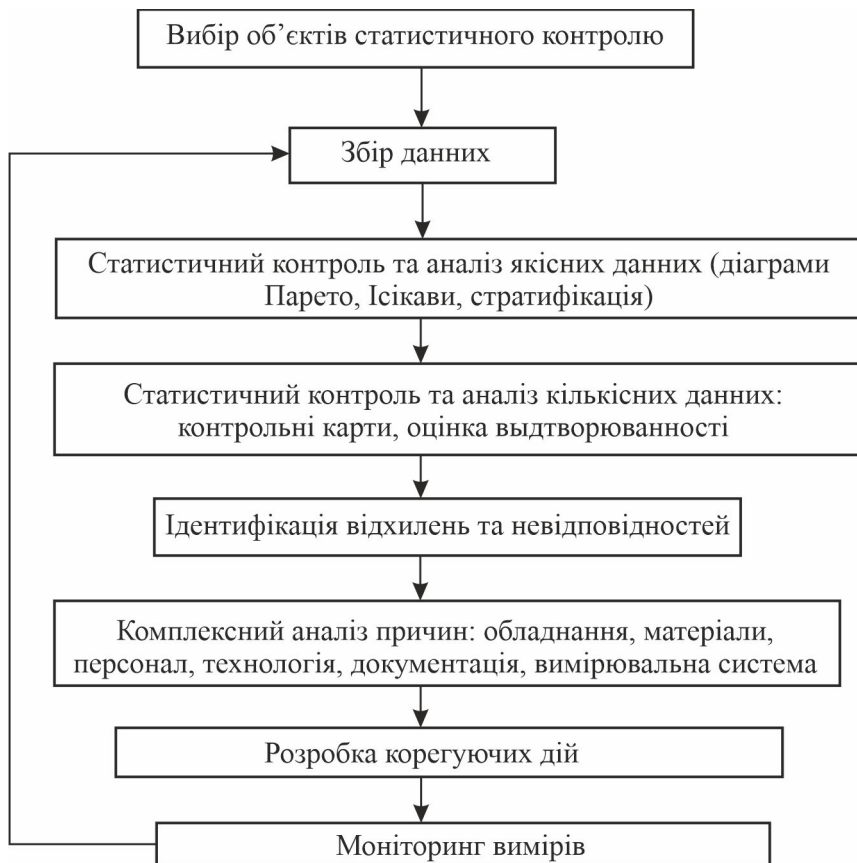


Рис. 5.1. Алгоритм розроблення та впровадження статистичного контролю якості та технологічних процесів

5.2. Елементарні (стандартні) інструменти статистичного аналізу та контролю.

До елементарних статистичних методів, за допомогою яких розв'язують 95% проблем будь-якого виробництва, належать: контрольний листок; гістограма якості; діаграма розкиду; метод розшарування; діаграма

(аналіз) Парето; причинно-наслідкова діаграма (діаграма Ісікава); графіки та контрольна карта [124] (рис. 5.2).

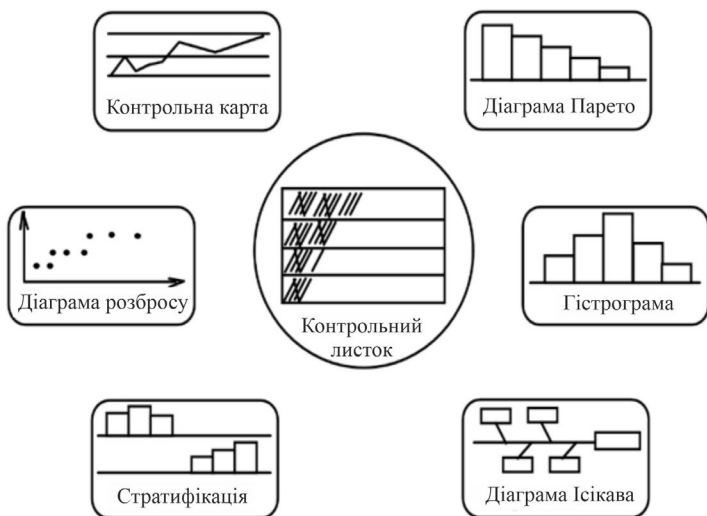


Рис. 5.2. Сім елементарних інструментів статистичного контролю якості

Раніше, під час розгляду методології Шість Сигма коротко вже було розглянуто ці сім найпростіших інструментів статистичного аналізу, які є базою методології Лін Шість Сигма. Розглянемо детальніше ці елементарні статистичні методи.

5.2.1. Контрольний листок

В попередньому розділі було сказано, що контрольний аркуш є інструментом для збору даних і автоматичного їх упорядкування для полегшення подальшого використання зібраної інформації. Не випадково на рис. 5.2 контрольний листок розташований у центрі семи японських інструментів контролю якості. Тільки після збирання вихідних даних можливе застосування будь-якого з шести інших інструментів контролю якості.

Контрольний листок – це, як правило, паперовий бланк, на якому заздалегідь надруковано контрольовані параметри, відповідно до яких можна

заносити дані за допомогою позначок або простих символів. Під час складання контрольних листків обов'язково вказується, хто, на якому етапі процесу і протягом якого часу збирав дані. Обсяг даних, що фіксуються в контрольних листках, має охоплювати достатньо великий період часу (для серійного виробництва – не менше 1...3 місяців). Форма листка має бути простою і зрозумілою без додаткових пояснень.

Бажано, щоб залежно від цілей збору інформації, він максимальною мірою відповідав формам збору інформації за показниками досліджуваного бізнес-процесу в системі менеджменту якості, які вже існують на підприємстві. На підставі зібраних даних складаються підсумкові таблиці, де ці дані підсумовуються. Необхідно зауважити, що контрольний листок є не тільки джерелом збору первинної інформації щодо якості продукції та параметрів технологічних процесів під час здійснення проєктів Лін Шість Сигма. Насправді функції цього інструменту значно ширші. Аналіз будь-якого процесу виробничого підприємства, компанії, фірми незалежно від сфери виробництва продукції або послуг на початковій стадії передбачає збір та аналіз первинних вихідних даних. Багаторічний досвід засвідчив, що контрольні листки є найпростішою та найінформативнішою формою збору та систематизації первинної інформації для будь-якого методу статистичного аналізу будь-яких показників будь-яких бізнес-процесів.

5.2.2. Гістограма якості

Гістограма (від англ. *Histogram*) – це графічне представлення розподілу кількісних даних. Уперше гістограма була запропонована Карлом Пірсоном, англійським математиком і статистом [114].

Гістограма дає змогу візуально оцінити закон розподілу величини розкиду даних, а також ухвалити рішення про те, на чому слід сфокусувати увагу для цілей поліпшення процесу.

Гістограма відображається серією стовпчиків однакової ширини, але різної висоти. Ширина стовпчика представляє інтервал у діапазоні спостережень, висота - кількість спостережень (вимірювань), що потрапили в цей інтервал. За нормального закону розподілу даних існує тенденція розташування більшості результатів спостережень ближче до центру

розподілу (до центрального значення) з поступовим зменшенням при віддаленні від центру.

Гістограму застосовують головним чином для аналізу значень вимірних параметрів, але її можна використовувати і для оцінки показників можливостей процесів.

Систематизуючи показники якості та аналізуючи побудовану для них гістограму, можна легко зрозуміти вид розподілу, а визначивши середнє значення показника і стандартне відхилення. Можна провести порівняння показників якості з контрольними нормативами і в такий спосіб отримати інформацію високої точності.

Так само як і контрольний листок, гістограма є доволі універсальним інструментом статистичного аналізу, який дає змогу візуалізувати вихідні дані.

Методика побудови гістограми наступна. Для побудови гістограми серед наведених у сумарній таблиці даних знаходять мінімальне значення (y_{min}) і максимальне значення (y_{max}). Потім, для групування статистичного матеріалу вибирають кількість класів (інтервалів). Число класів не повинно бути занадто великим (ряд розподілу при цьому стає невизначим і частоти в ньому схильні до незакономірних коливань), але не повинно бути і занадто малим (властивості розподілу описуються статистичним рядом занадто грубо). Практикою встановлено, що якщо кількість даних у межах 40...100, доцільно вибирати 7...9 інтервалів, коли в межах 100...500, то – 8...12 інтервалів, коли в межах 500...1000, то – 10...16 інтервалів.

Потім визначаємо кількість спостережень, що потрапили в кожен інтервал. Рекомендовано дотримуватися такого правила: до кожного класу потрапляють тільки ті спостереження, чисельні значення яких більші або дорівнюють нижній межі класу і менші за верхню межу. Ці дані заносять у таблицю. За частотами будується гістограма. Для цього на кожному інтервалі потрібно побудувати стовпчик (прямокутник), висота якого дорівнює (пропорційна) частоті потрапляння спостережень у цей інтервал (рис. 5.3).

Як бачимо, гістограма являє собою стовпчиковий графік. Наносячи на графік допустимі значення параметра, можемо визначити, як часто потрапляє цей параметр у допустимий діапазон (рис. 5.4).



Рис. 5.3. Гістограма досліджуваного параметра в координатах ($m - y$)

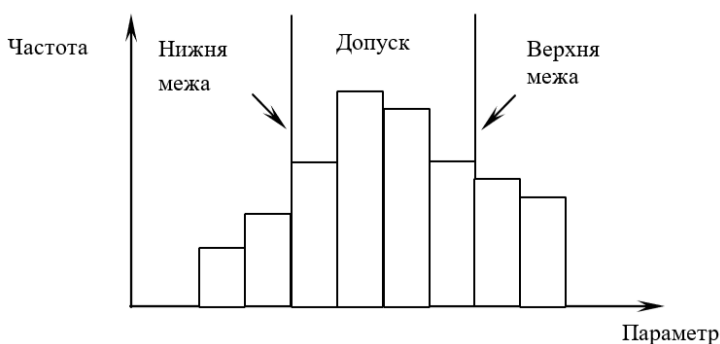


Рис. 5.4. Гістограма з допустимими зонами

5.2.3. Діаграма розкиду

Діаграма розкиду (від англ. *Scatter diagram* – кореляційна діаграма) застосовується у виробництві та на різних стадіях життєвого циклу продукції для з'ясування залежності між показниками якості та основними факторами виробництва.

Як і попередні інструменти, діаграма розкиду також є універсальним інструментом статистичного контролю. Вона будується як графік залежності між двома параметрами (змінними). Ці дві змінні можуть належати до:

- характеристиці якості та фактору, що впливає на неї;
- двом різним характеристикам якості;
- двом факторам, що впливають на одну характеристику якості.

Діаграма розкиду є інструментом, що дає змогу визначити вид і тісноту зв'язку між парами (x, y) відповідних змінних. Якщо на площині xOy в якості точок позначимо кожну пару (x_i, y_i) , отримаємо діаграму розкиду. Деякі типові варіанти скупчень точок наведено на рис. 5.5.

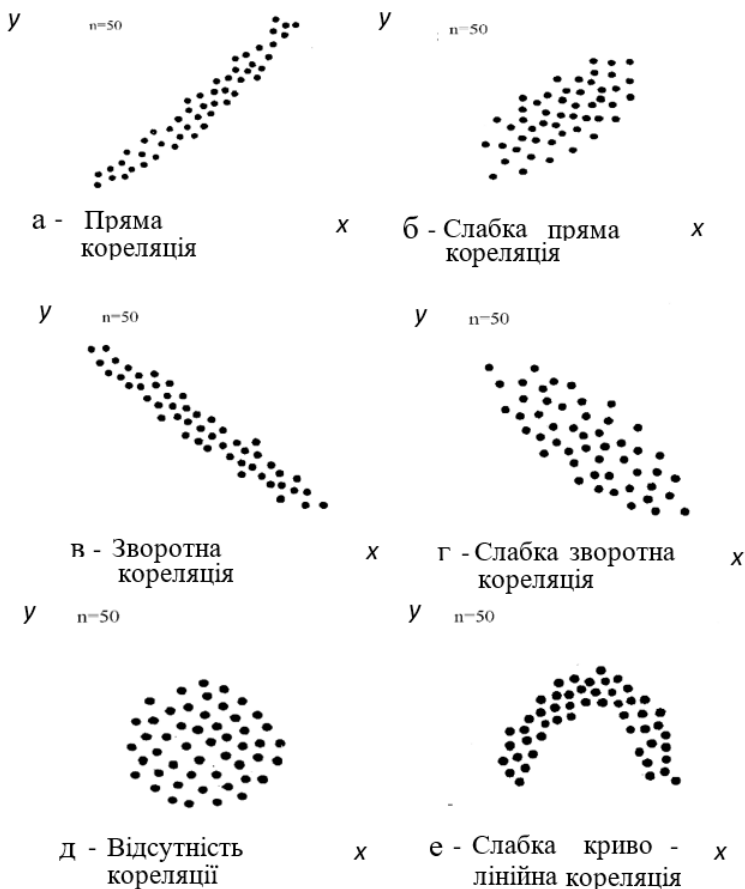


Рис. 5.5. Варіанти скупчення точок

На рис.5.5, *а* чітко проглядається пряма кореляція між x та y . У цьому разі під час здійснення контролю за причинним фактором x можна керувати значенням параметра y . На рис.5.5, *б* також наведено приклад прямої кореляції. При збільшенні x збільшується також y , але розкид найбільш значущий стосовно певного значення x . Тому таку кореляцію називають слабкою або легкою. У цьому разі за допомогою контролю причинного фактора x можна до певної міри тримати під контролем характеристику y , але необхідно також мати на увазі й інші фактори, що впливають на y . На рис.5.5, *в* показано приклад зворотної (негативної) кореляції. При збільшенні x характеристика y зменшується. Якщо причинний фактор x перебуває під контролем, характеристика y залишається стабільною. На рис.5.5, *г* наведено випадок слабкої зворотної кореляції, коли при збільшенні x характеристика y зменшується, але при цьому великий розкид значень y , що відповідають фіксованому значенню x . На рис.5.5, *д* показано приклад відсутності кореляції, коли жодної вираженої залежності між x і y не спостерігається. У цьому разі необхідно продовжити пошук чинників, що корелюють з y , виключивши з цього пошуку чинник x . Між параметрами x і y можливі також випадки криволінійної кореляції (рис.5.5, *е*). Якщо при цьому діаграму розкиду можна розділити на ділянки, що мають прямолінійний характер, то проводять такий поділ і досліджують кожну ділянку окремо, як прямолінійну кореляцію.

Побудова діаграми розкиду здійснюється в такій послідовності:

1. Збирають щонайменше 25...30 пар даних (x , y), між якими мають дослідити залежність; зібрані дані поміщають у таблицю.

2. Знаходять максимальні та мінімальні значення для x і y . Вибирають шкали на горизонтальній і вертикальній осях так, щоб обидві довжини робочих частин вийшли приблизно однаковими (для полегшення читання діаграми). Якщо одна змінна - фактор, а друга - характеристика якості, то для фактора вибирають горизонтальну ось x , а для характеристики якості - вертикальну ось y . На кожній осі беруть від 3 до 10 градацій і використовують для полегшення читання круглі числа.

3. На окремому аркуші креслять графік і наносять на нього дані. Якщо в різних спостереженнях виходять однакові значення, показують ці точки,

або малюючи концентричні кружечки, або наносячи другу точку поруч із першою.

4. Роблять усі необхідні позначення: назву діаграми; інтервал часу; кількість пар даних; назви та одиниці виміру для кожної осі; прізвище (та інше) особи, яка будує цю діаграму.

Ступінь кореляційного зв'язку x і y у разі прямолінійної кореляції (рис.5.5, *a, б, в, г*) можна оцінити простим методом – **методом медіан**:

- На діаграмі розкиду проводяться вертикальна і горизонтальна лінії медіан (рис. 5.6). Вище і нижче горизонтальної медіани, праворуч і ліворуч від вертикальної медіани буде рівне число точок. Якщо кількість точок виявиться непарною, слід провести лінію через центральну точку.

- У кожному з чотирьох квадратів, що вийшли в результаті поділу діаграми розкиду вертикальною і горизонтальною медіанами, підраховують число точок і позначають їх n_1 , n_2 , n_3 , і n_4 відповідно. Точки, через які пройшла медіана, не враховують.

- Окремо складають точки в позитивних і негативних квадратах:

$$n_{(+)}=n_1+n_3; n_{(-)}=n_2+n_4; n'=n_{(+)}+n_{(-)}, \quad (5.1)$$

- Для визначення наявності та ступеня кореляції за методом медіан використовується спеціальна таблиця кодових значень n_t , що відповідають різним n' за двох значень коефіцієнта ризику β (0,01 і 0,05).

Порівнюючи менші з чисел $n_{(+)}$ і $n_{(-)}$ з їхнім кодовим значенням n_t , що відповідає значенню n' (для обраного значення β), роблять висновок про наявність і характер кореляції. Якщо менше з чисел $n_{(+)}$ і $n_{(-)}$ виявляється рівним або меншим від табличного кодового значення, то прямолінійна кореляційна залежність має місце. Якщо підраховані значення виявляються більшими за відповідне кодове значення - прямолінійна кореляція відсутня. Однак це не означає, що не може бути криволінійної кореляційної залежності. Для з'ясування цього питання необхідно проводити регресійний і кореляційний аналізи, які буде розглянуто далі.

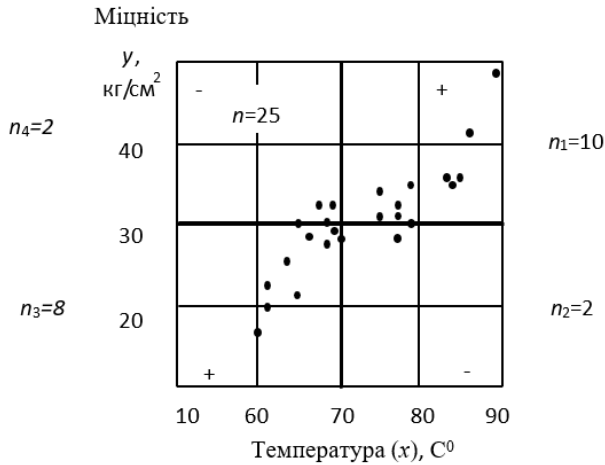


Рис. 5.6. Приклад побудови діаграми розкиду залежності міцності зразків від температури сушильної печі

Оцінка ступеня кореляційної залежності здійснюється за допомогою коефіцієнта кореляції, який обчислюється за формулою:

$$r = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right] / S_x S_y, \quad (5.2)$$

де X_i, Y_i – значення параметрів x і y для i -го вимірювання;

$\bar{X}, \bar{Y}$ – середні арифметичні значення величин x і y ;

S_x, S_y – стандартні відхилення величин x і y ;

n – кількість вимірювань (обсяг вибірки);

Якщо $r = \pm 1$ – кореляційна залежність присутня; якщо $r = 0$ – кореляційна залежність відсутня.

Чим ближче r до 1, тим тісніша залежність між параметрами.

За допомогою діаграми розкиду можна грамотно розв'язувати багато питань, наприклад, установити залежність міцності зразків від параметрів сушильної печі (див. рис. 5.6), залежність прибутку від скорочення браку тощо. За наявності кореляційної залежності між двома факторами значно полегшується контроль процесу з технологічного, часового та економічного погляду.

Діаграму розкиду в процесі контролю якості використовують також для виявлення причинно-наслідкових зв'язків показників якості та чинників, що впливають.

5.2.4. Метод стратифікації

Метод стратифікації (від лат. *stratum* – шар і *fasio* – роблю) – метод статистичного аналізу, що передбачає поділ отриманих даних на окремі групи (шари, страти) залежно від обраного стратифікувального чинника.

Стратифікація – один з інструментів якості, призначений для виявлення будь-якої закономірності в масиві даних завдяки їх поділу. Стратифікація застосовується в тому разі, коли дані з різних джерел зосереджені разом і це заважає визначити структуру або їхню системність. Як правило, цей інструмент використовують спільно з іншими інструментами аналізу даних.

Термін стратифікація означає – розшаровування. У результаті стратифікації дані відповідно до їхніх особливостей поділяються на групи або шари (страти). Для того, щоб проводити розшарування статистичних даних, важливо правильно визначити фактори, за якими здійснюватиметься стратифікація. Збирання даних має відбуватися таким чином, щоб можна було врахувати ці чинники. В іншому разі цей інструмент не дасть результатів.

Існують різні чинники розшаровування, застосування яких залежить від конкретних завдань. Наприклад, якщо у вигляді статистичних даних збирають дані про кількість дефектів, що виникають під час виробництва металургійної продукції, то стратифікацію можна проводити за такими факторами, як кваліфікація персоналу, стан обладнання, склад сировини тощо. У результаті стратифікація дасть змогу визначити кількість дефектів, пов'язаних із кваліфікацією персоналу, кількість дефектів, пов'язаних з обладнанням, кількість дефектів, пов'язаних із якістю тощо.

Як стратифікуючий фактор можуть бути обрані будь-які параметри, що визначають особливості умов виникнення та отримання даних:

- різне обладнання;
- оператори, виробничі бригади, ділянки, цехи, підприємства тощо;
- час збору даних;

- різні види сировини;
- відмінність використовуваного устаткування, засобів вимірювання тощо.

За відсутності врахування стратифікуючого чинника (розшарування даних) відбувається їхнє об'єднання та знеособлення, що ускладнює встановлення дійсного взаємозв'язку між отриманими даними та особливостями їхнього виникнення.

Наприклад, під час аналізу джерела дефектної продукції, що поставляється підприємству кількома сторонніми постачальниками, доцільно як стратифікуючий фактор обрати постачальників і провести стратифікацію дефектної продукції за постачальниками.

Під час практичного використання методу стратифікації діють у такий спосіб:

1. Визначаються фактори, за якими буде проводитися стратифікація. Як фактори можуть виступати час, оператори, обладнання, умови виробничих операцій (такі як температура, вологість, тиск, освітленість тощо), матеріали та засоби вимірювання (такі як вимірювальне обладнання та методи вимірювання).

2. Визначається кількість страт (шарів). Кількість страт береться відповідно до кількості факторів, виявлених на попередньому кроці. Наприклад, відхилення в показниках продукції можуть виникати через дії оператора. Якщо до виробництва продукту залучено чотири оператори, то стратифікацію виконують за чотирма факторами і кількість страт має бути чотири. Або, якщо умови виробництва продукту залишаються одними й тими самими, зміни в характеристиках можуть виникати в різні періоди часу - перша зміна, друга зміна або третя зміна роботи. У цьому варіанті страт буде три (за кількістю змін) і стратифікація проводиться за трьома факторами.

3. Обирається необхідний інструмент якості для графічного представлення статистичних даних. Як правило, для цих цілей використовується діаграма розкиду, контрольна карта або гістограма. Можна застосовувати і табличний метод, але графічний спосіб є більш наочним і дає змогу швидше визначити системність у поданих даних.

4. Визначається кількість статистичних даних, що потрапляють у кожну страту. Для того, щоб стратифікація даних була ефективною,

необхідно дотримуватися двох умов. По-перше, відмінності між значеннями випадкової величини всередині страти мають бути якомога меншими порівняно з відмінністю її значень у вихідній сукупності даних. По-друге, відмінності між стратами мають бути якомога більшими. Кількісно цю відмінність можна визначити за різницею середніх значень випадкової величини в кожній страті.

5. На обраний графічний інструмент якості «наносяться» дані із зазначенням приналежності цих даних до кожної зі страт. Для відокремлення даних одна від одної, можна використовувати найпростіший метод – колірну індикацію даних.

6. Проводиться аналіз підмножини даних. Аналіз даних проводиться для кожної страти окремо.

Розглянемо застосування методу стратифікації на прикладі аналізу якості виробів в одному з цехів підприємства (рис. 5.7). Нехай після збирання статистичних даних було побудовано гістограму, що відображає випадковий розподіл головного параметра x якості продукції, представлену на рис. 5.7, а. З рис. 5.7 видно, що розподіл близький до рівномірного, розмах R_u статистичних даних для цього цеху займає майже все поле допуску, індекс придатності процесу $P_p \approx 1,09$ (не набагато більший за одиницю).

У процесі стратифікації здійснюємо групування (розшарування) статистичних даних за трьома змінами, які працюють у цеху. Результати такої роботи наведено на рис. 5.7, б, в, г. Видно, що розподіл статистичних даних у кожній із трьох змін близький до нормального закону розподілу, причому розмахи R_1 , R_2 , R_3 (ширина підстави гістограм для кожної зміни) відносно невеликі, а середні арифметичні значення x_1 , x_2 , x_3 головного параметра якості продукції в кожній зміні дуже відрізняються одне від одного.

За результатами стратифікації статистичних даних (див. рис. 5.7, б, в, г) можуть бути сформульовані такі пропозиції щодо поліпшення якості продукції цеху. Наприклад, якість продукції може бути підвищена завдяки проведенню тільки організаційно-технічних заходів без капітальних вкладень у нові точніші верстати й устаткування, а саме після розроблення та впровадження заходів, спрямованих на те, щоб середні арифметичні значення

x_1, x_2, x_3 у кожній зміні максимально наблизилися до значення середини Ц поля допуску.

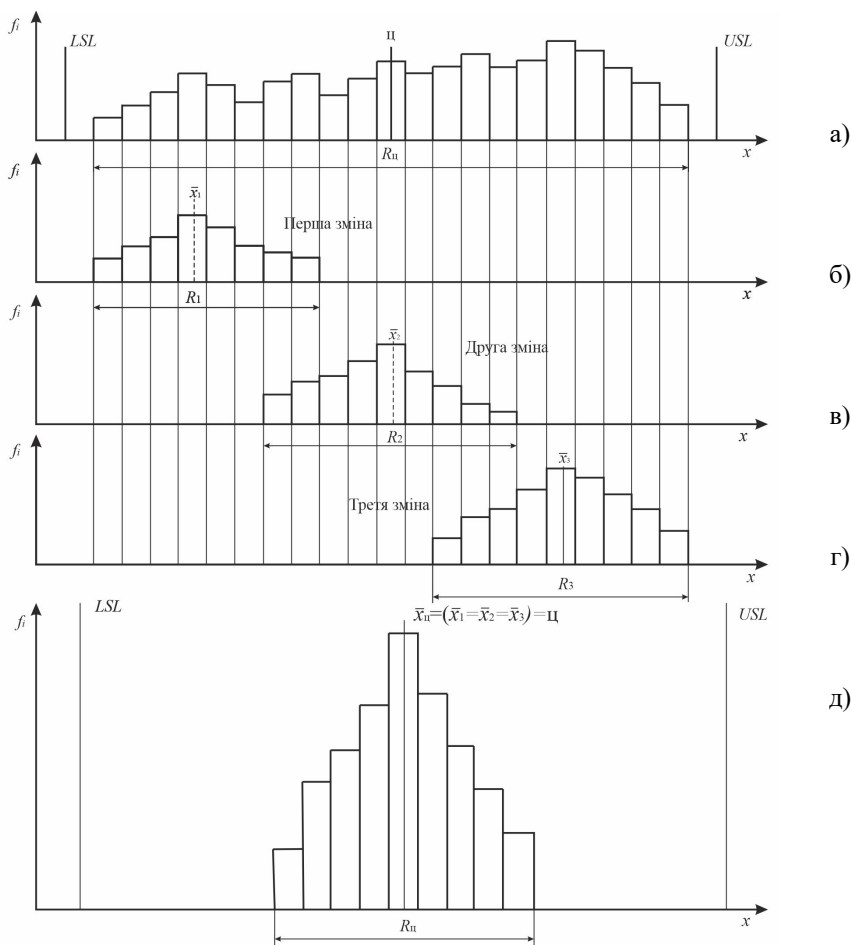


Рис. 5.7. Стратифікація (розшарування) статистичних даних щодо якості продукції цеху за трьома змінами: а – гістограма для всього цеху; б, в, г – відповідно гістограми для 1-ї, 2-ї та 3-ї змін; д – гістограма розподілу головного параметра якості продукції цеху після поєднання середніх значень x_1, x_2, x_3 для кожної змін із серединою Ц поля допуску

Після виконання цих заходів сумарна гістограма для цеху загалом набуде вигляду, показаного на рис. 5.7, д. З рис. 5.7, д видно, що в разі суміщення середніх арифметичних значень головного параметра якості x_1 , x_2 , x_3 для кожної зміни із серединою Ц поля допуску сумарна гістограма для цеху загалом має значно менший розмах $R_u' < R_u$, що відповідає значенню індексу придатності процесу $P_p \approx 2,56$.

Розшарування даних дає змогу отримати уявлення про приховані причини дефектів або виявити неочевидні шляхи поліпшення якості продукції. Під час розшарування даних слід прагнути до того, щоб відмінність усередині кожної групи (страги, шару) була якомога меншою, а відмінність між групами - якомога більшою. Статистичний аналіз точності технологічних процесів є одноразовим обстеженням надійності процесу шляхом вивчення якісних характеристик великої кількості виробів, оброблених у певних умовах на даній операції. Такий аналіз дає можливість визначити фактичну точність процесу і порівняти її із заданою, оцінити якість і стійкість налаштованості процесу, виявити ймовірний відсоток дефектів, визначити економічно доцільні допуски.

Переваги, які дає стратифікація, пов'язані з можливістю опрацювання певних груп даних окремо. Це дає змогу виявити залежності, які під час роботи з усією сукупністю можуть не проявлятися. Крім того, спрощується аналіз статистичних даних.

До недоліків цього методу можна віднести необхідність попереднього врахування чинників стратифікації. Якщо чинники будуть обрані не правильно, то стратифікація не дасть очікуваного результату. Тоді для розшаровування даних за новими факторами виникає необхідність знову збирати статистичні дані.

5.2.5. Аналіз (діаграма) Парето

Як уже було сказано раніше, діаграма Парето (по імені італійського економіста Вільфредо Парето) – це стовпчаста діаграма, на якій інтервали (стовпчики) впорядковані за низхідною лінією. На такій діаграмі інтервали можуть представляти види дефектів, їх локалізацію, помилки тощо. А висота інтервалів (висота стовпчиків) – частоту виникнення дефектів, їх відсоткове співвідношення, вартість, час тощо.

Діаграма Парето є графічним відображенням принципу (правила) Парето [125]. У менеджменті якості застосування цього правила показує, що значна кількість невідповідностей і дефектів виникає через обмежену кількість причин. Коротко правило Парето формулюється як 80 на 20 (рис. 5.8). Іншими словами, 20 % докладених зусиль дає 80 % отриманого результату. Якщо застосувати це правило стосовно дефектів, то виявиться, що 80 відсотків дефектів виникає через 20 відсотків причин.



Рис. 5.8. Принцип Парето

Приклади справедливості принципу Парето з царини бізнесу: 20 % асортименту продукції дають 80 % від загального обсягу продажів у грошовому вираженні; 20 % вихідних продуктів визначають 80 % вартості готового виробу; 20 % клієнтів визначають 80 % доходів компанії; 80% благодійних фондів формують із 20 % наявних джерел; 80 % продукції виробляє 20 % працюючих; у багатовимірній регресії 80 % змінюваності відгуків змінної пояснюють 20 % регресорів; 80 % проблем виникають на 20 % настанов; зрештою 80 % втрат від браку чи переробок відбуваються через 20 % можливих причин, які можуть бути наслідком цього. Можна навести приклади із соціальної сфери: 20 % злочинців скоюють 80 % злочинів; 20 % водіїв винні у 80 % дорожньо-транспортних пригод. І навіть удома: 80 % усього часу ви носите 20 % наявного у вас одягу; 80 % усіх хибних тривог під час спрацьовування протиугінної сигналізації спричинено 20 % можливих причин. Двигун внутрішнього згоряння також чудово підтверджує справедливість цього принципу: 80 % енергії, що виділилася під час згоряння палива, втрачається, а колесам передається лише 20 % всієї енергії.

Виходить, що на практиці 4/5 докладених зусиль не мають до одержуваного результату майже ніякого відношення.

Діаграма Парето використовується під час виявлення найбільш значущих і суттєвих чинників, що впливають на виникнення невідповідностей або браку. Це дає можливість установити пріоритет діям, необхідним для розв'язання проблеми. Крім того, діаграма Парето і правило Парето дають змогу відокремити важливі чинники від малозначущих і несуттєвих.

Виділяють два основні види діаграми Парето (рис. 5.9): за результатами діяльності та за причинами.

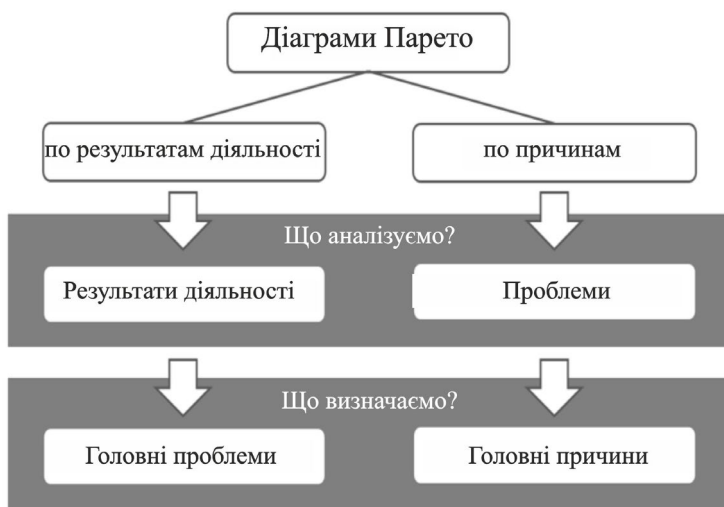


Рис. 5.9. Види діаграми Парето

Діаграма Парето за результатами діяльності призначена для виявлення головної проблеми і відображає такі небажані результати діяльності:

- **якість:** дефекти, поломки, помилки, відмови, рекламції, ремонти, повернення продукції;
- **собівартість:** обсяг втрат, витрати;
- **термін поставок:** нестача запасів, помилки в складанні рахунків, зрив термінів поставок;

- **безпека:** нещасні випадки, трагічні помилки, аварії.

Діаграма Парето за причинами відображає причини проблем, що виникають під час виробництва, і використовується для виявлення головної з них:

- **виконавець роботи:** зміна, бригада, вік, досвід роботи, кваліфікація, індивідуальні характеристики;
- **обладнання:** верстати, агрегати, інструменти, оснащення, організація використання, моделі, штампи;
- **сировина:** виробник, вид сировини, завод-постачальник, партія;
- **метод роботи:** умови виробництва, замовлення-наряди, прийоми роботи, послідовність операцій;
- **вимірювання:** точність (вказівок, читання, приладова), вірність і повторюваність (уміння дати однакову вказівку в подальших вимірах одного й того самого значення), стабільність (повторюваність упродовж тривалого періоду), спільна точність, тобто разом із приладовою точністю та таруванням приладу, тип вимірювального приладу (аналоговий чи цифровий).

Діаграма Парето є одним з інструментів у методології Лін Шість Сигма і її часто застосовують у менеджменті якості для усунення дефектів і помилок.

Також крива Парето підходить і для застосування в бізнес-аналізі: вона показує, які ваші клієнти або товари приносять найбільший прибуток, а які - найменший. Застосовують її і в управлінні сервісами і, звісно ж, управлінні проєктами.

Діаграму Парето представлено стовпчиками, черговість яких іде по низхідній лінії зліва направо. Наприклад, ці стовпці можуть представляти види дефектів, їх локалізацію, помилки тощо. Це означає, що найважливіші причини, на які й варто звертати увагу, знаходяться зліва.

Висота стовпців показує частоту виникнення дефектів, їх співвідношення у відсотках, вартість, час тощо. (рис. 5.10).

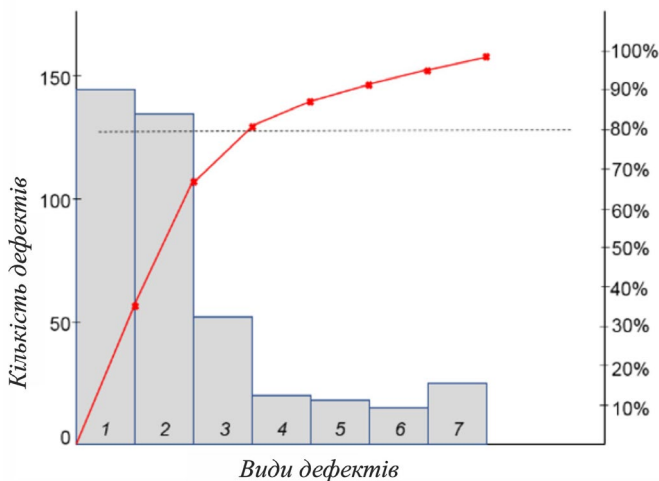


Рис. 5.10. Типовий вигляд діаграми Парето

Суть проблеми можна вловити, спостерігаючи явище з різних точок зору, тому важливо випробувати різні шляхи класифікації даних, доки не виявлять нечисленні важливі чинники, що й слугує метою аналізу Парето. Небажано, щоб група «інші» чинники (або «інші») становила великий відсоток. Якщо таке трапляється, значить, об'єкти спостереження класифіковані неправильно і занадто багато об'єктів потрапило в одну групу. У цьому разі треба використовувати інший принцип класифікації. Якщо дані можна представити в грошовому вираженні, найкраще показати це на вертикальних осях діаграми Парето. Якщо не можна оцінити наявну проблему в грошовому вираженні, саме дослідження може виявитися неефективним.

Витрати – важливий критерій змін в управлінні. Якщо застосувати методику побудови кривої Парето і побудувати додатковий графік, що відображає види дефектів і пов'язану з ними частку шкоди від браку (рис. 5.11), можна дійти до першочергового рішення щодо усунення певного виду браку. При цьому область найбільшої кількості дефектів може не відповідати області найбільшого збитку від браку, оскільки деталь, що має цей дефект, набагато дешевша, менш важлива і легше піддається виправленню. У цьому

разі, бажаючи скоротити частку збитку від браку, слід починати боротьбу з другим дефектом («нерівності»), потім із третім («включення оксидів»), а потім тільки з першим («недолив»), оскільки це економічно вигідніше.

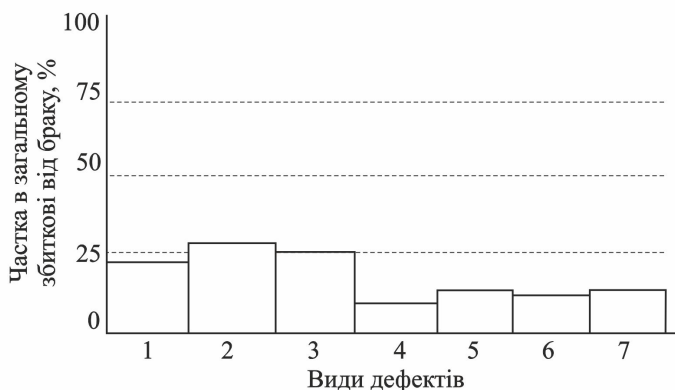


Рис. 5.11. Взаємозв'язок дефектів і матеріальних збитків

Діаграму Парето слід будувати залежно від конкретного завдання. Якщо, наприклад, уся дефектна продукція одного типорозміру, то по вертикалі краще відкладати відсоток дефектних виробів. Якщо ж до аналізу входить кілька типів виробів, то по вертикалі слід відкладати збитки від дефектних виробів у відсотковому або грошовому вираженні. Інакше півсотні дешевих дрібних гайок набуває більшого значення, ніж одна складна дорога деталь. Якщо в цеху виготовляють велику кількість типорозмірів деталей, то по горизонталі відкладають типорозміри деталей, усередині них - види дефектів. Може виявитися, що на один типорозмір припадає дуже велика частина всього збитку від браку.

Діаграму Парето доцільно застосовувати разом із причинно-наслідковою діаграмою. З її допомогою можна оцінити ефективність вжитих заходів щодо поліпшення якості продукції, побудувавши її до і після внесення змін. Застосувавши метод «розшарування», можна побудувати діаграми за окремими машинами, змінами, бригадами, робітниками тощо.

Діаграми Парето доцільно будувати і для аналізу широкого кола проблем у будь-якій сфері діяльності фірми: у фінансовій сфері, у сфері

збуту, у сфері матеріально-технічного забезпечення, у сфері виробництва, у сфері діловодства тощо.

5.2.6. Діаграма Ісікави

Діаграма Ісікави (Каору Ісікава – видатний японський фахівець в галузі менеджменту якості), вона ж «риб'яча кістка» або «діаграма причинно-наслідкових зв'язків», допомагає візуалізувати й розділити за категоріями потенційні причини виникнення проблеми та визначити головну. Тривалий час її використовували для виявлення причин дефектів і відхилень у промисловості та зрештою вона стала популярним інструментом управління якістю [115].

Можливі причини виникнення дефектів диференційовано поділяються за своїм впливом на основні причини: сировина і матеріали, напівфабрикати, організація та умови праці, обладнання, технологія. Кожна з цих основних причин може бути, своєю чергою, поділена на детальніші причини, які відповідно можуть розбиватися на ще дрібніші (див. рис. 5.12).

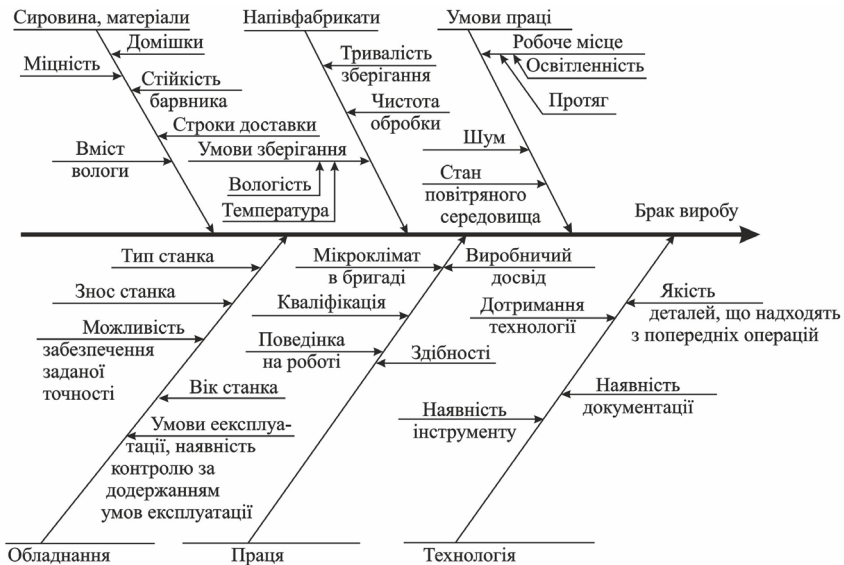


Рис. 5.12. Побудова діаграми Ісікави

Діаграму Ісікави зазвичай використовують під час побудови програми управління якістю, структурування бізнес-процесів компанії, виявлення та усунення виробничих дефектів, збоїв у роботі; з'ясування проблем у просуванні та продажах, причин зривів замовлень; мінімізація ризиків під час бізнес-планування, запуску нових проєктів або продуктів.

Переваги діаграми Ісікава:

- допомагає зосередитися на змісті проблеми;
- є гарною основою для дискусії з різноманітних причин проблеми;
- дає змогу групувати причини в самостійні категорії;
- зосереджує на пошук причин, а не ознак;
- добре застосовна при груповому обговоренні, створює результат колективного знання, легко освоюється і застосовується.

До недоліків цього інструменту якості можна віднести складність правильного визначення взаємозв'язку досліджуваної проблеми та причин у разі, якщо досліджувана проблема є комплексною, тобто є складовою частиною більш складнішої проблеми.

Для складання причинно-наслідкової діаграми необхідно підібрати максимальну кількість чинників, що мають відношення до характеристики, яка вийшла за межі допустимих значень. При цьому для дослідження причин явища необхідно залучати і третіх осіб, які не мають безпосереднього відношення до роботи, оскільки в них може виявитися несподіваний підхід до виявлення й аналізу причин, якого можуть не помітити особи, звичні до цієї роботи.

Найефективнішим вважається груповий метод аналізу причин, так званий «мозковий штурм».

Як правило, застосовується такий порядок складання причинно-наслідкової діаграми:

1. Вибирається проблема для вирішення – пряма горизонтальна стрілка.
2. Виявляють найсуттєвіші чинники та умови, що впливають на проблему (причини першого порядку) – похилі великі стрілки.

3. Виявляють сукупність причин, що впливають на суттєві фактори та умови (причини другого, третього і наступних порядків) – похилі маленькі стрілки.

4. Аналізується діаграма: розставляють чинники й умови за значущістю, встановлюють ті причини, які наразі піддаються коригуванню.

5. Складається план подальших дій.

Під час обговорення виокремлюють найсуттєвіші чинники. Ті з них, ступінь важливості яких можна виразити кількісно, аналізуються за допомогою діаграми Парето.

Складна причинно-наслідкова діаграма аналізується за допомогою розширування за окремими факторами, такими як матеріали, виконавці, час виконання операцій тощо. При виявленій помітній різниці в розкиді між «шарами» вживають відповідних заходів для ліквідації цієї різниці та усунення причини її появи.

Причинно-наслідкова діаграма, як метод розв'язання проблем, що виникають, використовується не тільки у виробничій сфері, а й для залучення нових клієнтів, для оцінки конфліктів між підрозділами підприємства, для контролю складських операцій тощо.

5.2.7. Контрольна карта

Контрольна карта (карта Шухарта) являє собою візуальний інструмент контролю за технологічним, діловим або іншим процесом для виявлення та аналізу його відхилень. Метод був запропонований американським ученим і консультантом у галузі управління Волтером Шухартом [118].

Контрольна карта являє собою графік, на який наносять кількісні або альтернативні дані. Метою побудови карти є виявлення точок виходу процесу зі стабільного стану для подальшого встановлення причин відхилення, що з'явилося, та їх усунення.

Завданнями контрольної карти є: визначити межі системної варіативності процесу, спрогнозувати поведінку процесу в найближчому майбутньому на основі минулих даних про процес.

Оскільки якість продукції, що виготовляється, залежить від якості технологічного процесу, то за якістю першої можна судити про якість

останнього. Висновок про якість технологічного процесу роблять за результатами вибіркового контролю параметрів виробленої продукції.

Для того, щоб вчасно виявити порушення під час процесу, необхідно періодично брати проби (вибірки), здійснювати вимірювання їхніх параметрів і залежно від результатів вимірювань або продовжувати процес (якщо відхилень не виявлено), або (якщо виявлено відхилення) зупинити його і здійснити налагодження (коригування).

Дані вимірювань заносять до контрольної карти і за розташуванням даних у контрольній карті роблять висновок про якість технологічного процесу, а саме – вихід контрольованої статистичної характеристики вимірюваного параметра за межу регулювання є сигналом про налагодження цього технологічного процесу.

Метод контрольних карт ґрунтується на теорії ймовірностей і математичної статистики. При цьому виходять із таких основних положень [120]:

1. У процесі виробництва будь-яких виробів неможливо отримати всю продукцію тотожної якості. Зміна параметрів продукції, що коливається в певних межах, називається розсіюванням (розподілом) параметрів і відображає закономірності даного технологічного процесу. Розсіювання параметрів спричиняється комплексом випадкових і систематичних причин, які діють у процесі виробництва і визначають похибки даного технологічного процесу.

Як показує практика, більшість технічних параметрів розподіляється за законом нормального розподілу Гауса (розміри, об'єми, температура, твердість, маса та інші). Може бути і рівномірний розподіл. Рідше зустрічається розподіл за законом Максвелла, який відображає односторонній розподіл параметрів (биття, дисбаланс, неперпендикулярність та інші).

2. Група предметів, об'єднаних якоюсь спільною якісною або кількісною ознакою, називається статистичною сукупністю. Предмети, що її утворюють, називаються членами сукупності, число членів утворює обсяг сукупності.

Частина членів статистичної сукупності, відібрана з неї для отримання відомостей про всю сукупність, називається вибірковою сукупністю

(вибіркою). Число членів вибірки утворює її обсяг. Розрізняють вибірки: малі (<25) і великі (>25).

3 На підставі закону великих чисел можна стверджувати, що якщо генеральна (статистична) сукупність підкоряється певному закону розсіювання, то і вибірка за достатнього її обсягу підкоряється тому самому закону, і навпаки.

Як відомо, основними статистичними характеристиками нормального розподілу є: середнє значення розподілу ($\bar{X}$) і стандартне (середньоквадратичне) відхилення (σ).

Беручи вибірку зі статистичної сукупності та обчислюючи її статистичні характеристики $\bar{X}$ і σ , вважаємо, що вони є оцінками характеристик усієї сукупності, тобто $\bar{X} \approx \bar{X}_0$ і $\sigma \approx \sigma_0$.

Графік нормального розподілу (рис. 5.13) відображає зміну частоти потрапляння вимірюваної величини у відповідний інтервал значень. Його будують на підставі відповідної гістограми.

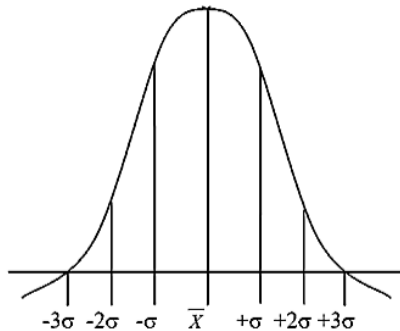


Рис. 5.13. Графік нормального розподілу

Частота потрапляння вимірюваної величини у відповідний діапазон розподілу вказана в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Частота потрапляння вимірюваної величини в діапазон розподілу

Діапазон розподілу	Частота потрапляння в діапазон, %	Частота потрапляння за межі діапазону, %
$X \pm 1\sigma$	68,26	31,74
$X \pm 2\sigma$	95,44	4,56
$X \pm 3\sigma$	99,73	0,27
$X \pm 3\sigma$	99,994	0,006

Як видно з таблиці, імовірність того, що дані вийдуть за межу діапазону потрібного стандартного відхилення, становить 0,27 %. Це означає, що у випадку, коли винайдене значення параметра виробу відрізняється від середнього значення не більше ніж на $\pm 3\sigma$, якщо навіть усі вироби у вибірці з партії виявилися придатними, у партії близько 0,3 % виробів можуть виявитися бракованими.

Таким чином, для забезпечення якості при вибірковій перевірці, стабільність процесу має бути такою, щоб розкид параметрів виробів утримувався в межах 4...5-кратного стандартного відхилення в один і в інший бік від стандартної норми параметра (від його номінального значення).

4. Придатними є всі вироби, у яких контрольований параметр X відхиляється від його номінального значення $X_{\text{ном.}}$ не більше ніж на величину допуску Δ^+ , Δ^- . Порівнюючи практичну зону розсіювання ($\pm 3\sigma$) з полем допуску (δ) на заданий параметр, визначають можливий брак (рис. 5.14).

На рис.5.14 T_V і T_H – верхнє (максимальне) і нижнє (мінімальне) допустимі значення контрольованого параметра, що визначаються його верхнім (Δ^+) і нижнім (Δ^-) допустимими відхиленнями від номінального значення.

У загальному випадку наявність браку зумовлюється не тільки співвідношенням ширини поля допуску і діапазону розсіювання, а й величиною зсуву середнього значення розподілу щодо середнього допустимого $X_{\text{доп.}}$

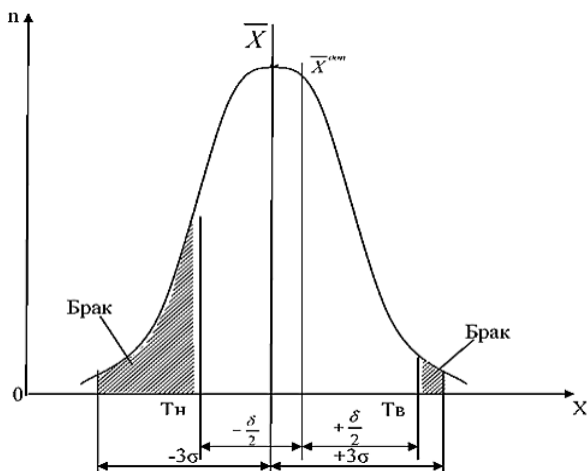


Рис. 5.14. Графік можливого браку

Брак може з'явитися в трьох випадках:

- практична зона розсіювання більша за поле допуску на досліджуваний параметр. Це означає, що точність процесу низька і не забезпечує заданої точності параметра;
- практична зона розсіювання менша за поле допуску, але є значний зсув середини зони розсіювання щодо середини поля допуску. Це вказує на зміщення центру налаштування обладнання;
- мають місце обидві причини.

Під час побудови контрольних карт необхідно визначити:

- контрольні межі для статистичних характеристик вимірюваної величини, що характеризують межі регулювання технологічного процесу;
- періодичність відбору вибірок або проб;
- обсяг вибірки або проби;
- заходи, яких необхідно вжити в разі попереджувального сигналу і сигналу про налагодження процесу.

Контрольні межі (контрольні нормативи) визначають на основі збирання та статистичного опрацювання даних, що характеризують нормальний стан процесу.

Часто в основу визначення значень регульованої характеристики, за яких настає розладка, беруть економічні міркування.

У цьому разі вихідними даними для розрахунку меж регулювання та обсягу вибірки є значення вищевказаних статистичних характеристик, а також значення ризику зайвого налагодження і ризику непоміченої розладки.

Ризиком зайвого налагодження називається ймовірність того, що за статистичною оцінкою параметрів технологічного процесу буде ухвалено рішення провести чергове налаштування, коли в ньому немає потреби.

Ризиком непоміченої розладки називається ймовірність того, що за статистичною оцінкою параметрів технологічного процесу буде ухвалено рішення не робити налаштування, коли воно насправді необхідне.

Обидва ризики встановлюються економічними розрахунками або угодою відділу – розробника технологічного процесу з ВТК на основі практичного досвіду.

Період відбору вибірок або проб встановлюється на підставі розподілу часу розладки процесу в попередніх періодах.

Обсяг вибірки або проби визначають за нормативними таблицями залежно від обсягу контрольованої партії, статистичних характеристик технологічного процесу, необхідної ймовірності виявлення браку і прийнятої періодичності відбору проб.

Методи статистичного регулювання технологічних процесів із застосуванням різних контрольних карт стандартизовано в державних і міжнародних стандартах *ISO*.

У виробничій практиці використовують різні види контрольних карт, що відрізняються характером даних, які використовують. Найбільш широко застосовуваними є такі їх види:

- карта середніх арифметичних і розмахів, $(\bar{X}-R)$ -карта;
- карта медіан і крайніх значень, $(M-X)$ -карта;
- карта контролю за альтернативною ознакою (P -карта);
- карта числа дефектів (C -карта).

На контрольну карту наносять значення малих вибірок досліджуваної характеристики процесу, виміряних у порядку його протікання. Карти Шухарта мають центральну лінію, найчастіше це середнє арифметичне значення показника процесу. По обидва боки від неї на відстані 3σ

відкладають верхню і нижню контрольні межі, де σ – їхнє середнє квадратичне відхилення (рис. 5.15).

У цих межах має перебувати 99,73 % усіх значень за нормального розподілу значень характеристик процесу. Імовірність того, що точка на карті опиниться за межами контрольних меж, за стабільного стану процесу, дорівнює приблизно 0,003.

Крім того, часто відзначають ще «попереджувальні» межі на відстані $\pm 2\sigma$, які сигналізують про наближення значення процесу до верхньої або нижньої межі.

Використання контрольних карт допомагає відстежувати зміну процесу в реальному часі та забезпечувати стабільність його роботи.

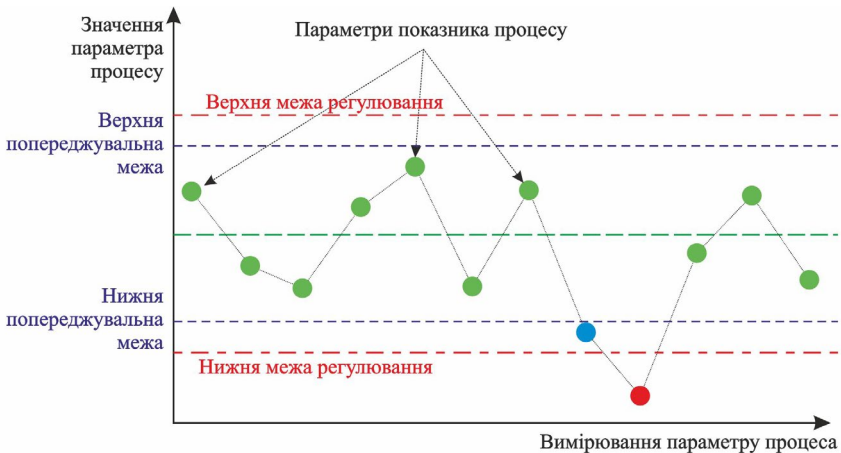


Рис. 5.15. Спрощена форма контрольної карти

У разі, коли значення потрапляють на контрольні межі або за їхні межі, вважається, що процес вийшов зі стабільного стану.

Для управління процесами розроблено і застосовують різні форми контрольних карт. Наприклад, існують контрольні карти – середніх значень, медіан, середніх квадратичних відхилень, розмахів, кількості дефектних одиниць продукції, часток дефектних одиниць продукції, кількості дефектів, кількості дефектів на одиницю продукції тощо. Їх вибір залежить від цілей

управління і виду контрольованих даних (кількісна ознака або альтернативна ознака). Якщо необхідно визначати фактичні значення контрольованого параметра, то такий вид контролю називається контролем за кількісною ознакою. Якщо немає необхідності знати фактичне значення контрольованого параметра, а просто достатньо встановити відповідність або невідповідність цього параметра встановленим вимогам, то такий вид контролю називається контролем за альтернативною ознакою. Виходячи з цих умов обираються відповідні контрольні карти.

Незважаючи на те, що існують різні види контрольних карт, порядок їхньої побудови один і той самий:

1. Визначаються показники процесу або продукції, які необхідно вимірювати. Показники можуть мати кількісні або якісні значення.

2. Визначаються точки контролю показника. За можливості, точки контролю необхідно встановлювати на найбільш ранній стадії процесу, де обраний показник може бути вимірний.

3. На підставі виду контрольованих показників (контроль за кількісною або альтернативною ознакою) обирається відповідна форма контрольної карти.

4. Коли застосовується контроль за кількісною або альтернативною ознакою, частина послідовних у часі вимірювань (3...5) може мати близькі значення. Ці вимірювання формуються в підгрупу. Кількість вимірювань, що увійшли до підгрупи, називається розміром підгрупи. У цьому разі необхідно встановити розмір підгрупи.

5. Проводяться вимірювання обраного показника процесу або продукту.

6. На контрольній карті відображаються результати вимірювань (для контролю за кількісною ознакою) або сумарні (комплексні) значення (для контролю за альтернативною ознакою) показників.

7. Точки графіка з'єднуються між собою.

8. Розраховується лінія середніх значень, і обчислюються контрольні межі. Залежно від того, які контрольні карти застосовуються, формули розрахунку контрольних меж та їхня кількість може змінюватись (наприклад, для карти розмаху достатньо розрахувати тільки верхню контрольну межу).

9. Лінія середніх значень і контрольні межі відображаються на контрольній карті.

10. Визначаються всі точки, що виходять за межі контрольних меж.

11. Проводиться аналіз причин виходу значень контрольованих показників за межі контрольних меж і напряду зміщення підгруп щодо лінії середніх значень. За необхідності вживаються коригувальні дії.

Для того щоб контрольна карта була ефективним засобом управління процесом, збирання результатів вимірювань контрольованих показників та їхня реєстрація в контрольній карті мають здійснюватися в режимі реального часу.

Під час керування еталонним процесом служить довгострокове значення характеристики, встановлене в технічних умовах, чи її номінальне значення, що базується на попередній інформації про процес, або намічене цільове значення характеристики продукції чи послуги.

5.3. Проміжні (спеціальні) методи статистичного аналізу

Найпоширенішими проміжними методами статистичного аналізу точності технологічних процесів є: порівняння середніх значень параметрів із номінальними; порівняння дисперсій; оцінка коефіцієнтів кореляції; регресійний аналіз тощо.

З огляду на те, що значна частина методів контролю - руйнівні або вони непорівнянні за вартістю з ціною продукції, у більшості випадків робити суцільний контроль не є можливим. На етапі визначення кількості контрольованих виробів, тобто вибірки, і методу їхнього відбору, використовуються методи математичної статистики та теорії ймовірностей. Коли рішення про придатність або непридатність партії продукції ухвалюють на основі вибірки невеликої кількості одиниць, обов'язковою умовою є те, що така вибірка має бути репрезентативною (представницькою), а відповідь на запитання щодо репрезентативності вибірки може дати тільки теорія ймовірності [116].

Найпоширенішими є біноміальна та гіпергеометрична ймовірнісні моделі.

У біноміальній моделі (рис.5.16) вважається, що ймовірність присутності дефектної одиниці однакова за будь-якого методу вибірки

однакової кількості одиниць. Тобто якщо береться поспіль n штук на початку партії, наприкінці партії або вроздріб, жодного впливу на відсоток бракованих виробів у вибірці не виявляється. Найвідомішим випадком біноміальної моделі є нормальний розподіл.

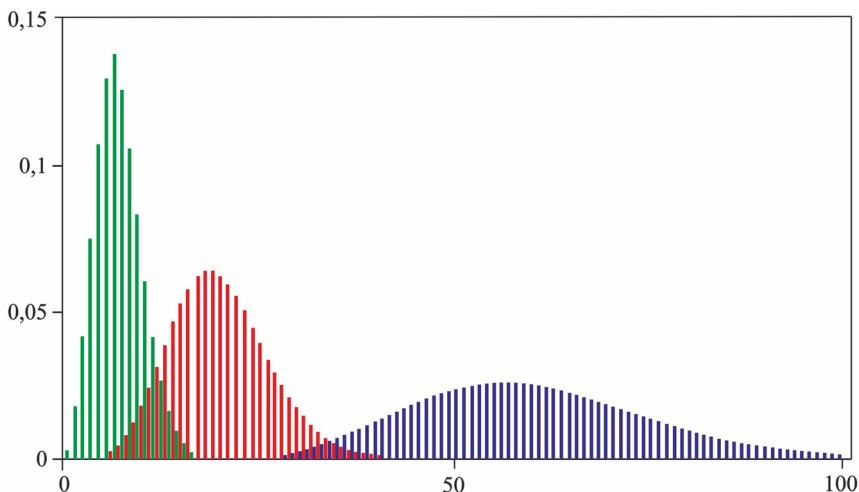


Рис. 5.16. Біноміальний розподіл

У гіпергеометричній моделі (рис. 5.17) вважається, що ймовірність присутності дефектної одиниці залежить від методу вибірки, а випадковість проявляється тільки під час складання вибірки. Інакше, якщо ми візьмемо перші n штук виробів із партії, то за біноміальною моделлю ця вибірка є репрезентативною, а за гіпергеометричною – не є.

Незважаючи на принципові відмінності у філософії визначення ймовірності дефектності, доведено, що біноміальна і гіпергеометрична моделі дуже близькі, коли обсяг генеральної сукупності (партії) принаймні в 10 разів перевищує обсяг вибірки.

Статистичний контроль якості та технологічних процесів здійснюється на підставі плану статистичного контролю, який за своєю суттю є алгоритмом дій з вибірки, аналізу та ухвалення рішення про приймання і забракування партії продукції. При цьому, на вході ми маємо партію

(генеральну сукупність), а результатом буде або рішення «прийняти», або рішення «забракувати».

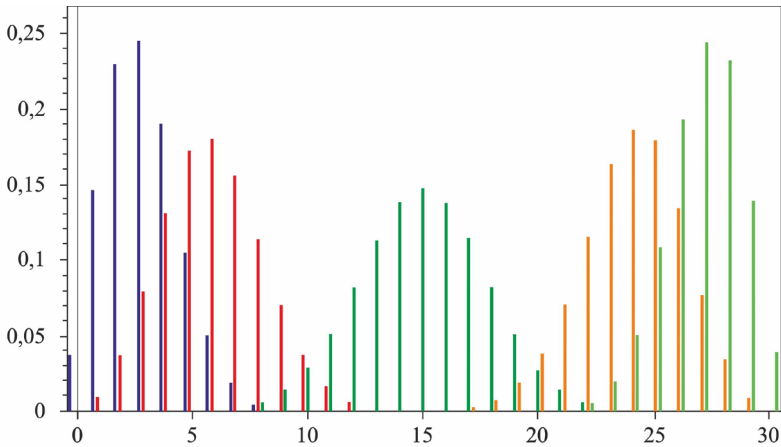


Рис. 5.17. Гіпергеометричний розподіл

Плани контролю бувають як одноступеневі, так і багаступеневі.

Одноступеневий план контролю (n, x) означає, що під час вибірки n одиниць із партії допускається не більше x дефектних. Число x називають приймальним.

Двоступеневий план контролю $(n, x, d) + (m, c)$ означає, що за вибірки n одиниць є два рівні кількості дефектних: x – за кількості бракованих, меншої за яку, партію приймають, і d – за кількості, за якої беруть повторну вибірку об'ємом m і приймальним числом c .

Основна властивість плану контролю – оперативна характеристика. Вона відображає ризики забракування відповідної партії (або ризик постачальника) і ризики прийняття невідповідної партії (або ризик споживача).

Одним із механізмів спрощення контролю є усічені плани статистичного контролю. Усічений план – такий план контролю, при виконанні якого контроль можна припинити, коли результат стає відомий раніше, ніж відбудеться перевірка всієї контрольної вибірки. Наприклад:

якщо є план контролю (60,2) і одразу трапилися три браковані вироби, перевіряти решту немає сенсу, оскільки вже зрозуміло, що партію слід бракувати.

5.3.1. Метод порівняння середніх значень параметрів із номінальними

Цей метод використовують у тих випадках, коли необхідно встановити відповідність виготовлюваного виробу еталону, і в інших випадках під час порівняння значень однойменних показників якості в кількох груп виробів. Основними інструментами методу є: дисперсія (характеризує мінливість показників якості, їхнє розсіювання залежно від способу оброблення або інших чинників), коефіцієнт кореляції (використовується під час оцінювання ступеня залежності показників якості від інших показників) та регресійний аналіз, який використовують у випадках оцінювання показника якості за результатами спостережень за іншими показниками.

Статистичне регулювання технологічного процесу являє собою коригування значень параметрів технологічного процесу за результатами вибіркового контролю параметрів продукції, що випускається, з метою забезпечення необхідного рівня якості. У процесі статистичного регулювання технологічного процесу періодично перевіряють невелику кількість (5...10 одиниць) продукції, що виготовляється, на конкретній операції, розраховують відповідний до розподілу статистичний параметр якості та зіставляють із його номінальним значенням. Цей контроль забезпечує безперервне спостереження за стабільністю операції, однорідністю якості, що дає змогу вчасно сигналізувати про відхилення, які наступають, і тим самим попереджати виникнення дефектів та браку, забезпечуючи заданий рівень якості.

Розподіл будь-якого якісного параметра можна представити у вигляді кривої нормального розподілу, підпорядкованої закону нормального розподілу випадкових величин і кривої Гаусса, що визначається рівнянням

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.3)$$

де $f(x)$ – щільність імовірностей або частота появи випадкової змінної;

x – значення випадкової змінної;

μ – центр розподілу (математичне очікування), за якого значення $f(x)$ найбільше;

σ – середнє квадратичне відхилення випадкової змінної x ;

e – основа натурального логарифма.

Параметри μ і σ характеризують відповідно центр і масштаб розподілу. З рис. 5.18 випливає, що параметр μ не діє на форму кривої $f(x)$ – його зміна спричиняє лише зміщення кривої вздовж осі x . Але при зміні σ форма кривої змінюється (рис. 5.19). Максимум функції густини нормального розподілу досягається при $x=\mu$ і дорівнює $1/\sigma\sqrt{2\pi}$

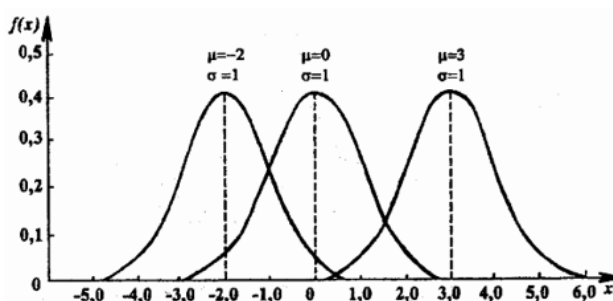


Рис. 5.18. Нормальний розподіл із різними значеннями μ і однаковими значеннями σ

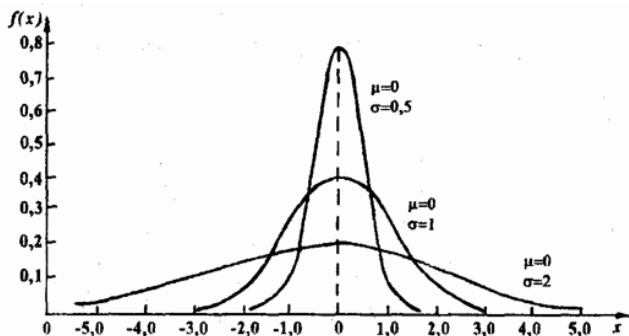


Рис.5.19. Нормальний розподіл із різними значеннями σ та однаковими значеннями μ

Найважливіші статистичні характеристики закону нормального розподілу:

1. Середнє арифметичне значення якісної ознаки, що характеризує точність процесу. Через обмеженість обсягу вибірок під час контролю, а отже, обмеженість кількості даних про досліджувану ознаку якості отримуємо за цими даними лише оцінки (наближені значення) параметрів μ і σ нормального розподілу, які надалі позначаємо x' і S , відповідно.

$$x' = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad (5.4)$$

де x_i – вимір контролюваного параметра i -того виробу у вибірці;

n – кількість одиниць виробів у вибірці (число вимірів).

2. Середньоквадратичне відхилення випадкової величини (значення якісного параметра), що характеризує величину поля фактичного розсіювання розмірів контролюваного параметра. Оцінка середнього квадратичного відхилення випадкової величини (значення якісного параметра), що характеризує величину поля фактичного розсіювання розмірів контролюваного параметра, визначається за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (x_{\max} - x_{\min})^2}, \quad (5.5)$$

Таким чином, процедури оцінювання і контролю показників якості використовуються для визначення наближеного значення невідомого параметра генеральної сукупності за результатами спостереження цих показників і перевірки відповідності отриманих під час контролю результатів установленим вимогам. У першому випадку – це статистичні оцінки характеристик положення центру розподілу результатів (наприклад, середнє арифметичне значення та ін.), характеристик ступеня розсіювання результатів (середнє квадратичне відхилення S , дисперсія δ (S^2), розмах R та ін.). У другому випадку - це статистичні висновки за результатами контролю виду «відповідає» – «не відповідає». Нерідко, під час контролю проводять аналіз даних і результатів, перевіряють різні статистичні гіпотези, оцінюють якість статистичних оцінок.

3. Розмах розсіювання якісної характеристики R , який являє собою різницю між найбільшими і найменшими фактичними розмірами:

$$R = x_{\max} - x_{\min}, \quad (5.6)$$

Між оцінкою середнього квадратичного відхилення S_i розмахом R встановлено таку залежність:

$$S = R_n / d_n, \quad (5.7)$$

де R_n – розмах за обсягу вибірки n ;

d_n – коефіцієнт, що залежить від обсягу вибірки n .

Числовим методом оцінки того, чи належить дана вибірка до генеральної сукупності з нормальним розподілом, є метод, розроблений К.Пірсоном, що ґрунтується на застосуванні критерію χ^2 . Згідно з цим методом, спостережуваний емпіричний розподіл вибірки, виражений частотами згрупованої низки вимірювань, порівнюють із гіпотетичним теоретичним розподілом відповідної генеральної сукупності. Сумарне значення для критерію Пірсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{L'} \chi_i^2, \quad (5.8)$$

де L' – кількість інтервалів.

У тих випадках, коли у вибірці відносно невелика кількість спостережень ($n < 50$) і дані не згруповані за інтервалами, перевірка гіпотези про нормальність розподілу здійснюється за так званим d -критерієм. Для цього слід обчислити розрахункове значення:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x'|}{n \cdot S}, \quad (5.9)$$

де x_i – результати спостережень цієї групи;

n – кількість спостережень у групі;

x' – середнє арифметичне;

S – середньоквадратичне відхилення.

Після визначення розрахункового значення d -критерію, необхідно його зіставити з відповідними критичними табличними значеннями, які обирають залежно від числа паралельних спостережень. Якщо розрахункове

значення виявляться між відповідними табличними значеннями, вважається, що результати спостережень розподілені за нормальним законом.

Результати контролю (розрахунків наведених характеристик) зображуються графічно на карті статистичного контролю. Виходячи з отриманих параметрів здійснюється управління процесом і ухвалюються рішення про якість продукції, випущеної за період між двома вибірками.

5.3.2. Статистичний приймальний контроль виробів

Статистичний приймальний контроль використовується як вибірковий метод під час приймання великих партій продукції, сировини, матеріалів, напівфабрикатів. Він заснований на застосуванні методів математичної статистики для перевірки відповідності якості продукції встановленим вимогам. За якістю вибірки, узятої на контроль, судять із достатньою достовірністю про якість усієї партії.

На відміну від статистичного регулювання технологічних процесів, де за результатами контролю вибірки ухвалюють рішення про стан процесу (налагоджений чи розлагоджений), під час статистичного приймального контролю за результатами контролю вибірки ухвалюють рішення – прийняти чи відхилити партію продукції. Тому статистичний приймальний контроль застосовується під час вхідного контролю матеріалів, сировини і комплектувальних виробів, контролю закупівель, під час операційного контролю, під час контролю готової продукції.

Статистичний приймальний контроль може бути одноступеневим, двоступеневим, багаступеневим і послідовним.

У разі **одноступеневого** контролю рішення про контрольовану партію продукції ухвалюють на підставі перевірки тільки однієї вибірки або проби. Це найпростіший вид контролю.

а одноступеневого плану вибіркового контролю за альтернативною ознакою з контрольованої партії продукції беруть вибірку об'ємом n , визначають загальну кількість невідповідних (дефектних) виробів у вибірці та партію приймають тільки тоді, коли вона не перевищує заданого значення, що називається приймальним числом.



Рис. 5.20. Схема одноступеневого плану вибіркового контролю

У разі **двоступеневого** контролю рішення про контрольовану партію продукції ухвалюють за результатами перевірки не більше ніж двох вибірок або проб, причому відбір другої вибірки або проби залежить від результатів контролю першої вибірки або проби.

Тобто спочатку для перевірки відбирають невелику кількість зразків, і якщо дефектів під час їхньої перевірки виявиться дуже багато, партію відхиляють, якщо мало – приймають. Коли кількість виявлених дефектів виявляється недостатньо переконливою, перевіряють зразки другої вибірки, і відповідне рішення приймають за сумою результатів обох перевірок.

Перевага двоступеневого контролю полягає в тому, що в середньому він вимагає за інших однакових умов на 20...30 % менше виробів для перевірки, ніж за одноступеневого контролю. Однак двоступеневий контроль вимагає більш високої кваліфікації контролерів і організаційно складніший.

У разі застосування двоступеневого плану контролю з партії обсягом N беруть спочатку вибірку обсягом n_1 .

Якщо у вибірці кількість невідповідних виробів менша за приймальне число або дорівнює йому, то партію приймають, а якщо більша за браковане число або їхня кількість дорівнює йому – бракують. Якщо ж число невідповідних виробів перебуває в межах між приймальним і бракувальним числами, то беруть другу вибірку об'ємом n_2 .

Партію приймають, якщо загальне число невідповідних виробів в обох вибірках менше за друге приймальне число або дорівнює йому, і бракують, якщо більше за бракувальне число або дорівнює йому.

Іноді замість двоступеневого контролю застосовується багатоступеневий або його різновид – послідовний контроль. Розрізняють поштунний і множинний послідовний контроль.

У разі **багатоступеневого** і **послідовного** контролю рішення про контрольовану партію продукції ухвалюють за результатами перевірки низки послідовних вибірок, причому в разі багатоступеневого контролю максимальне число вибірок обмежене, а в разі послідовного – ні. В обох випадках відбір наступної вибірки або проби залежить від результатів перевірки попередньої вибірки або проби.

При послідовному контролі в середньому потрібна за інших рівних умов мінімальна кількість виробів для перевірки. Слід зазначити, що середня кількість виробів, що перевіряються, зі зростанням кількості ступенів убуває, однак, організаційні труднощі впровадження багатоступеневого контролю, як правило, не компенсуються економією від скорочення середньої кількості виробів, що перевіряються. З цієї причини багатоступеневий контроль у практиці застосовується рідко. Послідовний контроль набув поширення в практиці ресурсних випробувань на надійність, де за умовами їх проведення дуже важливим є скорочення обсягу вибірок.

У стандартах на готову продукцію, технічних умовах, технічній документації, договорах на поставку та інших НТД у разі застосування статистичного приймального контролю мають зазначатися плани контролю з обов'язковим посиланням на відповідний державний стандарт з методів статистичного приймального контролю. При цьому мають бути встановлені

ризик споживача і ризик постачальника, приймальне і бракувальне значення рівня дефектності.

При поштучному контролі рішення про якість партії приймається після вилучення кожного виробу, тобто обсяг вибірки становить один виріб. Особливість поштучного послідовного контролю полягає в тому, що цей вид контролю має мінімальний середній обсяг вибірки порівняно з однотипними планами одно-, багатоступінчастого або множинного послідовного контролю.

У разі послідовного контролю кількість вибірок - випадкова величина, що набуває значень чисел натурального ряду від одного до якого завгодно великого числа, тобто верхня межа кількості вибірок не встановлюється. За послідовного контролю останньої вибірки немає, і для всіх вибірок імовірність продовження контролю відмінна від нуля.

Нині в різних країнах світу розроблено стандартні плани статистичного приймального контролю за альтернативною ознакою, які успішно застосовуються під час контролю якості найрізноманітнішої продукції. Серед них можна виділити такі найпоширеніші види планів, як план контролю 10 %-вої вибірки, плани Доджа-Роміга тощо.

План контролю 10%-вої вибірки полягає в такому: оглядається 10 % виробів. Якщо дефектів не виявлено, то всю продукцію приймають, якщо знайдено один дефект (або більше), то партію бракують.

Плани статистичного приймального контролю Доджа-Роміга спрямовані на збереження якості партій виробів. Ці плани були розроблені таким чином, що якщо якість виробів певною мірою низька, то партія майже напевно буде забракована. Можна сказати, що плани контролю Доджа-Роміга найбільш популярні. Вони засновані на тому, що межа середнього вихідного рівня дефектності не має бути більшою за задану величину.

Переваги приймального статистичного контролю полягають у скороченні трудомісткості контролю порівняно зі 100 %-вою перевіркою продукції, гарантованому забезпеченні заданої якості продукції, достовірності оцінки заданого рівня якості.

При статистичному приймальному контролі можуть бути використані два методи:

- контроль за альтернативною ознакою, коли за показник якості приймається частка браку у вибірці;

- контроль за кількісною ознакою, коли визначають статистичні характеристики розподілу вимірюваного параметра у вибірці (середнє значення $\bar{x}$ і дисперсія δ) і за отриманими значеннями оцінюють якість усієї партії виробів.

Під час контролю за альтернативною ознакою заздалегідь установлюють граничне значення якості партій (бракувальний рівень дефективності q) і ризик споживача P , за якими за допомогою спеціальних таблиць визначають обсяг вибірки n для відповідного обсягу партії та приймальний рівень дефектності C , тобто максимально допустиме число бракованих виробів у вибірці. Вирішення питання про якість партії ухвалюють за співвідношенням фактичної кількості браку у вибірці d і приймального числа C . Якщо d менше або дорівнює C , то рівень якості всієї партії відповідає заданому, і партію приймають; якщо d більше або дорівнює C , то рівень якості партії N нижчий за заданий, і партію направляють на розбраковування.

Під час приймального контролю за кількісною ознакою визначають фактичні значення вимірюваного параметра у всіх виробів у вибірці, середні арифметичні значення цих параметрів $\bar{x}$ і дисперсія δ , після чого вирішують нерівності

$$\begin{aligned}\bar{x} + K\delta &\geq A; \\ \bar{x} - K\delta &\leq A; \\ K\delta &\leq C,\end{aligned}\tag{5.10}$$

де K , A , C – коефіцієнти, які визначають за спеціальними таблицями.

Якщо всі нерівності виявляються правильними, партію приймають. В іншому разі партія йде на розбраковування. Перевагою цього методу є значно менший обсяг вибірки за тієї самої достовірності оцінки партії (обсяг вибірки скорочується в 3...10 разів), що особливо важливо під час контролю, який пов'язаний із руйнуванням виробів.

Розроблено також методи статистичного приймального контролю, де обсяг вибірки встановлюється з урахуванням результатів (відсотка) здавання продукції з першого пред'явлення.

Сутність вибіркового контролю за кількісною ознакою полягає в тому, що в одиниць продукції, які ввійшли до вибірки, вимірюють з необхідною точністю значення одного або декількох контрольованих параметрів.

Рішення про відповідність або невідповідність контрольованої партії продукції встановленим вимогам приймають залежно від отриманих значень.

Обґрунтування методів вибіркового контролю за кількісною ознакою здійснюється для випадку одночасного виконання таких умов:

- контроль проводять за одним кількісно вимірюваним показником якості виробів;
- для вимірюваного під час контролю показника якості встановлені нижнє або верхнє граничне значення показника або обидва граничних значення (межі поля допуску);
- для контрольованого показника якості та встановлених граничних значень задано критерій якості партій виробів у вигляді нормативного рівня невідповідностей або прийнятного рівня якості;
- процедуру контролю застосовують для безперервної послідовності партій дискретних виробів, що поставляються одним виробником, який використовує єдиний виробничий процес, виробництво стабільне, і значення показника якості виробів розподілено за нормальним законом розподілу;
- стандартне відхилення відоме, якщо ні, то можна використовувати його оцінку, отриману за вибірковими даними.

Таким чином, виходять із того, що розподіл значень показника якості, вимірюваного в процесі проведення вибіркового контролю, є нормальним зі змінним (заздалегідь невідомим) математичним очікуванням, постійною і відомою технологічною дисперсією. При цьому тільки математичне очікування, що характеризує рівень налаштування виробничого процесу, розглядається як змінна величина.

Статистичний приймальний контроль за кількісною ознакою має низку переваг порівняно з контролем за альтернативною ознакою: вимагає невеликого обсягу вибірки; дає точні висновки про стабільність, перешкоди і зміщення рівня налаштування процесу виготовлення виробів; дає змогу одержати точне уявлення про положення ознаки якості всередині поля допуску.

Недоліки: для цього контролю потрібне складне устаткування; необхідні висококваліфіковані фахівці, що підвищує вартість і знижує ефективність контролю; розроблення планів може вимагати значних витрат праці; застосовний тільки для одного контрольованого параметра; можливо,

що партію забракують, навіть якщо жоден із результатів вимірювання у вибірці не лежить поза межами допуску на виготовлення.

Існують також плани статистичного приймального контролю за кількісною ознакою, серед яких можна виділити плани, що ґрунтуються на визначенні середнього арифметичного за відомого середнього квадратичного відхилення, на рівні дефектності за невідомого середнього квадратичного відхилення.

Плани статистичного контролю за кількісною ознакою припускають нормальний розподіл контрольованого параметра. У разі невиконання цієї умови їх можна застосовувати тільки після оцінки одержуваної похибки. За планом контролю, що ґрунтується на визначенні середнього арифметичного за відомого середнього квадратичного відхилення, майже завжди прийматимуть партії з великим середнім арифметичним, а бракуватимуть найчастіше з малим. Такий план ґрунтується на визначенні обсягу вибірки n і приймального критерію K , який відповідає мінімальному середньому значенню. Якщо середнє значення параметра дорівнює або більше K , то партію приймають, якщо менше K , то бракують. Таким чином, завдання полягає в тому, щоб визначити n і K . Плани контролю, що ґрунтуються на рівні дефектності, забезпечують приймання таких партій, рівень дефектності яких виявляється нижчим за деяку заздалегідь установлену величину. Виріб вважається дефектним, якщо результат вимірювання: менший за нижнє допустиме значення і більший за верхнє допустиме значення

Однією з базових основ статистичного контролю якості продукції є метод вибірових обстежень.

5.3.3. Статистична компенсація геометричних відхилень у серійному виробництві

Цей метод в принципі можна застосувати до всіх виробничих процесів, але він особливо корисний для процесів, які можна адаптувати без дорогої адаптації інструменту, лише змінивши числове програмне керування процесом. Такими процесами є, наприклад, адитивні процеси, такі як процес лазерно-порошкового плавлення (LPBF).

Процеси лазерно-порошкового плавлення в останні роки систематично розробляються для дрібносерійного та середньосерійного

виробництва [109]. Важливим питанням для цього розвитку є стабільність процесу та управління геометричними відхиленнями через, наприклад, високі температурні градієнти під час виробництва [110], відхилення від партії до партії та інші залежні від часу впливи на точність розмірів заготовок.

Хартманн та ін. [111] використовували алгоритм попередньої деформації, заснований на даних вимірювань виготовлених компонентів. Кожен виробничий цикл розглядається як одна ітерація безперервної схеми управління для адаптації друкованої геометрії таким чином, щоб вироблена геометрія якнайкраще відповідала бажаній геометрії і тим самим мінімізувала критерій якості.

$$m_{i+1} = m_i - \alpha_{i+1} w_i, \quad (5.11)$$

де m – вектор, що описує попередню деформацію виготовленої геометрії, яка додається до цільової геометрії. Ця попередня деформація вимірюється в нормальному напрямку для кожного вузла. w_i – вектор відхилення геометрії виготовленої заготовки, яка є виготовленим зразком завдання номер i , від цільової геометрії. α_{i+1} – постійний коефіцієнт для глобальної нежорсткої попередньої деформації.

Для розрахунку w_i потрібна оптично визначена сітка поверхні виготовленої геометрії, яка припасовується до цільової геометрії за допомогою ітераційного алгоритму найближчої точки. Для кожного вузла цільової геометрії визначається відстань до виготовленої геометрії, яка використовується як вузлове відхилення w_i . Від ітерації до ітерації попередня деформація m_{i+1} обчислюється шляхом віднімання поточного відхилення від попередньої деформації останньої ітерації m_i .

Однак така безперервна адаптація виробленої геометрії може призвести до нестабільності, якщо вона виконується багато разів у серійному виробництві.

Для безперервної геометричної компенсації у великосерійному виробництві важливо розрізняти детерміновані відхилення та випадкові відхилення, оскільки відхилення, які впливають на геометрію заготовки від одного виробничого циклу до іншого, не можуть бути успішно компенсовані за допомогою попередньої деформації. Статистичні міркування Лехнера та ін. показують, що компенсація випадкового розсіювання у виготовленій геометрії шляхом попередньої деформації цільової геометрії призводить до

збільшення розсіювання для серійного виробництва [112]. Це можна кількісно оцінити за допомогою вибірки Монте-Карло для рівняння 5.11.

Для того щоб зменшити небажану компенсацію розсіювання, яка може призвести до нестабільності схеми компенсації, в рівняння 5.11 можна ввести третій фактор p , який повинен локально відокремити розсіювання від детермінованих відхилень [4]:

$$m_{i+1} = m_i - g_{i+1} p_{i+1} \alpha_{i+1} w_i \forall \text{ nodes} \quad (5.12)$$

де p – функція, яка обчислює коефіцієнт для кожного вузла сітки i , таким чином, масштабує попередню деформацію між 0 і 1, залежно від відхилення від цілі та типового розсіювання процесу в кожному вузлі.

Для досягнення симетричної поведінки в рівнянні 5.13 використовується кумулятивна функція розподілу Гауса, адаптована для абсолютних відхилень від цілі [4]:

$$p_{stat}(w_i, \sigma_p) = \frac{1 + \operatorname{erf} |w_i|}{\sqrt{2(s\sigma_{process})^2}} - 1 \forall \text{ nodes}, \quad (5.13)$$

де $\operatorname{erf}(x)$ – функція гауссової похибки; а s – параметр, який визначає, наскільки значним має бути відхилення у порівнянні зі стандартним відхиленням процесу для кожного вузла.

Щоб обчислити p , відхилення від цілі w_{i+1} потрібно визначити аналогічно до рівняння 1, підігнавши вироблену геометрію до цільової. Для кожного вузла цільової геометрії обчислюється середньоквадратичне відхилення експериментально отриманого розсіювання процесу $\sigma_{process}$ на основі наявних вимірювань геометрії. По суті, рівняння 5.13 зважає абсолютне значення геометричного відхилення від мішені на розсіювання в цьому місці. Якщо відхилення невелике порівняно з розсіюванням, функція зменшує компенсацію. Якщо відхилення значне порівняно зі стандартним відхиленням процесу, функція сходиться до 1.

Цей метод дозволяє безперервно компенсувати детерміновані відхилення від виробленої геометрії виробів, в той час як розсіювання залишається некомпенсованим, забезпечуючи тим самим стабільність схеми компенсації.

5.4. Передові (аналітичні) статистичні методи

Передові статистичні методи включають методи планування і розрахунку експериментів, багатофакторний і дисперсійний аналіз, методи дослідження операцій та інші [119].

5.4.1. Планування експерименту і метод вибіркового обстеження.

У технічній літературі терміну експеримент встановлюється таке визначення – це система операцій, впливів і (або) спостережень, спрямованих на отримання інформації про об'єкт дослідження. Відповідно, планування експерименту – вибір плану експерименту, що задовольняє заданим вимогам, сукупність дій, спрямованих на розроблення стратегії експериментування (від отримання апріорної інформації до отримання працездатної математичної моделі або визначення оптимальних умов). Тобто це цілеспрямоване управління експериментом, що реалізується в умовах неповного знання механізму досліджуваного явища.

Основна мета планування експерименту – досягнення максимальної точності вимірювань за мінімальної кількості проведених дослідів і збереження статистичної достовірності результатів. В умовах промислового експерименту його основна мета полягає у визначенні максимальної кількості інформації про вплив досліджуваних чинників на виробничий процес за допомогою найменшої кількості дорогих спостережень [121].

Планування експерименту базується на двох теоріях математичної статистики – виборі зі скінченної сукупності та виборі з нескінченної сукупності. Відмінності в тому, що перший випадок стосується об'єктів не випадкової природи, на кшталт дефектності виробів або явищ соціології, а другий поширюється на результати випадкових процесів, наприклад, похибки вимірювань якихось параметрів.

Під час планування експерименту особливу увагу приділяють процесу формування вибірки. Вона, відповідно до теорії ймовірностей, буде правильно відображати властивості всієї сукупності, тільки якщо вибір здійснюється випадково. Тобто будь-яка вибірка повинна мати однакову ймовірність появи [122].

У практичних дослідженнях зазвичай використовують вибір без повернення (вибірка без повторення). У цьому разі кожен відібраний об'єкт

вилучається з генеральної сукупності і в подальшому процесі участі не бере. Вибір із поверненням (вибірка з повторенням) трапляється, як правило, лише в теоретичних дослідженнях.

Властивості, досліджувані вибірковими методами, поділяють на якісні та кількісні. У першому випадку завданням дослідження є визначення кількості об'єктів із певною ознакою (якістю). У разі кількісного дослідження оцінним критерієм стає вибіркове середнє.

Мінливість результатів, одержуваних вибірковими методами, оцінюється дисперсією досліджуваного параметра. Точність результатів, або їхню похибку, визначають за середньоквадратичними (стандартними) відхиленнями, які обчислюють як квадратний корінь із дисперсії.

Під час проєктування нової продукції або нових технологій особливе значення має експериментальне підтвердження виконаних розробок. Методи планування експерименту дають змогу мінімізувати кількість необхідних випробувань, установити раціональний порядок і умови проведення досліджень залежно від їхнього виду і необхідної точності результатів. Якщо ж з якихось причин кількість випробувань уже обмежена, то методи дають оцінку точності, з якою в цьому разі будуть отримані результати. Методи враховують випадковий характер розсіювання властивостей випробовуваних об'єктів і характеристик використовуваного обладнання.

Сучасна теорія планування експерименту склалася у 60-х роках ХХ століття. Її методи тісно пов'язані з теорією наближення функцій і математичним програмуванням. Було побудовано оптимальні плани та досліджено їхні властивості для широкого класу моделей. Також було розроблено ітераційні алгоритми планування експерименту, що дають у багатьох випадках задовільний числовий розв'язок задачі планування експерименту.

Серйозні експериментальні дослідження з багатьма критеріями якості та вхідними величинами без планування експерименту просто неможливі. З ускладненням експериментів ефективність їх планування зростає. Об'єктом дослідження із застосуванням теорії планування експерименту можуть бути будь-які процеси, пристрої або їхні окремі елементи.

Вхідні величини об'єктів дослідження можуть якісно відрізнятися одна від одної, тому в теорії планування експерименту вхідні параметри іменуються загальною назвою фактори.

Вихідні величини також можуть бути якісно різними - вони отримали назву відгук (функція мети, параметр оптимізації) [121].

Модель об'єкта являє собою аналітичну залежність відгуку від факторів. Найчастіше ця залежність невідома, відомими є чинники x_i і вихідні величини відгуку y_i . Часто трапляється завдання дослідження однієї вихідної величини y як функції кількох чинників:

$$y_i = \varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (5.14)$$

Вид цієї залежності визначається з фізичної сутності, а числові значення коефіцієнтів обчислюються відповідно до результатів експерименту. Тому модель називають також емпіричною. Слід зазначити, що модель об'єкта може бути побудована виходячи з теоретично обґрунтованого розуміння сутності процесів, що відбуваються. Створену таким чином модель називають теоретичною.

Планування експерименту дає змогу розв'язувати такі завдання: відшукування екстремуму відгуку; визначення моделі об'єкта, дослідження механізму фізичного явища тощо.

Дослідити механізм явища означає визначити аналітичний вираз

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (5.15)$$

яке досить точно описувало б невідому залежність (5.10) у межах області можливих значень чинників X_i , звану областю визначення чинників Ω .

Основні етапи планування експерименту:

- встановлення мети експерименту – постановка цілей і завдань проведення експерименту;
- уточнення умов проведення експерименту – вибір обладнання, термінів робіт, способу проведення експерименту тощо;
- вибір вхідних і вихідних параметрів – вибір залежної вимірюваної змінної, визначення випадкових і детермінованих незалежних змінних;

- встановлення необхідної точності результатів вимірювань – вибір компромісу між мінімальним числом випробувань і статистичною достовірністю одержуваних результатів;

- складання плану і проведення експерименту – кількість і порядок випробувань, завдання сукупності значень заданих змінних-факторів і їхніх взаємодій в експерименті;

- статистичне опрацювання результатів експерименту – застосування методів математичної статистики для опрацювання результатів, побудова математичної моделі експерименту;

- формулювання висновків.

Під час проведення експериментів дуже багато залежить від того, наскільки активно експериментатор може «втручатися» в досліджуване явище, має він чи ні можливість встановлювати ті рівні чинників, які становлять для нього інтерес.

З цього погляду всі чинники можна розбити на три групи:

- контрольовані та керовані (фактори, для яких можна не тільки зареєструвати їхній рівень, а й задати в кожному конкретному досліді будь-яке його можливе значення);

- контрольовані, але некеровані фактори (фактори, рівні яких можна тільки реєструвати, а задати в кожному досліді їхнє певне значення практично неможливо);

- неконтрольовані (фактори, рівні яких не реєструються експериментатором і про існування яких він навіть може і не підозрювати).

Наприклад, під час проведення порівняльного експерименту з визначення пластичності термічно обробленого і необробленого сталевго дроту, як контрольовані і керовані фактори можна розглядати температуру відпалу і швидкість охолодження дроту. Фактичний відсотковий вміст різних хімічних елементів сталі потрапляє до групи контрольованих, але некерованих факторів. Пов'язано це з тим, що хімічний склад може бути зареєстрований (з паспорта плавлення або із супровідних документів на дану партію дроту), але задати в умовах реального чинного сталеплавильного виробництва для кожного досліді чітко визначений відсотковий вміст, наприклад вуглецю – завдання практично нездійсненне. До групи неконтрольованих чинників у цьому прикладі можна віднести масу причин,

через які може змінитися пластичність металу (нерівномірність деформації металу по довжині бунта дроту в процесі прокатки або під час волочіння, несприятливі умови зберігання металу, що призводять до його підвищеної корозії, тощо).

У кількісному експерименті необхідно не тільки реєструвати рівні всіх контрольованих чинників, а й мати можливість встановлювати кількісний опис тієї властивості (відгуку) досліджуваного явища, яке вивчає (спостерігає) експериментатор. Причому оскільки на об'єкт дослідження в процесі експерименту завжди впливає величезна кількість неконтрольованих чинників, що вносить в одержувані результати деякий елемент невизначеності, значення відгуку, в кожному конкретному досліді, неможливо передбачити заздалегідь. Тому відтворення досліджуваного явища за одного й того самого фіксованого набору рівнів усіх контрольованих чинників завжди призводитиме до різних значень відгуку, тобто відгук – це завжди випадкова величина.

Відгуком в умовах наведеного прикладу є пластичність сталевого дроту (кількість перегинів до моменту руйнування). Причому, навіть якщо взяти шматки дроту від одного й того самого мотка (тобто метал однієї плавки – однакового хімічного складу, що має один і той самий режим термообробки за однакової температури відпалу та швидкості охолодження), то і за такого режиму для кожного шматка дроту ми отримаємо різні (хоча й дуже близькі одне до одного) значення пластичності металу. У результаті кількісного експерименту необхідно знайти залежність між відгуком і факторами, тобто функцію відгуку. Оскільки відгук є випадковою величиною, то, з точки зору теорії ймовірностей, його можна задати одним із параметрів свого розподілу, наприклад математичним очікуванням.

Функція відгуку – це залежність математичного очікування відгуку від факторів. У прикладі з дротом функцією відгуку є залежність математичного очікування величини пластичності сталі від температури відпалу, швидкості охолодження та хімічного складу металу.

З урахуванням поділу чинників на три групи, функцію відгуку в загальному випадку можна записати у вигляді:

$$M_y = f(x_i, h_j) + \varepsilon\delta, \quad (5.16)$$

де M_y – математичне очікування відгуку;

x_i – контрольовані та керовані фактори;

h_j – контрольовані, але некеровані фактори;

$\varepsilon\delta$ – помилка експерименту, що враховує вплив неконтрольованих факторів.

5.4.2. Вибір параметрів оптимізації

Вибір параметрів оптимізації (критеріїв оптимізації) є одним із головних етапів роботи на стадії попереднього вивчення об'єкта дослідження. Під параметром оптимізації розуміють характеристику мети, задану кількісно. Параметр оптимізації є відгуком на вплив чинників, які визначають поведінку досліджуваної системи.

Кожен реальний об'єкт може характеризуватися кількома або одним параметром оптимізації. Параметр оптимізації вибирають, як правило, з урахуванням комплексу вимог. Параметр оптимізації має відповідати низці вимог:

- бути кількісним, тобто мати числову оцінку;
- мати однозначність у статистичному сенсі. Заданому набору значень чинників має відповідати тільки одне значення параметра оптимізації, водночас протилежне твердження неправильне: одному й тому самому значенню параметра можуть відповідати різні набори значень чинників;
- бути універсальним і всебічно відображати характеристики об'єкта, процесу, явища. Універсальними зазвичай є економічні та техніко-економічні параметри (собівартість, надійність тощо);
- бути ефективним як з точки зору досягнення мети, так і в статистичному сенсі. Якщо, наприклад, за параметр оптимізації прийняти собівартість відновлення деталей, то він не характеризуватиме надійність її роботи. Тому як параметр оптимізації доцільно вибирати собівартість за допустимої зносостійкості або зносостійкість за допустимої собівартості. Статистично ефективним параметром оптимізації є той, який має найменші помилки вимірювань;

– мати ясний фізичний сенс. Ця вимога не тільки визначає мету дослідження, а й істотно полегшує інтерпретацію отриманих результатів експерименту.

На практиці найчастіше доводиться враховувати кілька вихідних параметрів. Іноді їх кількість досить велика. Так, наприклад, під час виробництва продукції необхідно враховувати геометричні, фізико-механічні, технологічні, економічні та інші параметри. Математичні моделі можна побудувати для кожного з параметрів, але одночасно оптимізувати кілька функцій неможливо. Зазвичай оптимізується одна функція, найважливіша з погляду дослідження, з безлічі вихідних параметрів обирають один як параметр оптимізації, а решта слугують обмеженнями [121].

Використовуючи кореляційний аналіз, досліджується також можливість зменшення числа вихідних параметрів. Крім того, для вибору єдиного параметра оптимізації застосовуються математичні перетворення, перехід від кількох параметрів оптимізації до узагальненого.

Якщо досліджуваний об'єкт характеризують n приватних відгуків y_u ($u = 1, 2, \dots, n$), кожен із цих відгуків має свій фізичний смисл і, найчастіше, різну розмірність і вимірюється в N дослідах. Тоді y_{ui} – це значення u -го відгуку в i -му досліді ($i = 1, 2, \dots, N$). Щоб об'єднати відгуки, необхідно ввести для кожного з них деяку безрозмірну шкалу, яка має бути однотипною для всіх об'єднаних відгуків. Якщо кожному y_{ui} присвоїти тільки два значення: 0 – незадовільний результати 1 – задовільний результат, то можна стандартизувати шкалу відгуків. Узагальнений відгук у цьому випадку також має набувати одного з цих двох можливих значень, причому так, щоб значення 1 мало місце, якщо всі приватні відгуки в цьому досліді набули значення 1, і 0, якщо хоча б один із відгуків перетворився на 0. Тоді для побудови узагальненого відгуку зручно скористатися формулою:

$$Y_i = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^n y_{ui}}, \quad (5.17)$$

де Y_i – узагальнений відгук у i -му досліді;

Π – добуток відгуків $y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{ni}$.

Методи аналізу даних промислових експериментів спираються на теорію ймовірностей і методи математичної статистики: факторний аналіз, регресійний аналіз, дисперсійний аналіз [123].

5.4.3. Методи факторного аналізу

Факторний аналіз – це процедура, за допомогою якої велике число змінних, що відносяться до наявних спостережень, зводять до меншої кількості незалежних впливових величин, званих факторами: в один фактор об'єднуються змінні, що сильно корелюють між собою.

Мета факторного аналізу – скорочення кількості змінних на основі їх класифікації та визначення структури взаємозв'язків між ними. Завдяки скороченню кількості змінних замість вихідного набору змінних з'являється можливість аналізувати дані за виділеними факторами, кількість яких значно менша за вихідну кількість взаємопов'язаних змінних [119].

Область визначення двох факторів x_1 , x_2 називається двофакторним простором, а експеримент – двофакторним експериментом. Можуть бути також одно- і багатофакторні експерименти. Експерименти, спрямовані на розкриття механізму досліджуваного явища і визначають аналітичну залежність, називають також інтерполяційними або регресійними. Експерименти, що дають змогу знаходити екстремум відгуку в області його визначення, називають екстремальними.

Відомості про діючі фактори і факторний простір багато в чому визначають план експерименту. Починають планування експерименту з визначення кількості чинних чинників і впливу їх на вихідну величину y , встановлюють залежність чинників між собою, уточнюють, які з чинників є керованими за завданням експериментатора, а які - некерованими, і, нарешті, слід урахувувати точність вимірювальної апаратури, використовуваної для вимірювання значень чинників x_1 , x_2 , ..., x_n і відгуку y_j . Як правило, точність вимірювання факторів має бути приблизно на порядок вищою, ніж точність вимірювання відгуку.

Фактори слід вибирати такими, щоб вони були незалежними. Якщо ж між деякими з них є функціональний, або кореляційний зв'язок, то з них слід вибрати один фактор.

Найбільшого поширення набули плани експериментів 2^k , 2^{k-p} , плани другого порядку, а в останні десятиліття багатофакторні регулярні плани. У разі двофакторного експерименту його область ω_s визначається двома обраними значеннями (рівнями) кожного з факторів – мінімальним і максимальним або, як їх ще називають, верхнім і нижнім.

5.4.4. Методи дисперсійного аналізу

Дисперсійний аналіз часто позначається як *ANOVA* (від англ. – *analysis of variance*) і перекладається як аналіз варіативності. Іншими словами – це статистичний метод вивчення взаємозв'язків різних чинників. Застосовується для дослідження впливу однієї або декількох якісних змінних на одну залежну кількісну змінну, значення якої можуть бути отримані дослідним шляхом у вигляді випадкової величини. В основі дисперсійного аналізу лежить припущення, що одні змінні можуть розглядатися як причини (незалежні змінні), а інші як наслідки (залежні змінні або відгуки). Незалежні змінні в дисперсійному аналізі називають факторами, оскільки під час експерименту дослідник може змінювати їхні значення й аналізувати отриманий результат залежною кількісною змінною.

Основна мета дисперсійного аналізу – дослідити значущість відмінності між середніми значеннями залежної кількісної змінної за групами фактора. Досягається це за допомогою розкладання загальної дисперсії залежної змінної на складові: дисперсію за рахунок розбиття на групи (міжгрупова дисперсія) і дисперсію за рахунок решти факторів (внутрішньогрупова дисперсія). Аналізуючи ці компоненти дисперсії можна оцінити частку впливу кожного фактора на залежну змінну. Окреме завдання дисперсійного аналізу – виявити, за рахунок яких саме груп відбувається відмінність середніх значень залежної змінної.

У статистиці дисперсією називають величину, яка характеризує міру розкиду значень випадкової величини щодо її математичного очікування. У науковій літературі дисперсія позначається $D[X]$, або $var(X)$ (від англ. *variance* - дисперсія) [120].

Нехай X – випадкова величина, визначена на деякому ймовірнісному просторі. Тоді дисперсією називається

$$D[X] = M\left[(X - M[X])^2\right], \quad (5.18)$$

де M – математичне очікування.

Якщо випадкова величина X дискретна, то:

$$D[X] = \sum_{i=1}^n p_i (x_i - M[X])^2, \quad (5.19)$$

де x_i – i -те значення випадкової величини;

p_i – імовірність того, що випадкова величина набуває значення x_i ;

n – кількість значень випадкової величини.

Якщо випадкова величина X безперервна, то:

$$D[X] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) (x - M[X])^2 dx, \quad (5.20)$$

де $f(x)$ – щільність імовірності випадкової величини.

Квадратний корінь із дисперсії позначається σ і називається середньоквадратичним відхиленням.

Властивості дисперсії:

- Дисперсія будь-якої випадкової величини невід’ємна: $D[X] \geq 0$;
- Якщо дисперсія випадкової величини скінченна, то звідси і її математичне очікування;
- Якщо випадкова величина дорівнює константі, то її дисперсія дорівнює нулю: $D[a] = 0$.

- Дисперсія суми двох випадкових величин дорівнює:

$$D[X + Y] = D[X] + D[Y] + 2 \operatorname{cov}(X, Y), \quad (5.21)$$

де $\operatorname{cov}(X, Y)$ – їхня коваріація (тобто - міра спільної варіативності (лінійної залежності) двох випадкових величин), яка обчислюється за формулою:

$$\operatorname{cov}(X, Y) = M[(X - M[X])(Y - M[Y])], \quad (5.22)$$

- Для дисперсії довільної лінійної комбінації кількох випадкових величин має місце рівність:

$$D[\sum_{i=1}^n c_i X_i] = \sum_{i=1}^n c_i^2 D[X_i] + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} c_i c_j \operatorname{cov}(X_i, X_j), \quad (5.23)$$

Дисперсія є одним із параметрів нормального закону розподілу. Що більшою є дисперсія, то більш пологими є «схили» розподілу і довгими його «хвости».

Що вищою є дисперсія параметрів моделі (коефіцієнтів регресії, значень змінних тощо), то менш стійкою вона буде. Висока дисперсія вихідних даних дає змогу припустити високу значущість у них випадкової компоненти, можливу наявність шуму й аномальних значень.

Розрізняють різні моделі дисперсійного аналізу. Залежно від кількості чинників можуть бути однофакторні та багатфакторні дисперсійні моделі. Залежно від числа спостережень у досліджуваних групах розрізняють збалансовані та незбалансовані моделі дисперсійного аналізу. Залежно від числа залежних змінних розрізняють одновимірні та багатовимірні моделі. За природою факторів розрізняють детерміновані, випадкові та змішані моделі. Залежно від того залежні чи незалежні вибірки, утворені категоріями чинника, виокремлюють дисперсійні моделі з незалежними вимірами і дисперсійний аналіз із повторними вимірами.

Найважливішою є вимога адекватності моделі, тобто апроксимувальна функція (5.15) має досить точно наближатися до залежності (5.14). Існують критерії перевірки умови адекватності, що застосовуються після проведення експериментів і використовують дисперсійний аналіз, а також інші методи математичної статистики.

5.4.5. Методи регресійного аналізу

Регресійний аналіз (англ. – *regression analysis*) – це метод вивчення статистичного взаємозв'язку між однією залежною кількісною залежною змінною від однієї або декількох незалежних кількісних змінних.

Регресійний аналіз тісно пов'язаний із кореляційним аналізом. У кореляційному аналізі досліджується напрям і тіснота зв'язку між кількісними змінними. У регресійному аналізі досліджується форма залежності між кількісними змінними. Іншими словами, якщо розрахунок кореляції характеризує силу зв'язку між двома змінними, то регресійний аналіз служить для визначення виду цього зв'язку і дає можливість для прогнозування значення однієї (залежної) змінної, відштовхуючись від значення іншої (незалежної) змінної. Фактично обидва методи вивчають один і той самий взаємозв'язок, але з різних боків, і доповнюють один одного. На практиці кореляційний аналіз виконується перед регресійним аналізом. Після доведення наявності взаємозв'язку методом кореляційного

аналізу можна виразити форму цього зв'язку за допомогою регресійного аналізу.

Мета регресійного аналізу – за допомогою рівняння регресії передбачити очікуване середнє значення результуючої змінної.

Основні завдання регресійного аналізу такі:

- визначення виду та форми залежності;
- оцінка параметрів рівняння регресії;
- перевірка значущості рівняння регресії;
- перевірка значущості окремих коефіцієнтів рівняння;
- побудова інтервальних оцінок коефіцієнтів;
- дослідження характеристик точності моделі;
- побудова точкових та інтервальних прогнозів результуючої змінної.

Як і кореляційний аналіз, регресійний аналіз відображає тільки кількісні залежності між змінними. Причинно-наслідкові залежності регресійний аналіз не відображає. Гіпотези про причинно-наслідковий зв'язок змінних мають формулюватися й обґрунтовуватися з огляду на теоретичний аналіз змісту досліджуваного явища [120].

Якщо кожному значенню незалежної змінної x відповідає певне значення y , то між ними має місце детермінований зв'язок. Якщо ж між x і y існує зв'язок, але не цілком визначений, так що одному значенню x відповідає сукупність значень y у вигляді статистичного ряду, то такий зв'язок називають регресійним, або кореляційним, тобто регресійні залежності характеризуються статистичним видом зв'язку. Експериментально встановити таку залежність можна шляхом проведення експерименту і використання регресійного аналізу.

Зараз відомо 5 основних видів регресії:

- найпоширеніша – лінійна парна або множинна регресія (передбачає встановлення лінійної залежності між парою або множиною вхідних незалежних і однією вихідною залежною змінними);
- поліноміальна регресія (для нелінійно поділених даних);
- гребенева (рідж) регресія (за високої парної кореляції незалежних змінних, але з відсутністю нормального розподілу);

- регресія за методом «ласо» (як і в гребневій регресії, додається умова зсуву і функція оптимізації, але не з використанням квадратичного зсуву, а абсолютного);

- регресія «еластична мережа» (гібрид методів регресії ласо і гребневої регресії).

Модель процесу або об'єкта в разі лінійної регресії являє собою регресійний вираз, що зв'язує фактори з відгуком. У теорії планування експерименту прагнуть представити моделі у вигляді кінцевої суми степеневих рядів.

Проста (однофакторна) лінійна модель має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 x_1, \quad (5.24)$$

Багатофакторна лінійна модель має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n, \quad (5.25)$$

де $b_0, b_1, \dots, b_n$ – параметри (коефіцієнти регресії);

$x_1, x_2, \dots$ – регресори (фактори) моделі;

n – кількість факторів моделі.

Коефіцієнти регресії обирають таким чином, щоб сума квадратів відхилень точок, що відповідають реальним спостереженням даних, від лінії регресії була мінімальною.

Одним із базових методів регресійного аналізу для оцінки невідомих параметрів регресійних моделей за вибірковими даними є метод найменших квадратів.

Метод найменших квадратів (МНК) – математичний метод, що застосовується для розв'язання різноманітних задач, заснований на мінімізації суми квадратів відхилень деяких функцій від експериментальних вхідних даних. МНК використовується для розв'язання невизначених систем рівнянь (коли кількість рівнянь перевищує кількість невідомих), для пошуку розв'язку в разі звичайних (не перевизначених) нелінійних систем рівнянь, для апроксимації точкових значень деякої функції.

У цьому разі мінімізується сума квадратів відхилень реально спостережуваних Y від їхніх оцінок Y' (маються на увазі оцінки за допомогою прямої лінії, яка являє собою шукану регресійну залежність):

$$\sum_{n=1}^m (Y_n - Y'_n)^2 \rightarrow \min, \quad (5.26)$$

де M – обсяг вибірки.

На рис. 5.21 наведено приклад кривої, проведеної через точки, що мають нормально розподілене відхилення від істинного значення з використанням МНК.

Досліджуючи моделі простої та множинної регресії, припускають, що залежність між відгуком Y і кожною з пояснювальних змінних є лінійною.

Однак існують й інші види взаємозв'язку. Одним із найпоширеніших нелінійних взаємозв'язків між двома змінними є квадратична залежність. Для її аналізу призначена модель квадратичної регресії.

Квадратична модель має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1x_i + b_2x_i^2. \quad (5.27)$$

Процедура обчислення коефіцієнтів регресії становить основну частину регресійного аналізу.

Для дослідження складніших залежностей можуть використовуватися рівняння логарифмічної, степеневі, гіперболічної експотенціальної регресії.

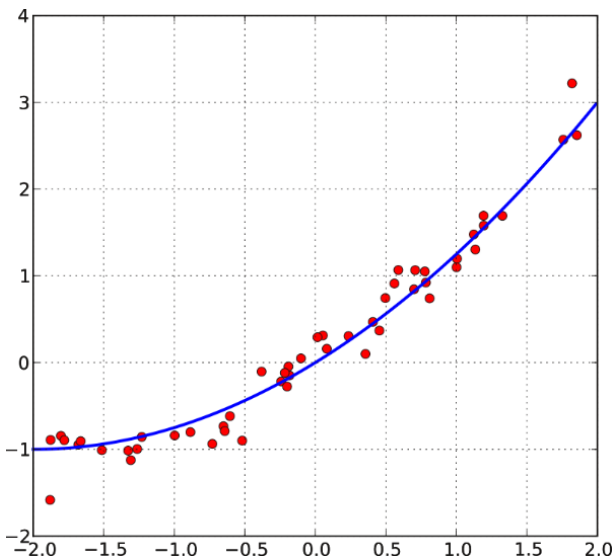


Рис. 5.21. Апроксимувальна крива експериментальних даних

6. ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА ПІДПРИЄМСТВІ

Контроль якості, який здійснюють відповідні підрозділи підприємств, є первинним (таким, що передує в часі) по відношенню до контролю з боку інших зовнішніх суб'єктів управління якістю. Крім того, без проведення працівниками контрольної служби підприємства (цеху, дільниці) необхідних контрольних операцій у процесі виробництва продукції або після завершення окремих етапів її обробки останні не можуть вважатися повністю виготовленими, тому не підлягають відвантаженню споживачам. Саме ці обставини визначають особливу роль служб технічного контролю і свідчать про необхідність першочергового вдосконалення діяльності даних служб на підприємствах.

6.1. Завдання, функції та шляхи вдосконалення діяльності служб контролю якості підприємств

На великих промислових підприємствах технічний контроль якості продукції здійснює служба технічного контролю – тобто спеціальний структурний підрозділ (зазвичай, відділ або управління технічного контролю) [126].

Головними завданнями служби технічного контролю є запобігання випуску (постачання) підприємством продукції, що не відповідає вимогам стандартів і технічних умов, затвердженим зразкам (еталонам), проектно-конструкторської та технологічної документації, умовам постачання і договорів, або некомплектної продукції, а також підвищення відповідальності всіх ланок виробництва за якість продукції, що випускається.

Очолює ВТК начальник відділу, який безпосередньо підпорядковується керівнику підприємства. Начальник ВТК має право припинити приймальний контроль продукції, що має дефекти, які повторюються, до усунення причин, що викликали ці дефекти, заборонити, використання сировини, матеріалів, комплектуючих виробів та інструменту, які не відповідають установленим вимогам виготовлення продукції. У разі виникнення браку начальник ВТК висуває обов'язкові для виконання вимоги

до підрозділів і посадових осіб підприємства щодо усунення причин виникнення дефектів продукції та подає керівництву пропозиції про притягнення до відповідальності посадових осіб і робітників, винних у виготовленні бракованої продукції. Він нарівні з керівником підприємства несе відповідальність за випуск недоброякісної або невідповідної стандартам і технічним умовам продукції.

Нині на багатьох підприємствах склалася така ієрархія контролюючих служб та їхніх підрозділів: відділ або управління технічного контролю підприємства (рівень управління - підприємство), бюро (відділ) технічного контролю цеху (на рівні цеху), бригада контролерів дільниці (на рівні дільниці), робочий контролер (на робочому місці).

Структура і штатний розпис ВТК підприємства розробляються на основі типової структури, з урахуванням виробничих особливостей. Кількість контролерів (Ч_k) у масовому і великосерійному виробництвах може бути визначена за формулою:

$$\text{Ч}_k = \sum_{j=1}^k N_j \cdot T_{kn} \cdot P_b \cdot \frac{Q_{kf}}{F_t} \cdot 60, \quad (6.1)$$

де N_j – програма випуску одиниць продукції (виробів) j -го найменування в плановий період, шт.;

T_{kn} – норма часу на перевірку однієї деталі, хв;

P_b – відсоток вибіркової під час контролю деталей;

Q_{kf} – кількість контрольних промірів на одну деталь;

F_t – ефективний фонд робочого часу одного контролера в плановий період, год;

$j = 1, 2, \dots, k$ – кількість найменувань деталей - операцій, на яких здійснюють контроль.

ВТК у своїй діяльності тісно пов'язаний з такими функціональними підрозділами (відділами) підприємства: метрологічним, стандартизації, головного технолога, головного металурга, головного конструктора, надійності, гарантійного обслуговування тощо. Наприклад, лабораторії підприємства на вимогу ВТК проводять випробування і додаткові дослідження продукції, необхідні для розроблення та впровадження нових методів контролю і підвищення якості продукції, що випускається; здійснюють повірку, регулювання і ремонт засобів вимірювань. Таким чином, слід зазначити, що сучасний контроль якості являє собою складну

організаційну систему, що охоплює всю організаційну систему, без успішного функціонування якої неможливо ефективно вирішувати проблеми якості. При цьому абсолютно не важливо, яким чином називатимуться служби, що здійснюють різні види контролю якості на підприємстві. Найголовніше – це компетентність співробітників цих служб, а також об'єктивність, достовірність і своєчасність проведення контролю.

6.2. Функції та склад служб контролю якості на підприємствах

Зважаючи на різноманіття завдань контролю якості продукції та необхідність відповідних перевірок на різних етапах процесу виробництва, у складі служб технічного контролю підприємств можна виділити такі спеціалізовані функції та функціональні підрозділи, зокрема [127]:

- контроль процесу виробництва, що охоплює: вхідний контроль якості продукції, одержуваної за кооперацією; контроль якості продукції (виробів) у цехах і на дільницях; ізоляцію (вилучення з технологічного циклу) браку; облік, аналіз і класифікацію браку у виробництві; інспекційний контроль; дослідження й аналіз надійності продукції, що випускається; контроль якості пакування, зберігання на складах і відвантаження готової продукції:

- приймальний (здавальний) контроль готової продукції;

- контроль якості продукції (виробів) у процесі експлуатації споживачем;

- аналіз претензій і рекламаций споживачів на продукцію, що випускається;

- контроль використаного обладнання, оснащення, інструменту, зокрема: контроль технічного стану і точності обладнання; контроль технологічного оснащення; контроль якості інструменту власного виготовлення;

- контроль застосовуваної вимірювальної та випробувальної апаратури: вимірювальної техніки; прилади в дефектоскопії; ремонт контрольно-випробувального устаткування, вимірювальних приладів і оснащення; удосконалення методів і засобів контролю та впровадження нових засобів і методів технічного контролю; повірки засобів вимірювань;

- розробка, впровадження та контроль функціонування системи управління якістю продукції на підприємстві;

- технічне і технологічне забезпечення процесів контролю якості.

Структура служб контролю якості багатьох підприємств не містить нині переліченого вище набору необхідних підрозділів, що, природно, позначається на самій якості роботи підприємства.

6.3. Основні недоліки в роботі служб контролю якості підприємств

Служби контролю якості функціонують на всіх промислових підприємствах. Саме ці підрозділи володіють найбільш істотними матеріально-технічними передумовами (випробувальним обладнанням, контрольно-вимірювальними приладами, оснащенням, приміщеннями тощо) для проведення кваліфікованої та всебічної оцінки якості продукції. Проте достовірність результатів контролю якості, здійснюваного співробітниками цих підрозділів, нерідко викликає обґрунтовані сумніви.

У структурі служб контролю якості продукції багатьох підприємств здебільшого присутні підрозділи, що забезпечують технічні та технологічні аспекти контролю якості. При цьому недостатньо розвинені організаційно-економічні та інформаційні функції відділів та управлінь технічного контролю. На багатьох підприємствах у роботі названих підрозділів є такі проблеми і недоліки:

- слабка технічна озброєність і недосконалість метрологічного забезпечення;

- недосконалість методик вимірювань, дублювання і паралелізм у роботі з оцінки якості;

- невідповідність за кваліфікацією розряду контролерів рівню складності виконуваних контрольних робіт;

- низький загальноосвітній рівень працівників служби технічного контролю;

- низька пропускна спроможність контрольних служб через недостатню чисельність персоналу або через недоліки в організації їх роботи та інші причини, що призводять до невиконання окремих робіт з контролю якості, появи безконтрольних ділянок виробництва;

- відносно низька, порівняно з робітниками основних професій, заробітна плата і незадовільна система мотивації персоналу контрольних служб.

Недостовірність результатів контролю, низька вимогливість і суб'єктивізм в оцінці якості продукції призводять до послаблення роботи з виявлення браку, збільшення кількості рекламаций на продукцію, що випускається.

Багато недоліків у роботі служб контролю якості продукції підприємств пов'язані з невиконанням (або неналежним виконанням) окремих видів робіт, а також із неправильним розподілом обов'язків із технічного контролю між різними підрозділами відповідних служб і, відповідно, з відсутністю багатьох важливих підрозділів у складі служб контролю якості підприємств.

Усунення зазначених недоліків у роботі розглянутих служб, що перешкоджають досягненню високого рівня профілактичності, достовірності та об'єктивності перевірок, може чинити різнобічний позитивний вплив на процеси формування та оцінки якості продукції. По-перше, контроль, спрямований на запобігання розбалансованості виробничих процесів і виникненню відхилень від вимог, встановлених до якості продукції, сприяє профілактиці браку, його виявленню на найбільш ранніх стадіях технологічних процесів та оперативному усуненню з мінімальними витратами ресурсів, що, без сумніву, призводить до підвищення якості продукції, що випускається, зростанню ефективності виробництва. По-друге, суворий і об'єктивний контроль якості продукції: перешкоджає проникненню браку «за ворота» підприємств-виготовлювачів; сприяє зменшенню обсягів недоброякісної продукції, що поставляється споживачам; знижує вірогідність появи додаткових непродуктивних витрат, що неминуче виникають за поганого контролю, з виявлення й усунення різних дефектів у готовій продукції, відвантаження та транспортування недоброякісної продукції до споживачів, її вхідного контролю спеціальними підрозділами та повернення браку до споживачів, а також повернення браку. По-третє, надійна робота служби контролю якості створює необхідні передумови для усунення дублювання і паралелізму в роботі інших служб підприємства; зниження обсягів інформації, яку вони переробляють; вивільнення багатьох

кваліфікованих фахівців, зайнятих повторною перевіркою продукції, прийнятої службою контролю якості підприємства; істотного зменшення кількості розбіжностей, які мають місце під час оцінювання якості продукції різними суб'єктами контролю; зниження витрат на контроль і підвищення його ефективності.

Удосконалення діяльності служб контролю якості підприємств має передбачати створення, розвиток і зміцнення тих підрозділів цієї служби, які здатні ефективно вирішувати такі завдання:

- розроблення та впровадження прогресивних методів і засобів технічного контролю, що сприяють зростанню продуктивності праці, підвищенню об'єктивності перевірок;
- підготовку необхідної інформації для нормування трудомісткості контрольних операцій (що дасть змогу оптимізувати кількість контролерів), об'єктивного обліку та комплексної диференційованої оцінки якості праці різних категорій персоналу контрольної служби;
- проведення робіт із впровадження самоконтролю основних виробничих робітників (сюди входить і формування переліку технологічних операцій, що передаються на самоконтроль, і оснащення робочих місць необхідними контрольно-вимірювальними та випробувальними приладами, інструментами, документацією, спеціальне навчання робітників, і багато іншого);
- проведення досліджень динаміки якості продукції як у процесі виробництва, так і в процесі експлуатації, які передбачають збір даних як у процесі виробництва, так і ефективний інформаційний взаємозв'язок між постачальниками і споживачами з питань якості продукції.
- координацію роботи всіх структурних підрозділів служби технічного контролю якості підприємства.

Особливо слід виокремити розроблення та реалізацію заходів щодо профілактики браку у виробництві, а також визначення величини та динаміки витрат на контроль якості продукції, оцінку ефективності роботи контрольних служб.

На невеликих підприємствах через низку об'єктивних причин створення кількох нових підрозділів у складі служби контролю якості не завжди можливе. У таких випадках перелічені вище функції можуть бути

передані для постійного виконання окремим фахівцям служби контролю якості, що входять до складу тих чи інших її структурних ланок. У нинішніх виробничих умовах доволі швидке й ефективне підвищення об'єктивності контролю якості продукції досягається в результаті зміни сформованої на багатьох підприємствах неправильної системи оцінювання і стимулювання праці різних категорій співробітників контрольних служб, створення справжньої їхньої зацікавленості в підвищенні якості своєї праці, забезпеченні достовірності здійснюваних перевірок.

6.4. Система профілактики виробництва дефектної продукції та браку на підприємстві

Пасивна фіксація браку у виробництві не впливає на процес формування якості виробів. Для активного впливу на цей процес необхідне створення системи профілактики браку, яка передбачає профілактику браку як на стадії підготовки виробництва, так і безпосередньо у виробництві.

Для істотного поліпшення результатів діяльності з контролю якості продукції необхідна також концентрація зусиль співробітників контрольних служб для забезпечення пріоритетного розвитку прогресивних видів контролю, що дають змогу здійснювати профілактику браку у виробництві. Склад елементів системи профілактики браку на підприємстві та їх взаємозв'язок показано на рис. 6.1 [127].

Ефективність системи профілактики браку безпосередньо впливає на якісні показники роботи підприємства, тому має неминуще значення.

Розвиток прогресивних видів контролю передбачає необхідність першочергового вдосконалення:

- контролю якості продукції на етапі її розроблення;
- нормоконтролю конструкторської, технологічної та іншої документації на продукцію, що знову освоюється і модернізується;
- вхідного контролю якості сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів та іншої продукції, що отримується за кооперацією і використовується у власному виробництві;
- контролю дотримання технологічної дисципліни безпосередніми виконавцями виробничих операцій;

– самоконтролю основних виробничих робітників, бригад, дільниць, цехів та інших підрозділів підприємства.



Рис. 6.1. Система профілактики браку на підприємстві

Правильне використання видів контролю сприяє значному підвищенню його активного впливу на процес формування якості продукції,

оскільки здійснюється не пасивна фіксація браку у виробництві, а профілактика його виникнення. Крім того, їх застосування дає змогу здійснювати своєчасне виявлення відхилень, що намічаються, від установлених вимог, оперативне виявлення та усунення різних причин зниження якості продукції, запобігання можливості їх появи надалі.

На стадії підготовки виробництва з метою профілактики браку передбачено обов'язковий контроль якості нових розробок і вхідний контроль якості сировини, матеріалів, напівфабрикатів, що надходять, тощо, а на стадії виробництва - контроль дотримання технологічної дисципліни, зазвичай багатоступеневий і самоконтроль якості.

6.4.1. Контроль якості нових розробок

Контроль якості нових розробок передбачає: оцінку та регулювання технічного рівня розробок; нормоконтроль конструкторської та технологічної документації.

Головним завданням контролю якості продукції на етапі розроблення є виявлення і запобігання, з одного боку, неминучим творчим пошуковим помилкам конструкторів і технологів, а з іншого - явним порушенням встановлених вимог і механічним помилкам у процесі проектування виробів і оформлення технічної документації [128, 130].

Основні причини таких порушень: недостатня забезпеченість розробників необхідною інформацією про найкращі світові досягнення в галузі проектування та виробництва аналогічної продукції; неповне врахування думки споживача щодо якості та технічного рівня нового виробу, а також незадовільний облік, аналіз та узагальнення відомостей щодо експлуатації аналогічної продукції; використання нормативно-технічної документації на сировину, матеріали, напівфабрикати та комплектуючі вироби, яка не забезпечує розробку нової продукції високої якості; використання неякісних матеріалів.

Контроль відповідності нових розробок встановленим вимогам здійснюють різні компетентні органи, зокрема й національні органи стандартизації, контролюючі ланки різних служб підприємства (відділів головного конструктора, головного технолога, стандартизації, технічного контролю, метрологічної служби та ін.). Вагома роль при контролі має

відводиться замовнику технічної документації на виробництво нових і модернізацію продукції, що випускається.

До числа найважливіших функцій контролю якості на етапі розроблення продукції належить нормоконтроль документації на нову продукцію.

Нормоконтроль конструкторської та технологічної документації являє собою сукупність операцій, за допомогою яких визначають відповідність її вимогам чинної нормативно-технічної документації та необхідні заходи щодо її вдосконалення.

Нормоконтроль документації на нову продукцію спрямований на дотримання у виробі, що розробляється, норм і вимог, установлених у стандартах, і на досягнення в них високого рівня стандартизації та уніфікації на основі широкого використання раніше спроектованих, освоєних у виробництві та стандартизованих виробів, типових конструкторських рішень і виконань. У процесі нормоконтролю перевіряється дотримання чинної системи класифікації та кодування, оформлення технічної документації відповідно до вимог стандартів.

Нормоконтролю піддається не тільки документація, розроблена відділами головного конструктора, головного технолога та інших служб підприємства. В обов'язковому порядку має здійснюватися вхідний нормоконтроль конструкторської документації, що надійшла від інших організацій або підприємств. При цьому перевіряється також комплектність документації, наявність обов'язкових підписів, правильність позначення стандартів та іншої нормативно-технічної документації, наявність на підприємстві зазначеної в кресленнях розробника посилованої нормативно-технічної документації тощо.

Фахівці з нормоконтролю повинні володіти широким кругозором і відрізнятися глибокою компетентністю. Зміни та виправлення технічної документації, пов'язані з порушенням чинних стандартів та інших нормативно-технічних документів, вносять у технічні документи на підставі нормоконтролю в обов'язковому порядку. Пропозиції, спрямовані на підвищення рівня стандартизації та уніфікації виробів, скорочення їхніх типорозмірів тощо, вносять до технічної документації за погодженням з її розробником.

Слід зазначити, що процес виправлення помилок, виявлених нормоконтролерами в конструкторській і технологічній документації, а також процедура внесення необхідних змін до креслень, схем, технологічних карт тощо нерідко потребують істотних витрат часу та призводять до затримки виробництва. У зв'язку з цим основну кількість перевірок доцільно перенести на найбільш ранні стадії створення технічної документації, організувати повсякденний профілактичний контроль ходу розробок.

Фахівці з нормоконтролю мають здійснювати облік виявлених відхилень і помилок, аналізувати їхній характер і причини виникнення, накопичувати інформацію, необхідну для оцінки діяльності розробників технічної документації.

У разі правильної постановки нормоконтролю (правильному нормуванню витрат часу і ресурсів на проведення нормоконтролю, визначенні обсягів і норм перевірок технічної документації, стимулювання нормоконтролерів тощо) покращується якість конструкторської та технологічної документації, а отже, і якість продукції, що виготовляється на її основі.

6.4.2. Вхідний контроль якості продукції, одержуваної за кооперацією

Вхідний контроль якості передбачає вибірккову або суцільну перевірку: одержуваних сировини і матеріалів; напівфабрикатів і заготовок; комплектувальних виробів і запасних частин.

Головна мета організації вхідного контролю якості, що визначає його сутність і місце у виробничому процесі, – це запобігання використанню у власному виробництві вихідних компонентів готової продукції, які за якістю невідповідні вимогам, що пред'являються до них. На частку комплектувальних виробів припадає до 70 - 80 % усіх несправностей готової продукції (машин, агрегатів, приладів, обладнання) під час експлуатації їх споживачами [129].

Звідси і важливість ефективного здійснення вхідного контролю якості продукції, одержуваної за кооперацією. До кола першочергових завдань підрозділів вхідного контролю входять:

- кваліфікований контроль якості всієї продукції, одержуваної підприємством за кооперацією; правильне заповнення та оформлення необхідних документів за результатами вхідного контролю;

- вдосконалення форм організації, методів проведення вхідного контролю; методів регулювання номенклатури та кількості контрольованих ознак продукції залежно від її вхідної якості; упровадження наукової організації праці працівників вхідного контролю; упровадження високопродуктивних технічних засобів контролю якості сировини, матеріалів, напівфабрикатів і комплектувальних виробів;

- ізоляція і відповідне маркування забракованих партій сировини, матеріалів, напівфабрикатів і комплектувальних виробів; організація участі постачальників у вирішенні спірних питань під час вибракування отриманих від них великих партій матеріалів і напівфабрикатів;

- контроль дотримання встановленого порядку маркування, складування, зберігання і видачі підрозділам свого підприємства продукції, отриманої від постачальників і тієї, що пройшла вхідний контроль;

- систематизація та облік даних про роботу постачальників за тривалий проміжок часу і в результаті цього вироблення рекомендацій щодо поліпшення якості поставок, зменшення кількості недоброякісних поставок.

6.4.3. Контроль дотримання технологічної дисципліни у виробництві

Контроль дотримання технологічної дисципліни передбачає: контроль технологічної документації (технологічні інструкції, нормалі, правила експлуатації устаткування тощо); контроль точності та стабільності технологічних процесів, стану устаткування, якості оснащення та інструменту, точності засобів метрологічного забезпечення; контроль рівня кваліфікації та якості праці виконавців виробничих операцій; міжопераційний, у тому числі активний, контроль якості. Система контролю технології (СКТ) є однією з найважливіших складових управління якістю і системи менеджмента якості [42, 43, 44].

Основними цілями контролю технологічної дисципліни є:

- виявлення порушень вимог стандартів, технічних умов, конструкторської, технологічної та іншої нормативно-технічної документації

під час здійснення технологічних процесів, що призводить до негативних наслідків (зниження рівня якості виробів; зростання втрат від браку; збільшення витрат ресурсів на здійснення технологічного процесу тощо);

- виявлення причин і конкретних винуватців цих порушень;
- визначення складу заходів, спрямованих на усунення виявлених відступів від технології та їх запобігання надалі.

З усього різноманіття можливих причин порушень технологічної дисципліни можна виокремити основні: використання у власному виробництві некондиційної сировини, матеріалів, отриманих за кооперацією; незабезпеченість робочих місць необхідною технічною документацією; недотримання вимог технології з вини виконавців унаслідок їхньої низької кваліфікації чи свідомого їхнього порушення, що виражається у невиконанні, неналежному виконанні або самовільній зміні послідовності деяких операцій технологічного процесу; несправність або неправильне налаштування технологічного устаткування, несвоєчасна заміна технологічного інструменту; невідповідність устаткування, інструменту, оснащення, випробувальної та контрольно-вимірювальної апаратури, які використовуються під час оснащення технологічних операцій, вимогам конструкторської та технологічної документації тощо.

6.4.4. Самоконтроль якості у виробництві

Основне завдання самоконтролю якості полягає у здійсненні виконавцем безпосередньо на робочому місці всіх передбачених операцій контролю якості продукції в повній відповідності до вимог контрольної документації. Таким чином, основна маса контрольних операцій переноситься на найбільш ранні стадії процесу формування якості продукції, що сприяє своєчасному виявленню, швидкому виправленню або ізоляції браку і, головне, перешкоджає потраплянню дефектної продукції на наступні технологічні операції.

Інші основні переваги самоконтролю якості у виробництві:

- можливість активного профілактичного впливу виконавця на виробничий процес з метою попередження можливих порушень і появи браку і внаслідок цього формування у нього високої відповідальності за якість своєї праці, творчого ставлення до дорученої справи;

- постійне отримання інформації про перебіг технологічного процесу, що дає змогу оперативно впливати на нього, усувати виявлені відхилення з мінімальними витратами часу і ресурсів, зосереджувати увагу на найвідповідальніших і нестійких за якістю операціях, створювати умови для підвищення якості продукції;

- скорочення пропуску дефектної продукції на наступні операції технологічного процесу; зменшення взаємних претензій виконавців і контролерів; зниження витрат виробництва внаслідок можливості переходу від суцільної до вибіркової перевірки продукції відділом технічного контролю в умовах самоконтролю;

- формування у виконавців високої відповідальності за якість своєї праці, творчого ставлення до роботи.

Для впровадження реального самоконтролю мають бути створені певні умови, зокрема: необхідно організувати навчання виконавців методам і прийомам контролю якості; оснастити робочі місця технічними засобами контролю; забезпечити матеріальне й моральне стимулювання робітників, переведених на самоконтроль; підготувати технологічний процес до переходу на самоконтроль (часовий інтервал між виробничими та контрольними операціями за можливістю має бути мінімізовано); включити в загальну трудомісткість виконання технологічних операцій час на контроль якості.

6.5. Економічні аспекти контролю якості продукції

Якість як економічна категорія має подвійний характер. Якість оцінює як підприємство-виробник товару, так і споживач зі своїми критеріями оцінки якості. У процесі «створення якості» беруть участь ті й інші.

З погляду виробника витрати на якість прийнято визначати, як витрати, які необхідно понести, щоб забезпечити задоволеність споживача продукцією (послугами). Разом з тим, економічні категорії якості проявляються через прибуток виробника від продажу якісно виготовленого продукту і через витрати виробника на забезпечення очікуваної споживачем якості.

Ці витрати, крім витрат на проектування і виготовлення продукту, нині включають також витрати на сервісне обслуговування споживача при

постачанні йому якісного продукту (виробу) і підтримання цієї якості протягом гарантійного терміну служби. Усе це разом становить сумарні витрати постачальника, тобто вартість продукту для його постачальника [131]. Різниця між продажною ціною (P - price) кожного реалізованого виробу і його вартістю (C - cost) дорівнює доходу (M - margin) від продажу одного виробу, тобто

$$M = P - C, \quad (6.2)$$

6.5.1. Витрати на якість і моделі вартості якості

Відповідно до підходу розробників теорії менеджменту якості Джозефа Джурана та Арманда Фейгенбаума (США) всі витрати на якість поділяють на чотири категорії:

- витрати на попереджувальні заходи (превентивні дії) – це витрати на запобігання самій можливості виникнення дефектів, тобто витрати, спрямовані на зниження або повне запобігання можливості появи дефектів або втрат;
- витрати на контроль – витрати на визначення та підтвердження досягнутого рівня якості;
- внутрішні втрати (витрати на внутрішні дефекти) – витрати, понесені всередині організації (тобто до того, як продукт був проданий споживачеві);
- зовнішні втрати (витрати на зовнішні дефекти) – витрати, понесені поза організацією (тобто після того, як продукт був проданий споживачеві).

Типова структура витрат на якість у галузі машинобудування за даними Інституту забезпечення якості у Великій Британії (*Institute of Quality Assurance*) має такий вигляд (рис. 6.2).

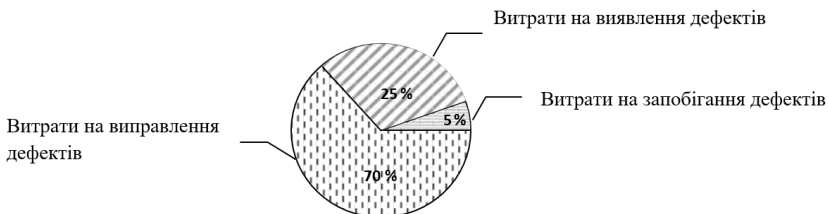


Рис. 6.2. Типова структура елементів витрат на якість

Як бачимо з рис. 6.2 основна частина всіх витрат припадає на виправлення браку і витрати, пов'язані із запобіганням утворенню дефектів, які майже в 3 рази перевищують витрати на контроль.

Взагалі ж відносні частки елементів витрат на якість змінюються в досить широких межах (табл. 6.1)

Таблиця 6.1 – Усереднені витрати на якість

Елементи витрат на виробництво	Частки від сумарних витрат, %
Витрати на попереджувальні заходи	0,5–5
Витрати на контроль	10–50
Внутрішні втрати від браку	25–40
Зовнішні втрати від браку (рекламації)	25–40

Так, наприклад, у легкій промисловості частка витрат на контроль якості сягає 1...5 %, в авіаційній промисловості близько 30 %, а в електронній промисловості та приладобудуванні – 25...50 % загальної собівартості виробництва виробів, у металургії – 7...12 %.

Перші дві категорії витрат неможливо звести до нуля, оскільки не оцінювати якість і не проводити запобіжних заходів фактично означає пустити якість на самоплив. Що ж стосується витрат на внутрішні та зовнішні дефекти (витрати на невідповідності) - їх можна і потрібно зробити якомога меншими.

Із табл. 6.1 видно, що приблизно 50...80 % усієї вартості якості становлять витрати на виробництво і подальше виправлення браку. Тому виробник повинен зосередити свою увагу на повному виключенні дефектів. Саме тому японці ставлять кінцеву мету «нульового дефекту». Але це, звісно, не означає, що в будь-якій ситуації в будь-який час внутрішні та зовнішні втрати (витрати на невідповідність) у них близькі до нульових. Для того щоб уникати невиправданих витрат, виробник повинен робити, як кажуть японці, «правильні речі правильно, в потрібний час, у потрібному місці і з першого разу».

Модель оптимальної вартості якості з часом зазнавала певних змін.

Спочатку вартість якості визначалася витратами виробника на контроль і превентивні дії щодо забезпечення необхідної споживачем якості, які зростали з необхідністю поліпшення якості продукції. Причому було прийнято вважати, що абсолютна, 100 %-ва відповідність продукції технологічним умовам практично недосяжна через нескінченно великі витрати. Водночас вважалося, що витрати споживача на експлуатацію поставленого йому продукту зменшуються зі зростанням якості за рахунок зменшення витрат на виправлення невідповідностей і наближаються до нуля за 100 %-го рівня якості. Тому можна говорити про оптимальний рівень якості, що відповідає мінімуму вартості якості як для постачальника, так і для споживача [132] (рис. 6.3, а).

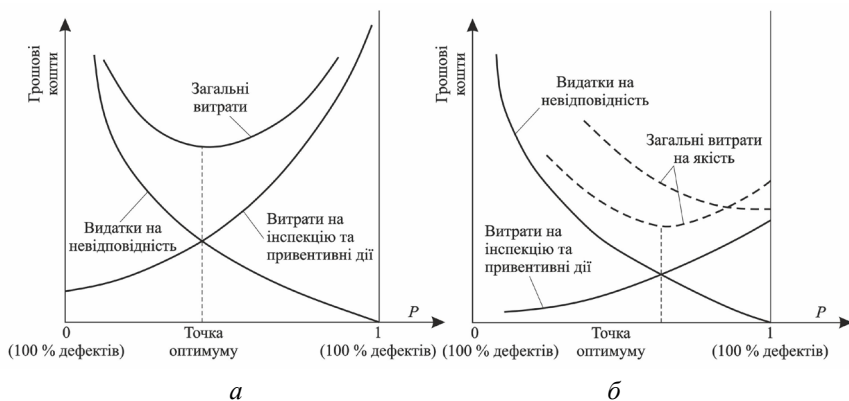


Рис.6.3 - Моделі оптимальної вартості якості:

а – традиційна модель; *б* – сучасна модель

Тут по осі абсцис відкладено ймовірність бездефектності продукції $P = (N - D) / N$, де N – обсяг продукції (кількість одиниць готової продукції), D – кількість дефектних одиниць продукції. За відсутності дефектних виробів у готовій продукції $D = 0$, а отже, $P = 1$, що відповідає 100 %-вій якості готової продукції (100 % якості). Якщо ж уся готова продукція є дефектною, тобто $D = N$, то $P = 0$ (100 % дефектів). Грошові кошти, витрачені виробником і споживачем на одиницю продукції, що відповідають певній якості,

відкладено на осі ординат. Загальні витрати на якість визначалися підсумовуванням витрат виробника і споживача.

Розвиток технології останніми роками призвів до створення виробництв, що забезпечують мінімальний розкид параметрів продуктів. У результаті виявилось можливим виготовити продукти без дефектів. У цьому разі витрати виробника на контроль і превентивні дії стають кінцевою величиною за умови абсолютної, 100 %-вої відповідності продукту технічним умовам (рис. 6.2, б).

Слід зазначити також і той факт, що поліпшення якості (зростання P) унаслідок технічного прогресу зазвичай означає збільшення продажів, а отже, вищі прибутки для виробника, що фактично зсуває криву загальних витрат на якість праворуч (рис. 6.3, б), і вартість якості в межі стає мінімальною (штрихова лінія витрат на рис. 6.3, б) за умови 100 %-вого рівня якості.

6.5.2. Класифікація та облік витрат підприємства на контроль якості

У сьогоденній практиці витрати на якість поділяють на дві категорії. По-перше, це витрати, що характеризують спроби забезпечити і гарантувати належний рівень якості продукції, тобто витрати, пов'язані з досягненням відповідності якості (витрати на запобігання і витрати на контроль та оцінку). По-друге, це витрати, пов'язані з відновленням якості, тобто витрати на невідповідність якості (витрати, пов'язані з внутрішніми відмовами і зовнішніми відмовами).

Для здійснення точного аналізу розподілу і динаміки витрат на контроль якості за конкретними підприємствами необхідний цільовий облік витрат на контроль якості виробів з відображенням на спеціальному рахунку як загального їх розміру, так і основних складових отриманої суми. Для широкого впровадження на підприємствах системи обліку витрат на контроль якості продукції у відповідному стандарті підприємства мають бути чітко й однозначно визначені основні напрями витрат з технічного контролю, методи збирання необхідної інформації, правила її опрацювання та аналізу, строки подання розрахунків і відповідальні виконавці.

Основні витрати на контроль складаються з: контролю та випробувань продукції; перевірки та випробувань матеріалів, що постачаються; матеріалів для тестування та перевірок; контролю процесу; приймання продукції у замовника; перевірки сировини та запасних частин; аудиту продукту. Крім того, слід виділити витрати пов'язаних з якістю, спрямовані на витрати профілактики, контролю та помилок.

- **Контроль і випробування.** Сюди входить оплата інспекторів і випробувального персоналу, під час планових перевірок виробничих операцій.

- **Перевірки та випробування матеріалів, що постачаються:** оплата робіт інспекторів і випробувального персоналу, пов'язаних із закупленими в постачальників матеріалами, включно з інспекторами та службовцями різного рівня; витрати на лабораторні випробування, які виконують для оцінювання якості матеріалів, що постачаються; витрати, пов'язані з роботою інспекторів і випробувального персоналу, що проводять оцінку матеріалів на виробництві постачальника.

- **Матеріали для тестування і перевірок:** вартість витратних матеріалів, що використовуються під час контролю і випробувань; вартість матеріалів, стандартних зразків, еталонів тощо, підданих руйнівному контролю.

- **Контроль процесу:** оплата праці персоналу, який не підпорядковується керуючому з якості, що виконує контроль і випробування на виробничих лініях.

- **Приймання продукції замовника:** витрати на запуск і тестування готової продукції на виробництві для здавання її замовнику перед постачанням; витрати на приймальні випробування продукції у замовника до її здавання.

- **Перевірка сировини і запасних частин:** витрати на контроль і випробування сировини, запасних частин тощо, пов'язані зі зміною технічних вимог проєкту, надмірним часом зберігання або невпевненістю, викликаною іншими проблемами.

- **Аудит продукту:** витрати на проведення аудиту якості технологічних операцій або в процесі виробництва, або за кінцевим продуктом; витрати на всі випробування на надійність, що проводяться на вироблених виробах; витрати на підтвердження якості продукту зовнішніми

органами, такими як сертифікаційні органи, страхові компанії, урядові органи тощо.

- Витрати профілактики (попередження) визначаються видами діяльності, які спеціально здійснюються, щоб уникнути відхилень від необхідної якості.

- Витрати з помилок є результатом дій, які спричинені недостатньою відповідністю товарів і послуг нормам, стандартам і вимогам. Залежно від місця виникнення помилок витрати класифікують на внутрішні (наприклад, на додаткову обробку) і зовнішні (наприклад, на гарантійне обслуговування).

Слід зазначити, що основний обсяг витрат на контроль становить оплата праці персоналу, зайнятого контролем і випробуваннями. Це може становити навіть 80...90 % усіх витрат на контроль, і ці витрати можуть бути визначені досить точно. Витрати, що залишилися, в основному пов'язані з вартістю використовуваних матеріалів, закупівлями і з вартістю технічного обслуговування. Вони можуть бути визначені безпосередньо. Отже, можна отримати досить точну картину щодо витрат на контроль.

Насправді дуже складно виключити витрати на якість. Можна і потрібно прагнути до мінімізації витрат. Але не всі витрати на якість слід мінімізувати. Так, витрати, пов'язані з попередженням дефектів, є необхідними, оскільки дають змогу скорочувати інші групи витрат. Прикладом може слугувати підготовка персоналу з питань якості. Якщо керівництво не шкодує грошей на цю статтю витрат, то, як правило, витрати на внутрішні та зовнішні відмови суттєво скорочуються.

До витрат, яких можна і потрібно уникати, належать: невикористані матеріали; доопрацювання або перероблення дефектів; затримки, зайвий виробничий час, спричинені дефектною продукцією; додаткові перевірки та контроль для виявлення вже відомого відсотка дефектів; ризики, зокрема й щодо гарантійних зобов'язань; втрати продажів, пов'язані з незадоволеністю споживача.

Таким чином, існують витрати, яких необхідно уникати, і неминучі витрати, які використовуються для підтримки досягнутого рівня якості.

6.5.3. Шляхи оптимізації витрат на оцінку та контроль якості

Витрати на якість визначаються насамперед витратами, пов'язаними з реалізацією стадій життєвого циклу продукції. Це витрати на маркетингові дослідження, науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, виробництво, доставку і монтаж, а також технічне обслуговування. Витрати на якість можуть бути як зовнішніми, так і внутрішніми. Внутрішні витрати визначаються внутрішньою діяльністю і витратами, пов'язаними з продукцією. Зовнішні становлять витрати, пов'язані з постачальниками, споживачами, агентами, дилерами тощо.

Витрати на якість мають велике значення, оскільки практично вони завжди досить високі й означають зниження прибутку та втрату замовлень. Витрати, пов'язані з якістю, мають широкий спектр і визначаються відмовами систем, браком, переробкою, пізньою доставкою, скаргами з обслуговування та гарантії, відгуком про продукцію тощо.

Нині інтерес до цієї категорії витрат дуже зріс. Це пов'язано насамперед із постійно зростаючою конкуренцією, яка змушує виробників вживати різних заходів щодо мінімізації витрат. Численні дослідження та інформаційні опитування, проведені компаніями, показали, що витрати, пов'язані з якістю, зазвичай лежать у діапазоні від 5 до 25 % від загального торговельного обороту. Роблять продукцію дорогою саме зайві витрати, тобто ті витрати, яких можна уникнути. Визначити, які витрати є зайвими можна за допомогою вимірювання. Вимірювання витрат дає змогу виділити заходи, пов'язані з якістю продукції на різних стадіях життєвого циклу продукції. Це дає можливість розглядати якість як параметр ділової активності. Вимірювання витрат на якість фокусує увагу на високовитратних галузях і відкриває потенційні можливості зниження витрат. Це дає змогу оцінити діяльність і дає основу для порівняння між собою різної продукції (товарів або послуг), процесів і підрозділів. Вимірювання є першим кроком на шляху до управління.

У сьогоdnішній практиці витрати на якість поділяють на дві категорії. По-перше, це витрати, що характеризують спроби забезпечити і гарантувати належний рівень якості продукції, тобто витрати, пов'язані з досягненням відповідності якості (витрати на запобігання і витрати на контроль та оцінку). По-друге, це витрати, пов'язані з відновленням якості, тобто витрати на

невідповідність якості (витрати, пов'язані з внутрішніми відмовами і зовнішніми відмовами).

Оптимізація витрат на технічний контроль далеко не завжди адекватна простому зниженню витрат за всіма статтями внаслідок ослаблення або посилення дії певних чинників, що впливають на ці витрати. Нерідко найбільшого ефекту можна досягти в результаті: а) зміни структури витрат; б) правильного визначення операцій технологічного процесу і параметрів продукції, що піддаються контролю; в) нормування окремих елементів витрат з оцінки та регулювання якості виробів.

Для оптимізації витрат на технічний контроль і підвищення ефективності перевірок завдяки зміні технології контролю необхідно виявляти основні причини і місця виникнення найсерйозніших і найбільш часто повторюваних дефектів продукції.

Витрати на контроль можуть включати деякі додаткові витрати. Це витрати на необґрунтований контроль, без якого можна було б обійтися. Приклади таких витрат на контроль особливо часто трапляються під час: контролю документації на точність перед її схваленням (зазвичай прийнятним є наближення $\pm 10\%$ під час оцінювання якості підготовленої документації); інспекційного входного контролю, обсяг якого можна значно скоротити або повністю виключити, якщо у якості постачальників обрано достатньо надійних партнерів, у яких був проведений попередній аудит якості та надалі можна вірити отриманій від них інформації щодо якості матеріалів, які постачають; проміжної перевірки продукту, який поставляють; проміжної перевірки продукції [132].

Найбільшу ймовірність появи витрат на контроль містять у собі витрати на поопераційний контроль процесу і приймально-здавальний контроль продукції. Для зменшення ймовірності появи витрат на цей вид контролю необхідні такі дії:

1. Визначити необхідні показники якості (*IQ* – *index quality*) для кожного етапу виробництва продукту. На рис. 6.4 це показано на прикладі виробництва комп'ютерів. Показник якості *IQ* (наприклад, % дефектних виробів) готового продукту встановлює споживач, і залежно від його побажання встановлюються необхідні *IQ* для кожного етапу (підпроцесу) планованого процесу створення продукту.

2. Виявити можливості практичної реалізації необхідних IQ для кожного субпроцесу, що входить у процес створення продукту. Цей аналіз проводить менеджер з якості спільно з учасниками відповідних субпроцесів та їхніми постачальниками.

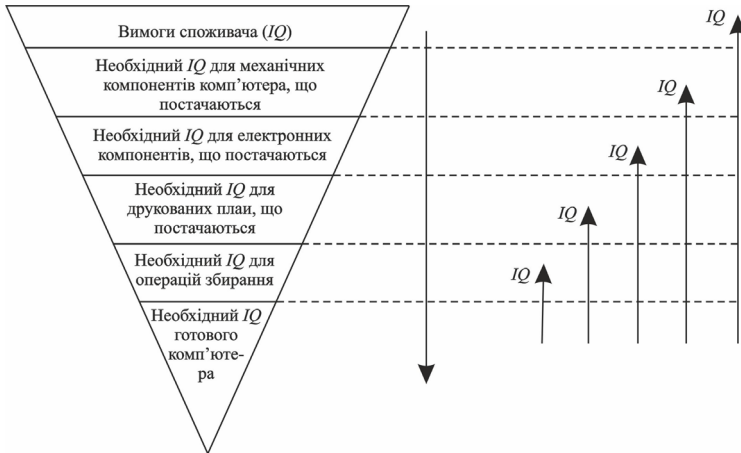


Рис. 6.4. Послідовність визначення необхідних кількісних показників якості (IQ) для кожного етапу процесу виробництва

3. Вирішити питання про необхідність контролю виходу кожного підпроцесу. Це або введення 100 %-го контролю на виході того чи іншого етапу, або вибіркового контролю через певні проміжки часу, або відсутність вихідного контролю. Так, наприклад, якщо якість матеріалів, що надходять від постачальників, комплектуючих, механічних елементів і електронних компонентів комп'ютера відповідає необхідному IQ , то немає необхідності в їхньому контролі, як це показано на рис. 6.5. Водночас, як видно з цього ж малюнка, якість підпроцесу «виготовлення і складання друкованих плат» за результатами випробувань дає $IQ = 20$ %. Менеджер з якості після аналізу підпроцесу встановлює за погодженням з його учасниками 100 %-вий вихідний статистичний контроль (*Statistical Quality Control – SQC*) і рівень приймальної якості (*Appraisal Quality Level – AQL*) зібраних друкованих плат, що відповідає $IQ = 3$ %. Такий рівень AQL (утричі гірший, ніж очікуваний

кінцевим споживачем) менеджер із якості встановив, мабуть, з огляду на технічні можливості цього підпроцесу і ресурси компанії. Крім цього, враховували, мабуть, низький рівень якості ($IQ = 10 \%$) подальшого підпроцесу «збирання комп'ютерів» і необхідність введення 100 %-го контролю готової продукції після нього з метою забезпечення рівня AQL , який відповідає вимозі споживача, тобто $IQ = 1 \%$.

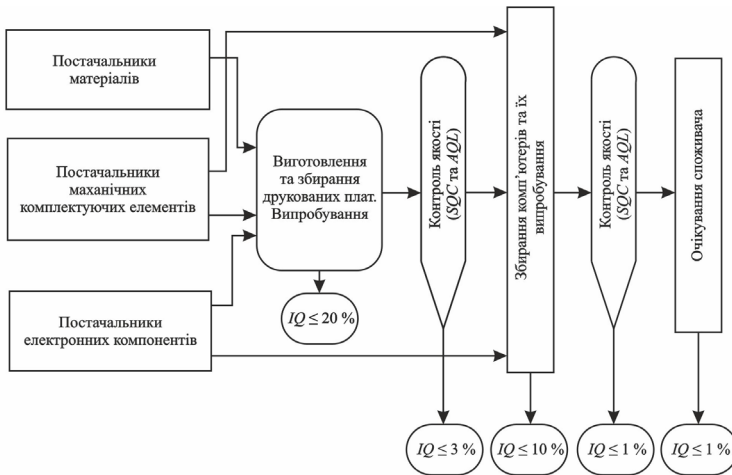


Рис. 6.5. Схема запровадження контролю якості залежно від результатів порівняння реального і необхідного IQ

Замість оцінки якості за рівнем AQL може застосовуватися метод послідовного контролю. Його суть полягає в такому. Якщо під час контролю кожної другої деталі брак не виявляється, то переходять до контролю, наприклад, кожної четвертої деталі, що надходить на вихід. За відсутності дефектів, що триває, переходять до контролю кожної десятої деталі і т. д. Якщо в якійсь деталі буде виявлено брак, то, починаючи з неї, контролюють усі деталі, що надходять, доти, доки не переконаються, що брак відсутній. Тоді знову переходять на контроль кожної другої деталі, і процес зменшення частоти контролю повторюється після того, коли брак відсутній.

Одним із першорядних чинників оптимізації витрат на контроль якості продукції є аналіз і вдосконалення кількісного складу служб технічного

контролю, тому що вже було сказано вище, що 80...90 % усіх витрат на контроль якості продукції становлять витрати на оплату праці працівників цих служб, які охоплюють витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати, відрахування на соціальне страхування, а також окремі види надбавок і премій.

Удосконалення систем технічного контролю, що використовуються, має передбачати також уведення повсюдного нормування трудомісткості контрольних операцій, упровадження в практику планування типових нормативів витрат усіх видів матеріальних і фінансових ресурсів, використовуваних для забезпечення процесів контролю якості.

6.5.4. Внутрішньовиробничі та зовнішні непродуктивні витрати і втрати при незадовільному контролі якості

Окремо розглянемо непродуктивні витрати, втрати і збитки підприємства, що виникають безпосередньо у виробництві (внутрішньовиробничі) і в невиробничій сфері (невиробничі) через незадовільне проведення робіт з контролю якості продукції.

До прямих непродуктивних витрат, втрат і збитків підприємства, що виникають безпосередньо у виробництві через незадовільне проведення робіт з контролю якості продукції службами технічного контролю підприємства, належать:

- витрати через невиявлений вчасно брак, куди входять вартість додаткових робіт з виявлення та усунення браку у виробках, повернутих на виправлення з виробничих цехів підприємства через дефекти сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів тощо, не виявлені своєчасно підрозділами вхідного контролю;

- вартість додаткових робіт з виявлення та усунення браку у виробках, повернутих на виправлення з цехів подальшої обробки до цехів-виготовлювачів через наявність дефектів, які не були виявлені своєчасно службою технічного контролю останніх;

- вартість виробів, остаточно забракованих через дефекти, зумовлені як використанням недоброякісної сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектувальних виробів тощо, так і попереднім пропуском на контролі.

До витрат через неправильне проведення контролю також належать:

- вартість відновлення (ремонт) або заміни сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів і готової продукції, зіпсованих унаслідок неправильного проведення контролю;

- вартість ремонту або заміни контрольно-випробувального обладнання, вимірювальних приладів та інструменту, а також пристосувань і оснащення, зіпсованих унаслідок неправильного проведення контролю;

- вартість придатних сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів тощо, а також самої готової продукції, помилково забракованих контролерами;

- вартість додаткових робіт з оцінки якості та розбракування деталей і виробів унаслідок неправильного або нечіткого таврування придатної продукції та браку на попередньому етапі контролю;

- втрати через неправильне маркування і порушення правил ізоляції виявленого браку, що спричинили його ненавмисне використання при виготовленні продукції;

- додаткові втрати підприємства в разі несвоєчасного вжиття заходів працівниками служб технічного контролю щодо локалізації та усунення масового браку аж до зупинки виробництва;

- збитки від перевитрати матеріальних ресурсів, простоїв, у т.ч. збитки від перевитрати сировини, матеріалів, палива, енергії та інших видів ресурсів при здійсненні контролю якості продукції;

- збитки від простоїв контрольно-випробувального обладнання та робітників-контролерів, що виникають унаслідок необґрунтованої затримки контролю;

- збитки від простоїв технологічного обладнання та основних виробничих робітників, що виникають у результаті необґрунтованої затримки виробництва з вини служби контролю якості підприємства.

До непродуктивних витрат, втрат і збитків підприємства, що виникають у невиробничій сфері через незадовільне проведення робіт з контролю якості продукції, належать також: збитки від порушення строків та обсягів постачання продукції споживачам унаслідок необґрунтованої затримки контролю якості й відвантаження готових виробів службою технічного контролю; вартість додаткових робіт із виявлення й усунення браку у виробах, повернутих споживачем через низьку якість; додаткові

понадпланові витрати на гарантійні роботи; вартість додаткових витрат на ремонт продукції; вартість додаткових витрат з контролю якості продукції.

Ліквідація або значне скорочення перерахованих вище непродуктивних витрат і збитків, що виникають на підприємстві в результаті незадовільного проведення робіт з контролю якості продукції, може забезпечити вдосконалення використовуваної системи технічного контролю. А це, безсумнівно, призведе до істотного підвищення ефективності контролю і виробництва в цілому [133].

6.5.5. Результативність витрат на якість

З метою виявлення результативності витрат на якість їх класифікують на продуктивні та непродуктивні. При цьому до продуктивних витрат відносять усі ті витрати, за допомогою яких досягається виконання функцій, пов'язаних із забезпеченням, поліпшенням та управлінням якістю. Непродуктивні – це витрати, які є непотрібними або зайвими. Наприклад, за високого рівня організації виробництва та дієвого самоконтролю витрати на проведення додаткового контролю технологічної складової можуть виявитися непотрібними. Ці витрати не слід ототожнювати з втратами від неналежного рівня якості продукції або низької якості її виготовлення. Однак логічніше, виходячи з результативності, витрати ділити на продуктивні та втрати, при цьому всередині групи втрат виділяти причини їх виникнення. Зайва робота, а отже, і витрати на неї є втратами, яких за нормальної організації праці та виробництва бути не повинно.

Витрати на якість пов'язані не тільки з виробництвом продукції, а й з управлінням цими виробництвами. Загальні витрати, пов'язані з якістю продукції, можна розділити на науково-технічні, управлінські та виробничі. Науково-технічні та управлінські готують, забезпечують і контролюють умови виробництва якісної продукції, тобто зумовлюють наявність і величину виробничих витрат.

У загальному випадку управлінські витрати, пов'язані з гарантією якості виробу, включають у себе:

- транспортні (зовнішні та внутрішні перевезення сировини, комплектуючих і готової продукції). Вони поділяються на організаційні, що забезпечують безперебійну роботу транспорту, взаємоузгодженість

можливості та необхідності повноти його завантаження; технічні, що включають вартість транспортних засобів, цехів і під'їзних шляхів і витрати на персонал транспортних підрозділів - його набір і оплату праці;

– постачальні (закупівля запланованої за видами, кількістю та якістю сировини і комплектуючих матеріалів). Їх можна поділити на матеріальні - відповідність фактичних матеріальних ресурсів запланованим; технічні, які стосуються закупівлі необхідного устаткування та інших видів основних фондів виробничого призначення і для цілей управління підприємства; і витрати на персонал постачальницьких підрозділів, від діяльності та компетентності якого залежить у подальшому виконання виробничої програми;

– витрати на підрозділи, що контролюють виробництво;

– витрати, пов'язані з роботою економічних служб, від діяльності яких залежить якість продукції: плановий відділ (своєчасне складання планів), фінансовий (своєчасне забезпечення проєкту фінансовими ресурсами), бухгалтерія (виписка рахунків) тощо;

– витрати на діяльність інших служб апарату управління підприємством, які різною мірою пов'язані та впливають на забезпечення якості продукції, особливо управління кадрами, до функцій якого входить набір персоналу, підвищення його кваліфікації та перевірка відповідності необхідному рівню та умовам.

Виробничі витрати, своєю чергою, можна розділити на матеріальні, технічні та трудові. Причому всі вони прямо відносяться до вартості продукції. І якщо величину управлінських витрат у витратах на якість можна визначити лише умовно, опосередковано, то розмір матеріальних виробничих витрат піддається прямому рахунку. Значно простіше, ніж управлінські, розрахувати розмір технічних виробничих витрат - через амортизаційні відрахування і трудових - через заробітну плату (оплату нормогодин).

З метою управління витратами, пов'язаними із забезпеченням якості продукції, треба розрізняти базові, що утворюються в процесі розроблення, освоєння і виробництва нової продукції і є надалі до моменту її зняття з виробництва їхнім носієм, і додаткові, пов'язані з її вдосконаленням та відновленням загубленого (недоотриманого порівняно із запланованим) рівня якості.

Основна частина базових витрат відображає вартісну величину чинників виробництва, а також загальногосподарські та загальновиробничі витрати, що відносяться на виготовлення конкретного виробу через кошторис витрат.

Додаткові витрати включають у себе витрати на оцінку і витрати на запобігання дефектам.

До перших належать витрати, які несе підприємство для того, щоб визначити, чи відповідає продукція запланованим технічним, екологічним, ергономічним та іншим умовам. Зазвичай їх неважко розрахувати. Частково вони включають витрати на контролюючий персонал, спеціальне обладнання та накладні витрати відділу технічного контролю (відділу якості). Іншу частину становлять витрати на інформацію у сфері реалізації продукції, на вивчення думки споживача щодо якості продукції, а саме: розробку, організацію та проведення спеціальних вибірових обстежень, включно з інструментарієм і витратами на оплату персоналу.

До других належать витрати на доопрацювання й удосконалення продукції, що не відповідає стандартам, кращим світовим зразкам, вимогам покупця, на перевірку, ремонт, удосконалення інструменту, оснащення, техніки і технології, а в окремих випадках і на зупинку виробництва. До цієї групи слід включити витрати на впровадження системи управління якістю, зокрема її технічне забезпечення, розроблення стандартів, витрати на документацію, на персонал: його підбір, підготовку та оплату тощо.

Існує ще одна група витрат, які при їх виникненні слід відносити або до базових, або до додаткових залежно від новизни продукції. Це витрати на брак і його виправлення. Їхня величина може істотно коливатися і складатися як із витрат на виробництво забракованої надалі продукції за наявності непоправного браку, так і додатково до цього - витрат на його виправлення, якщо брак неостаточний, а може також містити оплату моральної та (або) фізичної шкоди, завданої споживачеві неякісною продукцією. В останньому випадку витрати, пов'язані з якістю продукції, а точніше, її відсутністю, можуть виявитися вельми великими.

6.5.6. Методи аналізу витрат на якість

Методи аналізу витрат на якість застосовуються з метою економічної ефективності забезпечення якості. До таких методів належать: ФВА, *QFD*, *FMEA*-аналіз, ФФА, бенчмаркінг та інші [132, 133].

Функціонально-вартісний аналіз (ФВА) являє собою системне поєднання правил, прийомів, процедур, орієнтованих на мінімізацію витрат у сферах проектування, виробництва та експлуатації за збереження або підвищення якості об'єкта. Фактично ФВА є технологією аналізу витрат на виконання виробом його функцій.

Система ФВА – це сукупність методів, націлених на задоволення потреб виробників і споживачів, що поєднують організаційно-економічні підходи, науково-методичні принципи, нормативно-технічні засоби, навчально-методичні прийоми.

Метод ФВА почав активно застосовуватися в промисловості з 1960-х рр., насамперед у США. Його використання дало змогу знизити собівартість багатьох видів продукції без зниження її якості та оптимізувати витрати на виготовлення. Зараз ФВА є одним із найпопулярніших видів аналізу витрат на якість продукції та процесів.

Реалізація ФВА передбачає орієнтир на такі принципи:

- відповідність значущості функцій і витрат, тобто розподіл витрат на реалізацію функцій об'єкта має здійснюватися пропорційно їхній значущості;
- відповідність реального параметра необхідному, що передбачає визначення кількісних параметрів, здатних однозначно характеризувати ступінь виконання (або невиконання) цих функцій;
- активізація творчого мислення, що характеризується створенням обстановки, яка максимально сприяє розвитку творчості;
- колективна праця, що реалізується шляхом організації дослідницької робочої групи (тимчасового творчого колективу фахівців різних професій і кваліфікації) для проведення аналізу;
- міждисциплінарний підхід, що передбачає залучення різних фахівців з метою використання їхніх знань, навичок і вмінь;
- застосування новітніх технологій для прийняття управлінських, технічних та організаційних рішень;

- прогнозування для виявлення динаміки зміни досліджуваного об'єкта.

Під час проведення функціонально-вартісного аналізу визначають функції технічного об'єкта або системи і проводять оцінку витрат на реалізацію цих функцій, для того щоб ці витрати знизити. ФВА може бути задіяний при вирішенні таких проблем:

- підвищення якості продукції за рахунок удосконалення продукції;
- досягнення оптимального співвідношення «якість - ціна»;
- зниження собівартості продукції;
- скорочення або ліквідація браку;
- усунення вузьких місць і диспропорцій у виробництві продукції.

Функціональність означає розгляд товару як комплексу виконуваних функцій.

Системність передбачає вивчення кожної функції продукту як самостійної системи, що реалізується сукупністю матеріальних елементів і зв'язків між ними, з одного боку, і як частини системи вищого порядку - з іншого.

Економічність означає необхідність аналізу витрат на функції продукції та їх матеріальні носії на всіх стадіях життєвого циклу продукту (від проєктування до експлуатації).

Принцип творчості у ФВА пов'язаний із необхідністю активізації колективної роботи над продукцією, що передбачає наявність не тільки індивідуальної, а й колективної творчості. Існують три форми ФВА.

1. Коригувальна (використовується при вдосконаленні раніше створених продуктів).
2. Творча (застосовується під час проєктування нової продукції).
3. Інверсна (використовується під час пошуку нових сфер застосування продукції, уніфікації продукції).

ФВА, що використовується з метою вдосконалення якості об'єкта аналізу, можна визначити як процес послідовної побудови низки специфічних моделей аналізованого об'єкта, що дають змогу дослідити характер взаємодій між елементами об'єкта, а також взаємодії об'єкта з надсистемою і навколишнім середовищем.

ФВА включає такі основні етапи.

- Послідовна побудова моделей об'єкта ФВА.
- Дослідження моделей і розробка пропозицій щодо вдосконалення об'єкта аналізу.

Під час проведення ФВА будують такі різновиди моделей:

- компонентна модель (КМ) – систематизований перелік матеріальних компонентів об'єкта із зазначенням елементів надсистеми;
- потокова модель (ПМ) – графічне відображення характеру зв'язків між компонентами аналізованої системи в процесі їхнього функціонування; - функціональна модель (ФМ) – умовне графічне зображення складу і взаємодії функцій об'єкта;
- функціонально-ідеальна модель (ФІМ) – модель удосконаленого об'єкта, позбавленого всіх або частини шкідливих функцій і небажаних ефектів, виявлених на попередніх етапах ФВА (за збереження або вдосконалення корисних функцій).

Ціна продукції є одним із найважливіших елементів її конкурентоспроможності, тому функціональний аналіз доповнюється вартісним, що дає змогу оцінити витрати на реалізацію функцій продукції у виробництві та під час експлуатації.

Під час аналізу готової продукції виникають два варіанти розв'язання задачі: виконання матеріальним носієм однієї функції та виконання матеріальним носієм кількох функцій.

У першому випадку витрати на функцію визначаються собівартістю відповідного матеріального носія (деталі, блоку тощо).

У другому випадку витрати розподіляються між функціями пропорційно участі носія в реалізації функцій, що визначається експертним методом. Виробничі витрати на функцію визначаються за формулою:

$$\sum_{i=1} S_{Fj} = \sum_{n_i=1} a_{ij} S_{mn_{ij}}, \quad (6.3)$$

де a_{ij} – участь носія функції в її реалізації (частка одиниці, % тощо);

$S_{mn_{ij}}$ – собівартість (прямі витрати) матеріального носія на j -ту функцію;

n – кількість матеріальних носіїв, що забезпечують j -ту функцію.

Сума витрат за всіма функціями і витрат на зв'язки між носіями функцій, що реалізуються під час складально-монтажних операцій, становить витрати на виріб загалом.

Складнішим видається завдання вартісного оцінювання функцій проєктованого виробу, яке вирішують в умовах відсутності повної інформації на основі визначення допустимих витрат на функції з урахуванням споживчої значущості функцій і ступеня складності виробничого виконання за заданого рівня якості.

Визначення укрупнених витрат на виріб загалом можливе різними методами (моделюванням, методом питомих витрат, структурної аналогії тощо).

Оцінювання варіантів рішень, отриманих у результаті *FDA*, проводиться за критерієм інтегральної якості:

$$k_{\Sigma} = (Q/C) \rightarrow \max, \quad (6.4)$$

де Q – комплексний показник якості;

C – сукупні витрати на виріб.

Функції, що виконуються продукцією та її елементами, можна згрупувати за кількома параметрами.

За сферою прояву функції поділяють на зовнішні та внутрішні. Зовнішні – це функції, які виконує об'єкт під час його взаємодії із зовнішнім середовищем. Внутрішні – функції, які виконують будь-які елементи об'єкта та їхні зв'язки в межах об'єкта.

За роллю в задоволенні потреб серед зовнішніх функцій розрізняють головні та другорядні. Головна функція відображає головну мету створення об'єкта, а другорядна – побічну.

За роллю в робочому процесі внутрішні функції можна поділити на основні та допоміжні. Основна функція підпорядкована головній і обумовлює працездатність об'єкта. За допомогою допоміжних реалізуються головні, другорядні та основні функції.

За характером появи всі перераховані функції поділяють на номінальні, потенційні та дійсні. Номінальні функції задають під час формування, створення об'єкта, вони обов'язкові для виконання. Потенційні відображають можливість виконання об'єктом будь-яких функцій у разі зміни умов його експлуатації. Дійсні функції - це фактично виконувані об'єктом функції.

Усі функції об'єкта можуть бути корисними і непотрібними, а останні - нейтральними і шкідливими. Класифікація функцій представлена на рис. 6.6.

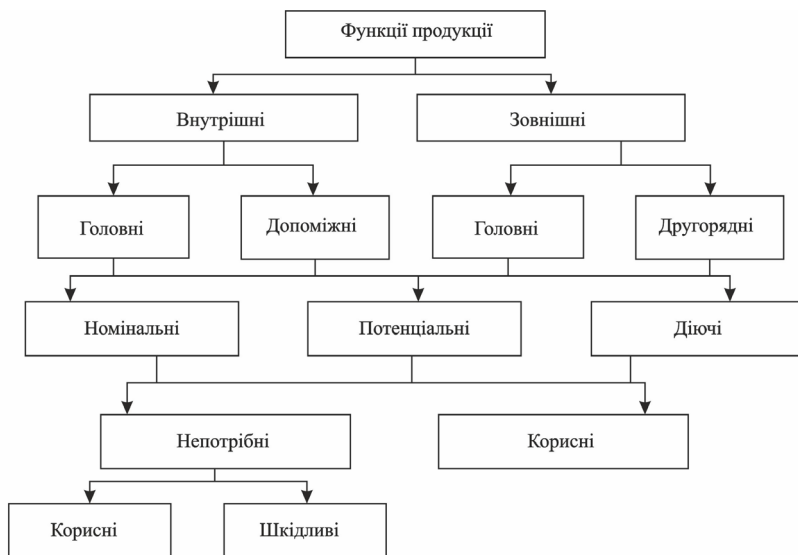


Рис. 6.6. Класифікація функцій продукції

Мета функціонально-вартісного аналізу полягає в розвитку корисних функцій об'єкта за оптимального співвідношення між їхньою значущістю для споживача та витратами на їхнє здійснення, тобто виборі найсприятливішого для споживача та виробника, якщо йдеться про виробництво продукції, варіанта розв'язання задачі про якість продукції та її вартість. Математично мету ФВА можна записати так:

$$CB/B \rightarrow \max, \quad (6.5)$$

де СВ – споживча вартість аналізованого об'єкта, виражена сукупністю його споживчих властивостей;

В – витрати на досягнення необхідних споживчих властивостей.

Функціонально-вартісний аналіз проводять у п'ять етапів.

На **першому підготовчому етапі** уточнюють об'єкт аналізу – носій витрат. Це особливо важливо за обмеженості ресурсів виробника, наприклад, визначення, розробка або вдосконалення продукції, що випускається в масовому порядку, можуть принести підприємству значно більше вигод, ніж дорожчого товару, виробленого дрібносерійно, і завершується, якщо знайдено варіант із низькою, порівняно з іншими, собівартістю і високою якістю.

На **другому інформаційному етапі** збираються дані про досліджуваний об'єкт (призначення, техніко-економічні характеристики) і складові його блоки, деталі (функції, матеріали, собівартість). Вони йдуть кількома потоками за принципом відкритої інформаційної мережі. У неї інформація щодо поліпшення якості виробу і зниження витрат на його виробництво надходить із конструкторських, економічних підрозділів підприємства і від споживача до керівників відповідних служб. Оцінки та побажання споживачів акумулюються в маркетинговому відділі. У процесі роботи вихідні дані обробляються, перетворюючись у відповідні показники якості та витрат, проходячи всі зацікавлені підрозділи, і надходять до керівника проєкту.

На **третьому аналітичному етапі** детально вивчаються функції виробу (їхній склад, ступінь корисності), його вартість і можливості її зменшення шляхом відсікання другорядних і непотрібних. Це можуть бути не тільки технічні, а й органолептичні, естетичні та інші функції товару або його комплектуючих деталей.

Результатом проведеного ФВА є варіанти рішення, в яких необхідно зіставити сукупні витрати на продукцію, що є сумою поелементних витрат, з якою-небудь базою. Цією базою можуть, наприклад, слугувати мінімально можливі витрати на товар. Теорія ФВА пропонує обчислювати економічну його ефективність, яка показує, яку частку становить зниження витрат у їх мінімально можливій величині.

$$K_{\text{ФВА}} = (C_B - C_{\text{ф.н.}}) / C_{\text{ф.н.}}, \quad (6.6)$$

де $K_{\text{ФВА}}$ – економічна ефективність ФВА (коефіцієнт зниження поточних витрат);

C_B – сукупні витрати, що реально склалися;

С_{ф.н.} – мінімально можливі витрати, відповідні спроектованому виробу.

На **четвертому дослідницькому етапі** оцінюють запропоновані варіанти розробленого товару.

На **п'ятому рекомендаційному етапі** відбирають найприйнятніші для цього виробництва варіанти розроблення й удосконалення товару.

Метод *QFD* (*Quality Function Deploement*) – розгортання функцій якості.

Для сучасного глобального ринку товарів і послуг вирішального значення набуває конкурентна складова якості, для якої основними цілями є:

- підвищення ефективності виробництва, зокрема, зниження витрат на розробку якісної конкурентної продукції;
- орієнтація всіх стадій виробничого процесу, починаючи від розробки, на задоволення споживачів;
- підвищення ділової культури і поліпшення управління в усіх ланках виробництва.

Для того щоб виконати ці вимоги, потрібно використовувати нову технологію розроблення, планування і технічної підготовки виробництва виробів. Така технологія розроблялася в Японії починаючи з кінця 1960-х рр. і зараз дедалі ширше використовується в різних країнах світу. Одним з основних інструментів цієї технології є метод *QFD*. Це експертний метод, що використовує табличний спосіб представлення даних, причому зі специфічною формою таблиць, які отримали назву «будиночків якості».

Основна ідея технології *QFD* полягає в тому, що між споживчими властивостями (фактичними показниками якості) і нормованими в стандартах, технічних умовах параметрами продукту (допоміжними показниками якості) існує велика відмінність. Наприклад, однією зі споживчих властивостей обсадних труб є міцність і герметичність різьбового з'єднання. Це фактичний показник якості обсадної труби. Щоб забезпечити цей фактичний показник, виробник використовує такі параметри, як межа міцності матеріалу труби на розрив, діаметр, товщину стінки, параметри різьблення на трубах і муфтах тощо. Це допоміжні показники якості, які важливі для виробника, але не завжди істотні для споживача. В ідеальному випадку виробник може проконтролювати якість продукції безпосередньо за

фактичними показниками, але це, як правило, неможливо, тому він користується допоміжними показниками.

Технологія QFD – це послідовність дій виробника з перетворення фактичних показників якості товару на технічні вимоги до продукції, процесів та обладнання. Основним інструментом технології QFD є таблиця спеціального виду, що отримала назву «будиночок якості». У цій таблиці зручно відображати зв'язок між фактичними показниками якості (споживчими властивостями) і допоміжними показниками (технічними вимогами).

Основні етапи технології QFD включають:

- Розроблення плану якості та проєкту якості. На цьому етапі проводять дослідження стану ринку та запитів споживачів, встановлюють, що слід виробляти. З урахуванням інших важливих параметрів ринку розробляється таблиця вимог споживачів до якості. Встановлюються основні вимоги та маркетингові параметри продукції. Аналізуються та оцінюються виробни конкурентів. На цій основі складається план за якістю, в якому відображаються маркетингові рейтинги розроблюваного виробу. Визначається важливість (рейтинг) кожної зі встановлених вимог щодо якості. Визначаються компоненти виробу, на підставі аналізу продукції конкурентів встановлюються технічні параметри компонентів, досліджуються рекламції та зауваження споживачів щодо якості. Досліджуються фактичні параметри якості і перетворюються на допоміжні параметри якості компонентів. На цій основі розробляється план з якості. Встановлюються методи забезпечення якості та випробувань продукту й елементів.

- Розроблення деталізованого проєкту якості та підготовку виробництва. На цьому етапі параметри якості кінцевого продукту перетворюються на параметри якості вузлів, які заносять до спеціальних таблиць для елементів і окремих таблиць для вузлів і складальних одиниць (до яких входять таблиці для окремих елементів). Остаточні встановлюються функції елементів і вузлів виробу, а також ознаки якості вузлів і стандарти, що їх визначають, плануються позиції контролю елементів і вузлів виробу в майбутньому виробничому процесі.

- Розробку техпроцесів. На цьому етапі розробляються техпроцеси і технологічні пристосування. При цьому для кожного техпроцесу зазвичай проводять ФВА. На основі результатів аналізу виробляється план процесу виробництва, який реалізує задану точність за мінімальних витрат. Затверджуються стандарти за якістю вузлів, стандарти на випробування і стандарти на покупні вироби, обираються постачальники і встановлюються стандарти на закупівлі.

- Для кожного технологічного модуля остаточно встановлюється перелік і характеристики технологічних операцій, позиції контролю якості, передусім для таких характеристик, як форма, розміри і міцнісні параметри продукції, а також позиції контролю якості, насамперед для таких характеристик, як форма, розміри і міцнісні параметри продукції. Визначаються фактори виробничого процесу, що впливають на ці характеристики якості. При цьому розробляється таблиця, в якій зіставляються ознаки якості кінцевого продукту і ознаки якості та умови роботи обладнання. Розробляються операційні карти технічного контролю і таблиця якості для остаточного складання (приймання) виробу. Після вибору засобів контролю розробляється система технічного контролю для обраних позицій контролю.

- Проводиться *FMEA*-аналіз виробничого процесу, методика проведення якого представлена далі. При цьому аналізуються як проєктні дані, так і дані досліджень, дані виробництва аналога, дані виготовлення дослідного зразка. Усі виявлені проблеми негайно передаються у відповідні відділи для прийняття рішення. Проводиться уточнення моделі якості (відображеної в таблицях) і коригування проєкту.

Така технологія роботи дає змогу враховувати вимоги споживача на всіх стадіях виробництва виробів, для всіх елементів якості підприємства і, таким чином, різко підвищити ступінь задоволеності споживача, знизити витрати на проєктування і підготовку виробництва виробів.

У сучасних умовах господарювання процес ухвалення управлінських рішень тактичного і стратегічного характеру базується на інформації про витрати і фінансові результати діяльності підприємства. Одним з ефективних інструментів в управлінні витратами підприємства є система обліку методом нормативного визначення витрат (стандарт-кост), в основі якої лежить

принцип обліку та контролю витрат у межах установлених норм і нормативів та за відхиленнями від них.

Метод нормативного визначення витрат виник на початку ХХ століття у США. Це був один із принципів наукового менеджменту, запропонованих Ф. Тейлором, Г. Емерсоном та іншими інженерами, які дали поштовх розвитку системи нормативного обліку витрат [134]. Вони застосовували стандарти, щоб виявити «єдиний найкращий шлях» використання праці та матеріалів. Стандарти забезпечували інформацією для планування ходу робіт так, що споживання матеріалів і праці зводилося до мінімуму. Уперше повну діючу систему нормативного визначення витрат у 1911 р. розробив і впровадив у США Г. Гаррісон [135].

Ідея стандарт-косту у Г. Гаррісона трансформувалася у два положення:

- усі вироблені витрати в обліку мають бути співвіднесені зі стандартами;

- відхилення, виявлені при порівнянні фактичних витрат зі стандартами, мають бути розчленовані за причинами.

З часу свого виникнення система обліку стандарт-кост успішно розвивалася і зараз широко використовується багатьма провідними фірмами країн із розвинутою ринковою економікою. Термін стандарт-кост складається з двох слів: «стандарт», що означає кількість необхідних виробничих витрат (матеріальних і трудових) для випуску одиниці продукції або заздалегідь обчислені витрати на виробництво одиниці продукції або надання послуг, а слово «кост» - це витрати, що припадають на одиницю продукції. Таким чином, стандарт-кост у повному розумінні слова означає витрати за стандартом. Ця система спрямована насамперед на контроль за використанням прямих витрат виробництва, а суміжні калькуляції – для контролю накладних витрат.

Система стандарт-кост задовольняє запити виробників і слугує дієвим інструментом для контролю виробничих витрат. На основі встановлених стандартів можна заздалегідь визначити суму очікуваних витрат на виробництво і реалізацію виробів, обчислити собівартість одиниці виробу для визначення цін, а також скласти звіт про очікувані доходи майбутнього року. За цієї системи інформація про наявні відхилення використовується керівництвом для прийняття оперативних управлінських рішень.

В основі системи стандарт-кост лежить попереднє (до початку виробничого процесу) нормування витрат за статтями витрат: основні матеріали; оплата праці основних виробничих робітників; виробничі накладні витрати (заробітна плата допоміжних робітників, допоміжні матеріали, орендна плата, амортизація обладнання та ін.); комерційні витрати (витрати зі збуту, реалізації продукції).

Попередньо обчислені норми розглядаються як твердо встановлені ставки, для того щоб привести фактичні витрати у відповідність до стандартів шляхом керівництва підприємством. У разі виникнення відхилень стандартні норми не змінюють, вони залишаються відносно постійними на весь установлений період, за винятком серйозних змін, спричинених новими економічними умовами, значним підвищенням або зниженням вартості матеріалів, робочої сили або зміною умов і методів виробництва. Відхилення між дійсними і передбачуваними витратами, що виникають у кожному звітному періоді, протягом року накопичуються на окремих рахунках відхилень і повністю списуються не на витрати виробництва, а безпосередньо на фінансові результати підприємства.

Схематично система обліку стандарт-кост має такий вигляд.

1. Виручка від продажу продукції.
2. Стандартна собівартість продукції.
3. Валовий прибуток (п. 1 - п. 2).
4. Відхилення від стандартів.
5. Фактичний прибуток (п. 3 - п. 4).

Калькуляція, розрахована за допомогою стандартних норм, є основою оперативного управління виробництвом і витратами. Виявлені в поточному порядку відхилення від установлених стандартних норм витрат піддаються аналізу для з'ясування причин їх виникнення. Це дає змогу адміністрації оперативно усувати неполадки у виробництві, вживати заходів для їх запобігання в майбутньому.

Слід зазначити, що система стандарт-кост у зарубіжній практиці не регламентована нормативними актами, у зв'язку з чим не має єдиної методики встановлення стандартів і ведення облікових регістрів. Навіть усередині однієї компанії діють різні норми: базисні, поточні, ідеальні, прогнозні, досяжні та полегшені.

Під час установалення норм широко використовують фізичні (кількісні) стандарти, що дають змогу виміряти в натуральному вираженні витрату матеріалу, кількість робочої сили та обсяг послуг, необхідних для виробництва цього виробу. Ці фізичні стандарти потім множать на коефіцієнти в грошовому обчисленні й отримують стандартні вартісні норми.

У зв'язку з тим, що накладні витрати охоплюють безліч окремих статей, частину яких важко або недоцільно вимірювати точно, стандарти накладних витрат дають у грошовій оцінці без зазначення кількісних норм. Виняток становлять найважливіші складові частини накладних витрат (наприклад, невиробнича заробітна плата), за якими в деяких випадках можуть встановлюватися кількісні стандарти.

В умовах ринкової економіки ціни на матеріали піддаються безперервним коливанням залежно від попиту і пропозицій. Тому стандарти на матеріали встановлюються здебільшого або виходячи з рівня цін, що діють на момент розроблення стандартів, або виходячи з визначення середніх цін, які переважатимуть протягом періоду використання норм. Відповідно стандарти ставок заробітної плати за операціями технологічного процесу часто є середніми розцінками.

Норми витрат матеріалів і виробничої заробітної плати встановлюються зазвичай у розрахунку на один виріб або масу продукції (тонна, кг). Для контролю за накладними витратами розробляють кошторисні ставки за певний період, виходячи з наміченого обсягу продукції. Кошториси накладних витрат мають постійний характер. Однак у разі коливань обсягу виробництва для контролю за накладними витратами створюють змінні стандарти та ковзні кошториси.

В основі встановлення ковзних кошторисів накладних витрат лежить класифікація витрат залежно від величини обсягу випуску на постійні, змінні та напівзмінні. Останні, своєю чергою, розбиваються на постійні та змінні складові елементи. У результаті кошторисна ставка (норма) накладних витрат визначається як сума змінної їхньої частини за заздалегідь встановленими нормами на одиницю обсягу випуску та постійних витрат.

Для обчислення стандартної собівартості продукції нормативні витрати на матеріали, робочу силу і накладні витрати підсумовують.

На підприємствах, що застосовують систему обліку стандарт-кост, облік відхилень фактичних витрат від стандартних норм ведуть, як правило, на таких рахунках.

1. «Відхилення за витратою матеріалів».
2. «Відхилення із заробітної плати».
3. «Відхилення за накладними витратами».
4. «Відхилення від стандартної комерційної собівартості».

За необхідності (наприклад, у разі відображення відхилень із підрозділом за причинами) кожен із цих рахунків може бути розчленований на більш дрібні аналітичні рахунки. Головне в стандарт-кості - контроль за найточнішим виявленням відхилень від установлених стандартів витрат, що сприяє вдосконаленню і самих стандартів витрат. За відсутності ж такого контролю застосування стандарт-косту матиме умовний характер і не дасть належного ефекту.

Принципи цієї системи є універсальними, тому їх застосування доцільне за будь-якого методу обліку витрат і способу калькулювання собівартості продукції.

Водночас цій системі притаманні свої недоліки. На практиці дуже важко скласти стандарти згідно з технологічною картою виробництва. Зміна цін, викликана конкурентною боротьбою за ринки збуту товарів, а також інфляцією, ускладнює обчислення вартості залишків готових виробів на складі та незавершеного виробництва. Стандарти можна встановлювати не на всі виробничі витрати, у зв'язку з чим на місцях завжди послаблюється контроль за ними. При виконанні виробничою компанією великої кількості різних за характером і типом замовлень за порівняно короткий час обчислювати стандарт на кожне замовлення практично неможливо. У таких випадках замість науково обґрунтованих стандартів на кожен виріб встановлюють середню вартість, яка є базисом для визначення цін на виріб.

Незважаючи на ці недоліки, керівники фірм і компаній використовують систему обліку стандарт-кост як потужний інструмент контролю за витратами виробництва і калькулювання собівартості продукції, а також для управління, планування та прийняття необхідних управлінських, технічних, організаційних та інших рішень.

Метод аналізу витрат на якість – FMEA-аналіз (*Failure Mode and Effects Analysis*). FMEA-аналіз являє собою технологію аналізу можливості виникнення дефектів та їх впливу на споживача. FMEA-аналіз проводять для розроблюваних товарів і процесів з метою зниження ризику споживача від потенційних дефектів.

FMEA-аналіз нині є однією зі стандартних технологій аналізу якості виробів і процесів, тому в процесі його розвитку вироблено типові форми представлення результатів аналізу та правила його проведення [136].

Цей вид функціонального аналізу використовують як у комбінації з функціонально-вартісним і функціонально-фізичним аналізом, так і самостійно. Він дає змогу знизити витрати і зменшити ризик виникнення дефектів.

FMEA-аналіз, на відміну від ФВА, не лише аналізує прямо економічні показники, зокрема й витрати на недостатньо високу якість, а дає змогу виявити саме ті дефекти, що зумовлюють найбільший ризик споживача, визначити їхні потенційні причини й виробити коригувальні дії щодо їхнього усунення ще до того, як ці дефекти проявлять себе, і в такий спосіб запобігти витратам на їхнє виправлення.

Зазвичай FMEA-аналіз проводиться для нової продукції або процесу.

FMEA-аналіз процесу виробництва зазвичай проводять у виробника відповідальні служби планування виробництва, забезпечення якості або виробництва за участю відповідних спеціалізованих відділів виробника та за потреби споживача. Проведення FMEA-аналізу процесу виробництва починається на стадії технічної підготовки виробництва і закінчується відвантаженням продукції споживачеві. Метою FMEA-аналізу процесу виробництва є забезпечення виконання всіх вимог щодо якості процесу виробництва шляхом внесення змін до плану процесу для технологічних дій з підвищенням ризиком.

FMEA-аналіз бізнес-процесів зазвичай проводять у підрозділах, що виконують цей бізнес-процес. У проведенні аналізу, крім представників цих підрозділів, беруть участь представники служби забезпечення якості, представники підрозділів, які є внутрішніми споживачами результатів бізнес-процесу, і підрозділів, які беруть участь у виконанні етапів бізнес-процесу. Метою цього виду аналізу є забезпечення якості виконання запланованого

бізнес-процесу. Виявлені під час аналізу потенційні причини дефектів і невідповідностей дадуть змогу визначити причину нестійкості системи. Вироблені коригувальні заходи мають обов'язково передбачати впровадження статистичних методів, насамперед для тих операцій, де виявлено підвищений ризик.

Етапи проведення *FMEA*-аналізу.

1. Побудова компонентної, структурної, функціональної та потокової моделей об'єкта аналізу. Якщо *FMEA*-аналіз проводять спільно з функціонально-вартісним і функціонально-фізичним аналізом, використовують раніше побудовані моделі.

2. Дослідження моделей.

Під час дослідження моделей визначають потенційні дефекти для кожного з елементів компонентної моделі об'єкта, такі дефекти зазвичай пов'язані або з відмовою функціонального елемента (його руйнуванням, поломкою тощо), з неправильним виконанням елементом його корисних функцій (відхилення щодо точності, механічних властивостей, продуктивності тощо), або зі шкідливими функціями елемента.

Як перший крок рекомендується повторна перевірка попереднього *FMEA*-аналізу або аналіз проблем, що виникли за час гарантійного терміну.

Необхідно також розглядати:

- Потенційні дефекти, які можуть виникнути під час транспортування, зберігання, а також у разі зміни зовнішніх умов (вологість, тиск, температура);
- Потенційні причини дефектів (можна використати діаграми Ісікави, які будуються для кожної з функцій об'єкта, пов'язаних із появою дефектів);
- Потенційні наслідки дефектів для споживача (оскільки кожен із дефектів, що розглядаються, може спричинити ланцюжок відмов в об'єкті, під час аналізу наслідків використовують структурну і потокову моделі об'єкта);
- Можливості контролю появи дефектів - визначають, чи може дефект бути виявленим до настання наслідків унаслідок передбачених в об'єкті заходів із контролю, діагностики тощо.

Проводиться низка експертних оцінок і визначаються такі параметри:

- параметр тяжкості наслідків для споживача (проставляється зазвичай за 10-бальною шкалою; найвищий бал проставляють для випадків, коли наслідки дефекту тягнуть за собою юридичну відповідальність);
- параметр частоти виникнення дефекту (проставляється за 10-бальною шкалою; найвищий бал проставляється, коли оцінка частоти виникнення становить 1/4 і вище);
- параметр імовірності виявлення дефекту (є 10-бальною експертною оцінкою; найвищий бал проставляється для «прихованих» дефектів, які не можуть бути виявлені до настання наслідків);
- параметр ризику споживача (показує, у яких відношеннях одна до одної нині перебувають причини виникнення дефектів; дефекти з найбільшим коефіцієнтом пріоритету ризику підлягають усуненню насамперед).

Результати аналізу заносять у спеціальну таблицю. Виявлені «проблемні місця» піддаються змінам, тобто розробляються коригувальні заходи.

Часто розроблені заходи заносяться в наступну графу таблиці *FMEA*-аналізу. Потім перераховується потенційний ризик після проведення коригувальних заходів. Якщо не вдалося його знизити до прийнятних меж, розробляються додаткові коригувальні заходи і повторюються попередні кроки.

За результатами аналізу для розроблених коригувальних заходів складається план їх впровадження. Для цього визначається:

- в якій часовій послідовності слід впроваджувати ці заходи і скільки часу знадобиться на проведення кожного заходу, через скільки часу після початку його проведення проявиться запланований ефект;
- хто відповідатиме за проведення кожного з цих заходів і хто буде конкретним його виконавцем;
- де (у якому структурному підрозділі) заходи мають бути проведені;
- з якого джерела здійснюватиметься фінансування проведення заходу.

Таким чином, *FMEA*-аналіз дає змогу проаналізувати можливості виникнення дефектів, а також виявити ступінь їхнього впливу на споживачів [137].

Метою ФФА є аналіз фізичних принципів дії, а також технічних і фізичних протиріч у технічних об'єктах для того, щоб оцінити якість прийнятих технічних рішень і запропонувати нові. При цьому широко використовують:

- евристичні прийоми, тобто узагальнені правила зміни структури і властивостей технічних об'єктів;
- аналіз наслідків із загальних законів і закономірностей розвитку технічних об'єктів; ці закони стосовно різних галузей промисловості встановлені роботами провідних вчених;
- синтез ланцюжків фізичних ефектів для отримання нових фізичних принципів дії технічних об'єктів; наразі існують програмні продукти, що автоматизують цей процес.

Зазвичай функціонально-фізичний аналіз проводять у такій послідовності.

1. Формулювання проблеми. Для цього можуть бути використані результати функціонально-вартісного аналізу або *FMEA*-аналізу. Опис проблеми має містити призначення технічного об'єкта, умови його функціонування та технічні вимоги до нього.

2. Складання опису функцій призначення технічного об'єкта. Опис базується на аналізі запитів споживача і має містити чітку та коротку характеристику технічного об'єкта, за допомогою якої можна задовольнити виниклу потребу.

3. Опис функцій технічного об'єкта включає: дії об'єкта, об'єкт; об'єкт, на який спрямована дія; умови роботи технічного об'єкта на всіх стадіях його життєвого циклу.

До надсистеми належить зовнішнє середовище, в якому функціонує і з яким взаємодіє об'єкт, що розглядається. Аналіз надсистеми проводять за допомогою структурної та потокової моделі технічного об'єкта.

4. Складання списку технічних вимог до об'єкта.

Цей список має базуватися на аналізі вимог споживачів, на цій стадії використовують прийоми описаної технології розгортання функцій якості (*QFD*).

5. Побудова функціональної моделі технічного об'єкта (зазвичай у вигляді функціонально-логічної схеми).

6. Аналіз фізичних принципів дії функцій технічного об'єкта.

7. Визначення технічних і фізичних суперечностей для функцій технічного об'єкта. Такі суперечності виникають між технічними параметрами об'єкта за спроби одночасно задовольнити кілька вимог споживача.

8. Визначення способів розв'язання суперечностей і напрямки вдосконалення технічного об'єкта. Для того щоб реалізувати сукупність споживчих властивостей об'єкта, відображених у його функціональній моделі, модель перетворюють на функціонально-ідеальну; пошук варіантів технічних рішень часто здійснюють за допомогою морфологічних таблиць.

9. Побудова графіків, еквівалентних схем, математичних моделей технічного об'єкта. Важливо, щоб модель була продуктивною, тобто давала змогу знайти нові можливі рішення. До формування морфологічної таблиці доцільно приступити тоді, коли з'явиться кілька пропонуваніх рішень для різних функціональних елементів технічного об'єкта.

Застосування ФФА дає змогу підвищити якість проєктних рішень, створювати в короткі терміни високоефективні зразки техніки і технологій і таким чином забезпечувати конкурентну перевагу організації.

У сучасних умовах діяльність вітчизняних виробників має бути орієнтована на випуск високоякісної та конкурентоспроможної продукції за максимального зниження витрат на її виробництво. Тому особливої значущості набуває використання передових форм і методів організації праці та управління виробництвом, що застосовуються в економічно розвинених країнах. У зв'язку з цим особливий інтерес представляє метод управління виробництвом за системою *JIT* («*just-in-time*», тобто «точно в строк»).

Система *JIT* зародилася в Японії в середині 70-х років XX століття у компанії «Тойота» і нині з великим успіхом застосовується в багатьох промислово розвинених країнах [55].

Для позначення цієї системи в Японії застосовується термін «канбан», що означає «картка», або «візуальна система запису». Термін «*JIT*» є просто англійським виразом, прийнятим у японських ділових колах і, можливо, таким, що не має японського еквівалента.

Суть системи *JIT* зводиться до відмови від виробництва продукції великими партіями. Натомість цього створюється безперервно-потокове

предметне виробництво. При цьому постачання виробничих цехів і ділянок здійснюється настільки малими партіями, що, по суті, перетворюється на поштучне. Ця система розглядає наявність товарно-матеріальних запасів як зло, існування якого ускладнює вирішення багатьох проблем. Вимагаючи значних витрат на утримання, великі матеріальні запаси негативно позначаються на нестачі фінансових ресурсів, маневреності та конкурентоспроможності підприємства. З практичної точки зору головною метою системи *ЛІТ* є знищення будь-яких зайвих витрат та ефективне використання виробничого потенціалу підприємства.

Система *ЛІТ* є більш пов'язаною з попитом, ніж традиційний метод «викидання продукції на ринок». За цієї системи діє принцип: виробляти продукцію тільки тоді, коли її потребують, і тільки в такій кількості, яка потрібна споживачам. Попит супроводжує продукцію через весь виробничий процес. Під час кожної операції виробляється тільки те, що потрібно для наступної операції. Виробничий процес не починається доти, доки з місця наступної операції не надійде сигнал про необхідність приступити до виробництва. Деталі, вузли і матеріали доставляються тільки до моменту їх використання у виробничому процесі.

Система *ЛІТ* передбачає зменшення розміру оброблюваних партій, практичну ліквідацію незавершеного виробництва, зведення до мінімуму обсягу товарно-матеріальних запасів і виконання виробничих замовлень не за місяцями та тижнями, а за днями і навіть за годинами. У цих умовах спрощується система виробничого обліку, оскільки з'являється можливість здійснення обліку матеріалів і витрат на виробництво на одному об'єднаному рахунку. Крім того, при застосуванні цієї системи частина витрат підприємства з розряду непрямих переходить у розряд прямих. Наприклад, в умовах організації виробництва за системою *ЛІТ* робітники виробничих ліній, зайняті випуском продукції, зобов'язані здійснювати також технічне обслуговування, ремонт і налагоджувальні роботи, які за традиційних умов здійснюють інші робітники, що належать до категорії непрямих витрат. Це, своєю чергою, збільшує точність обчислення собівартості одиниці продукції.

Управління вартістю відрізняється від виробничого обліку тим, що під цим у цьому випадку розуміється регулювання рівня витрат незалежно від того, чи мають вони безпосередній вплив на товарно-матеріальні запаси або

фінансову звітність, чи ні. Застосування принципів *ЛІТ* спрощує процес обліку виробничих витрат і допомагає менеджерам регулювати та контролювати витрати. Таке спрощення призводить до кращої якості виробництва, кращого обслуговування та кращої оцінки вартості.

Традиційно система виробничого обліку має тенденцію ставати дедалі складнішою з безліччю лічильно-облікових операцій і звітних даних. Спрощення ж цього процесу перетворює систему виробничого обліку на систему управління вартістю. За системи обліку *ЛІТ* облік матеріалів і незавершеного виробництва ведеться на одному об'єднаному рахунку. У цих умовах використання відокремленого рахунку для контролю за складськими запасами матеріалів втрачає свою актуальність.

В умовах застосування системи обліку *ЛІТ* прямі витрати на оплату праці та заводські накладні витрати на рахунки виробництва не списуються. Пряма праця розглядається як додаткова частина загальнозаводських накладних витрат. Самі заводські накладні витрати разом із прямими витратами оплати праці списуються безпосередньо на собівартість реалізованої продукції.

У традиційній бухгалтерії при організації закупівель багатьма фірмами основна увага приділяється обліку відхилень від ціни придбання матеріалів. Прийнятні відхилення від розрахункової ціни, як правило, досягаються за рахунок придбання великої кількості матеріалів з відповідними знижками або за рахунок закупівель низької якості.

В умовах же *ЛІТ* основний наголос робиться на якість, доступність і загальну вартість операцій, а не тільки на рівень закупівельних цін.

На багатьох підприємствах із традиційною організацією виробництва більша частина зусиль у сфері виробничого обліку витрачається на впровадження нормативів із трудовитрат і накладних витрат, а також на визначення та облік відхилень від цих нормативів. У компаніях же, що працюють за системою *ЛІТ*, відзначається зниження уваги до обліку відхилень за витратами на робочу силу і накладними витратами. Навіть ті фірми, які, як і раніше, використовують аналіз відхилень, підкреслюють, що перехід на цю систему тягне за собою зміну ракурсу уваги. Використання аналізу відхилень зберігається на рівні підприємства, але основна увага з позицій абсолютної значущості відхилень для кожного конкретного випадку

переходить на врахування ймовірних тенденцій розвитку виробничого процесу.

Крім того, традиційні показники ефективності (як, наприклад, виконання норм виробітку і коефіцієнт використання устаткування), що є загальноприйнятими в багатьох системах виробничого обліку, не вписуються в рамки принципів управління вартістю в системі ЛТ. Причини такої невідповідності полягають у такому:

- усі ці показники стимулюють формування товаро-матеріальних цінностей без урахування необхідних у режимі реального часу потреб;
- дотримання принципу оцінки ефективності переважно за нормативними показниками веде до пріоритету обсягу виробництва над обсягом реалізації та якістю продукції;
- прямі трудові витрати у більшості підприємств становлять від 5 до 15% від величини повних витрат на виробництво продукції;
- застосування коефіцієнтів використання обладнання є неприйнятним тому, що воно сприяє завищенню запасів товаро-матеріальних цінностей порівняно з рівнем потреб у них.

Потенційні переваги системи *ЛТ*.

По-перше, її застосування призводить до зменшення рівня запасів, що означає менше вкладень капіталу в товарно-матеріальні запаси. Оскільки система вимагає мати в наявності для негайного використання мінімальну кількість матеріалів, то завдяки цьому суттєво знижується загальний рівень запасів.

По-друге, в умовах застосування системи *ЛТ* надійність виконання замовлення набагато зростає, оскільки значно менше часу відводиться на закупівлю та зберігання матеріалів. Скорочення циклу виконання замовлення і зростання рівня якості виконання також сприяють істотному зменшенню потреби в резервному запасі, що являє собою додаткові облікові одиниці запасів, які слугують для запобігання можливого дефіциту. У цих умовах графік виробництва в рамках планово-виробничої перспективи також скорочується. Це дає змогу виграти час, необхідний для того, щоб відреагувати на зміни кон'юнктури ринку. Виробництво продукції невеликими партіями завдяки прискореному переходу в нормальний робочий стан сприяє досягненню більшої гнучкості.

По-третє, при застосуванні цієї системи відзначається поліпшення якості виробництва. Коли замовлена кількість продукції невелика, джерело проблем з якістю легко виявляється і корективи вносяться негайно. У цих умовах у працівників багатьох фірм спостерігається більше розуміння значення якості, що, своєю чергою, призводить до поліпшення якості виробництва на робочих місцях.

До інших переваг системи *ЛІТ* можна віднести: зменшення капітальних витрат на утримання складських приміщень для запасів матеріалів і готової продукції; зниження ризику морального старіння запасів; зниження втрат від браку та зменшення витрат на переробку; зменшення обсягу документації; зниження витрат на основні виробничі матеріали завдяки підвищенню їхньої якості.

Крім того, система *ЛІТ* впливає на характер виробничого обліку. В умовах її застосування частина непрямих витрат переходить у розряд прямих. Така трансформація знижує частоту використання носіїв різномірних витрат для розподілу витрат між видами продукції, тим самим збільшуючи точність калькуляції витрат. За цією системою відбувається перетворення виробничого обліку на систему управління вартістю, яка використовується для забезпечення потреб менеджерів в ухваленні ефективних управлінських рішень щодо виду, ціни, собівартості, складу та шляхів збуту продукції, сприяючи подальшому вдосконаленню виробничої та комерційної діяльності.

Вживання та ефективна діяльність підприємства в умовах ринкової економіки багато в чому визначаються ступенем розвитку управлінського обліку. І якщо фінансовий облік націлений на відповідність звітності підприємства зовнішнім щодо компанії вимогам і його форми регламентовані державою, то ведення управлінського обліку спрямоване на вдосконалення управління бізнесом і методів його реалізації - предмет вибору топ-менеджерів організації.

Для забезпечення ефективного управління підприємством необхідний інтегрований метод аналізу та оптимізації витрат за всіма статтями його діяльності. Такий метод управлінського обліку в економічній літературі дістав назву *Cost Management* (*СМ* – менеджмент витрат), за якого акцент було перенесено з підрахунку витрат на планування і використання систем їх обліку. Зміна поглядів на облік в управлінні була цілком природною

реакцією на глобальні зміни економічної системи, такі як бурхливий розвиток інформаційних технологій, зміна характеру виробництва, транснаціональна конкуренція.

У 90-ті роки XX століття на основі загальної теорії *СМ* було розроблено новий метод управлінського обліку – *Strategic Cost Analysis (SCA)* - стратегічний аналіз витрат).

Стратегічний аналіз витрат (SCA) – найважливіша частина *СМ*, що базується на терміні *value chain* (ланцюг утворення споживчої вартості), який став центральним об'єктом стратегічного коєт-менеджменту.

Згідно з методом *SCA* діяльність фірми трактується як ланцюг утворення споживчої вартості (послідовність операцій зі створення вартості виробу). Кожну ланку ланцюга розглядають як з позиції її необхідності у виробничому процесі, так і з позиції ресурсів, які вона споживає. Потім визначається *cost driver* (коєт-драйвер) – керуючий фактор, тобто параметр, який характеризує вартість виконання конкретної операції. Шляхом контролю коєт-драйверів і перебудови ланцюга утворення вартості передбачається досягти стійкої переваги над конкурентами [138].

Така увага фахівців у галузі *SCA* до роботи підприємства в умовах гострої конкуренції пояснює той факт, що управлінський облік у рамках цієї теорії фактично підпорядкований цілям маркетингу. Якщо при традиційному ціноутворенні за основу береться собівартість продукції, і вона сприймається як даність, то практика цільової собівартості виходить із маркетингових оцінок мієткості ринку і конкурентоспроможної ціни. Виходячи з обсягу виробництва і роздрібної ціни визначається цільова собівартість.

Завдання стратегічного аналізу витрат - конструювання такого ланцюга утворення вартості, щоб реальна собівартість не перевищувала цільову.

Таким чином, стратегія цінового лідерства передбачає підтримання тієї самої якості продукції (послуг), що й у конкурентів, але за нижчих витрат і, отже, цін. Цінове лідерство досягається за рахунок економії на обсягах виробництва, ретельного контролю витрат, мінімізації витрат на етапах обслуговування, продажів і реклами.

Крім цінового лідерства *SCA* передбачає такий фактор, як «унікальність», тобто продукти «*brand-name*», дизайн, сервіс.

Можливість дотримуватися тієї чи іншої стратегії залежить від того, як фірма управляє своїм ланцюжком утворення вартості (ЛУВ) порівняно з конкурентами. Таким чином, аналіз ЛУВ необхідний для визначення того її сегмента, де можуть бути знижені витрати або підвищена споживча вартість. Для досягнення цієї мети слід розглядати ЛУВ у масштабі не тільки однієї фірми, а й галузі, тобто враховувати процес утворення вартості від видобутку ресурсів до надання сервісних послуг з ремонту готової продукції. Такий масштаб дасть змогу визначити ту ділянку галузевої ЛУВ, де фірма потенційно може реалізувати одну зі своїх стратегій і синхронізувати вибір своєї стратегії з галузевим оточенням.

Саме розгляд галузевої ЛУВ відрізняє методологію стратегічного аналізу витрат (або стратегічного управління витратами) від аналізу в рамках традиційного управлінського обліку, сферою якого була лише технологія додавання вартості всередині фірми.

Галузеві показники, що чинять сильний вплив на ринкові пропозиції окремих підприємств, у разі використання *SCA* успішно піддаються аналізу та обліку.

Розглянемо приклад використання методів *SCA* в конкретній ситуації. Компанія-виробник насосно-компресорних труб вирішує почати випуск цього виду труб із термодифузійним цинковим покриттям, що підвищує їхній термін служби в корозійно-активних середовищах приблизно у 10 разів. З позицій традиційного управлінського обліку витрати на таке вдосконалення вважалися б невірними. Аналіз із використанням ЛУВ має такий вигляд. Якщо використовуються насосно-компресорні труби у звичайному виконанні, то споживач повинен буде витратити додатково 1000 євро на рік за кожен тону НКТ на заміну труб, що вийшли з ладу. Середній термін експлуатації НКТ без покриття становить до, наприклад, 1 року, тобто загальні витрати становитимуть щонайменше 1000 євро/тону, не враховуючи часу на заміну труб і незручностей. Витрати підприємства на придбання обладнання та матеріалів для нанесення термодифузійного цинкового покриття за обсягу виробництва 50 000 тонн труб на рік становитимуть 300 євро/т. Цю різницю може бути перекрито збільшенням ціни, оскільки економія на ЛУВ становитиме 700 євро/т.

Таким чином, аналіз витрат у рамках традиційного управлінського обліку часто виявляється неефективним, оскільки недооцінюються зовнішні стосовно підприємства ланки галузевої ЛУВ, що призводить до збільшення витрат і заперечення вигідних рішень.

Побудова системи стратегічного аналізу витрат на підприємстві. ЛУВ розділяє галузь на окремі стратегічні ланки, тому початковою точкою аналізу витрат є визначення ЛУВ галузі, віднесення витрат, доходів і активів до різних її ланок. Потім встановлюються фактори, від яких залежать витрати на кожній ланці ЛУВ - кост-драйвери. І нарешті, формується система дій, у результаті яких фірма може отримати конкурентні переваги.

Ланки галузевої ЛУВ – це основні масиви витрат у бізнес-процесах, наприклад, закупівля сировини, транспортування та інше (природно, для кожної галузі вони різні). Кост-драйвери для кожної ланки ЛУВ також виділяються окремо.

Діагностика кост-драйверів для розуміння характеру витрат у кожній ланці - другий крок у створенні та аналізі ЛУВ. На відміну від традиційного управлінського обліку, де єдиним кост-драйвером вважається обсяг випуску, у стратегічному аналізі витрат розглядаються структурні та операційні види кост-драйверів.

Структурні кост-драйвери визначаються особливостями економічної політики компанії. *SCA* пропонує п'ять критеріїв для вибору структурних кост-драйверів:

- масштаб виробництва, що визначає обсяг інвестицій у виробництво, НДДКР, маркетинг;
- охоплення – ступінь вертикальної інтеграції;
- економічний досвід здійснення передбачуваних операцій;
- технології та їхня специфіка;
- складність – широта номенклатури продукції (послуг).

Операційні кост-драйвери характеризують здатність фірми успішно реалізовувати свою структурну політику. Перелік основних операційних кост-драйверів містить:

- залучення персоналу в досягнення загальних цілей фірми;
- загальне управління якістю (*TQM – Total Quality Management*), що ґрунтується на таких принципах: ухвалення рішень на фактах; системний і

процесний підхід; лідерство керівника; залучення до процесів поліпшення якості всього персоналу тощо;

- рівень завантаження потужностей;
- ефективність розташування потужностей;
- конструкція виробів;
- зв'язки з постачальниками та споживачами.

Третій крок в аналізі ЛУВ – створення стійкої конкурентної переваги. Для кожної ланки ЛУВ формуються два ключові запитання: чи можна знизити витрати на ланку за того самого рівня споживчої вартості (доходу); чи можна збільшити споживчу вартість (дохід) без збільшення витрат.

Отже, завдання полягає в кращому контролі витрат, ніж у конкурента, або в реорганізації ЛУВ для отримання більшої споживчої вартості.

Метод *SCA* може надавати інформацію для стратегічних рішень з таких питань, як оцінка витрат зі зміни атрибутів виробів і вимірювання вартості «бар'єрів», які необхідно подолати конкурентам для створення стійкої конкурентної переваги (обсяг інвестицій).

Стратегічний аналіз витрат у частині розроблення й оцінювання ЛУВ тісно пов'язаний із технікою обліку та специфікою конкретного підприємства і потребує професійного оцінювання й аналізу його діяльності.

Досить новим методом аналізу витрат на якість є бенч-маркінг.

Бенч-маркінг являє собою мистецтво виявлення того, що інші роблять краще, тобто це постійний процес вивчення та оцінки товарів і послуг, досвіду виробництва найкращих своїх конкурентів або тих підприємств, які стали визнаними лідерами у своїх галузях. Батьківщиною цього поняття є США. Уперше бенч-маркінг з'явився в 1972 році в Інституті стратегічного планування Кембриджа. Дослідницько-консалтингова компанія «*Pims*» встановила, що для знаходження ефективного рішення в умовах конкуренції необхідно вивчати і використовувати досвід інших підприємств, які мають успіх у споріднених галузях. У 1979 році американська компанія «*Xerox*» розпочала проект «Бенч-маркінг конкурентоспроможності» для аналізу якості власної продукції та витрат, пов'язаних із виробництвом, порівняно з результатами японських виробників. Відтоді до бенч-маркінгу стали ставитися з довірою. Однак для більшості компаній бенч-маркінг не є новим інструментом економіки якості. Він здійснюється в рамках конкурентного

аналізу, хоча бенчмаркінг є більш деталізованою, формалізованою та впорядкованою функцією, ніж метод або підхід конкурентного аналізу [139].

Бенч-маркінг дає змогу здійснювати такі процеси:

- безперервне поліпшення всіх процесів життєвого циклу продукції;
- визначення галузей, у яких поліпшення якості принесе найбільш значущі результати з ключових питань бізнесу або відносин із замовником;
- встановлення стандартів там, де накопичено і визначено найкращий досвід;
- визначення найкращих організацій, що дотримуються цих стандартів;
- адаптація та застосування отриманих від таких підходів методів і досвіду з метою проведення бізнесу відповідно до стандартів і отримання переваги над конкурентами.

Нині бенч-маркінг стає мистецтвом виявлення того, що інші компанії роблять краще: вивчення, удосконалення та застосування їхніх методів роботи на власних компаніях.

Визначаючи ефект, який може забезпечити бенч-маркінг, слід мати на увазі, що ніколи і ніким не піддавався сумніву факт вигідності обміну досвідом та його вивчення.

Таким чином, користь бенч-маркінгу полягає в тому, що виробничі та маркетингові функції стають найбільш керованими, коли досліджуються і впроваджуються найкращі методи і технології інших підприємств або галузей. Це може призвести до прибуткового підприємництва з високою економічністю, створення корисної конкуренції та задоволення потреб покупців.

Процес еволюції бенч-маркінгу аналогічний класичній моделі «переходу від мистецтва до науки».

Перше покоління бенч-маркінгу інтерпретується як реінжиніринг або ретроспективний аналіз товару.

Друге покоління – бенч-маркінг конкурентоспроможності – розвивається як наука у 1976 – 1986 рр. завдяки діяльності фірми «Ксерокс».

Третє покоління бенч-маркінгу розвивається в період 1982 – 1986 рр., коли підприємства-лідери якості з'ясовують можливість повчитися у підприємств поза їхнім сектором або галуззю, а не у своїх конкурентів.

Четверте покоління бенч-маркінгу – це стратегічний бенч-маркінг, який розглядають як систематичний процес, спрямований на оцінювання альтернатив, реалізацію стратегій і вдосконалення характеристик продуктивності на основі вивчення успішних стратегій зовнішніх підприємств-партнерів.

П'яте покоління – глобальний бенч-маркінг. Розглядається як майбутній інструмент організації міжнародних обмінів з урахуванням культури і національних процесів організації виробництва. Таким чином з'явився новий напрям у менеджменті – крос-культурний менеджмент, що полягає в порівнянні методів і принципів управління, тобто менеджменті на стику ділових культур.

Основа філософії бенч-маркінгу: знання процесів, що виконуються в організації; знання лідерів у своїй галузі; використання найкращого досвіду лідерів у роботі своєї організації; отримання прибутку від впровадження чудових практик.

Знання процесів, що виконуються в організації, насамперед передбачає аналіз поточних процесів організації, оцінку їхніх сильних і слабких сторін, документування виконуваних процесів, представлення процесів на картах і діаграмах, вимірювання параметрів процесів, вивчення вимог споживачів. Знання лідерів у своїй галузі передбачає встановлення головних конкурентів, їхніх сильних і слабких сторін для розуміння того, як краще змагатися з ними. Насамперед необхідно вчитися в організації, що мають світовий клас. Включення всього найкращого в роботу організації означає сприйняття й адаптацію найкращих практик. Отримання прибутку від переваги - це використання «найкращої з найкращих» практик в організації, здійснення прориву за рахунок цього у своїй галузі та досягнення рівня виконавця світового класу. Залежно від цілей організації та від її ресурсів розмір прибутку від використання практики переваги може бути різним.

Бенч-маркінг охоплює дуже широкий спектр питань - від політики організації, її стратегії, задоволення запитів споживачів до різноманітних процесів і функцій, що виконуються в організації.

Залежно від того, чи проводять бенч-маркінг усередині організації, чи порівнюють споріднені організації, розрізняють внутрішній або зовнішній бенч-маркінг.

Внутрішній бенч-маркінг передбачає порівняння однорідних об'єктів усередині організації. Залежно від об'єкта порівняння існують різні види внутрішнього бенч-маркінгу. Бенч-маркінг процесів – порівняння однорідних процесів, що протікають паралельно.

Бенч-маркінг характеристик процесів – порівняння характеристик однорідних процесів.

Бенч-маркінг функцій – порівняння однорідних функцій, які є складовою частиною як однорідних, так і різнорідних за своєю природою процесів.

Бенч-маркінг витрат – порівняння витрат, пов'язаних із будь-яким етапом виконання процесу, або загальних витрат, пов'язаних із випуском продукції чи наданням послуг.

Бенч-маркінг продукції (послуг) – порівняння різних видів продукції (послуг), пропонувані організацією, або з погляду самої організації, або з погляду споживача.

Бенч-маркінг споживача – порівняння різних споживачів продукції або послуг однієї організації.

Зовнішній бенч-маркінг залежно від того, «з ким порівнюють», поділяють на бенчмаркінг конкурентоспроможності, функціональний бенч-маркінг, стратегічний і глобальний. У свою чергу, об'єктами порівняння зовнішнього бенч-маркінгу також можуть бути процеси, характеристики процесів, функції, витрати, споживачі, продукція.

Однак основним об'єктом бенч-маркінгу слід визнати процес або його функції, оскільки всі інші об'єкти: продукція, витрати, задоволеність споживачів – є результатом процесу. Тому ми розглянемо бенч-маркінг процесів і функцій. Бенч-маркінг може застосовуватися до процесів різного рівня.

Процес бенч-маркінгу включає чотири фази, розбиті на десять етапів.

Фаза планування.

1. Встановлення об'єкта бенч-маркінгу, а саме процесу, який пропонується поліпшити. Визначення області діяльності організації, де найбільші можливості для поліпшення. Документування поточного процесу.

Розробка опису проєкту.

2. Встановлення конкурента за бенч-маркінгом. Визначення того, хто застосовує «чудову» практику в тій галузі, яка цікавить організацію.

3. Планування і проведення спостережень «чудової практики». Виконання спостереження за «чудовою» практикою безпосередньо у конкурента з бенч-маркінгу.

Аналітична фаза.

4. Визначення поточного рівня виконання процесу. Проведення аналізу поточного виконання процесу.

5. Проєктування майбутнього рівня виконання процесу. Виявлення тенденцій галузі та визначення того, яким чином можна досягти переваги.

Фаза інтеграції.

6. Аналіз результатів бенч-маркінгових досліджень в організації. Аналіз передбачуваних результатів бенч-маркінгових досліджень на всіх рівнях організації, досягнення згоди.

7. Перегляд встановлених цілей і оперативних планів, доведення до відома всіх зацікавлених осіб про ці зміни.

Фаза дій.

8. Розробка плану заходів. Розроблення спеціальних заходів, системи вимірювань і розкладу для впровадження нових практик, знайдених у результаті бенч-маркінгу.

9. Здійснення прориву. Виконання плану заходів, необхідність яких встановлено в результаті бенчмаркінгу, здійснення моніторингу результатів.

10. Повторення процесу. Утримання поточного виконання процесу на рівні провідного для галузі.

Таким чином, застосування бенч-маркінгу дає змогу організації: спиратися на успіх інших організацій; враховувати сучасний досвід, а не застарілі ідеї; значно знизити витрати від повторної роботи, дублювання; поліпшити розуміння того, що робиться і наскільки ефективно здійснюється діяльність; організовувати більш ефективне управління; ставити реальні цілі; визначити необхідні зміни; посилити відповідальність співробітників.

Розглянуті методи аналізу витрат на якість є засобами їх мінімізації, що дають змогу вивільняти капітал і спрямовувати його на освоєння нових напрямів діяльності та, як наслідок, виходити організаціям на новий, якісніший рівень розвитку.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. ДСТУ 2924–94. Прокат чорних металів. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт, 1994.
2. ДСТУ ISO 4885:2002. Продукція чорної металургії. Термічне оброблення. Словник термінів (ISO 4885:1996, IDT). Київ: Держспоживстандарт, 2002.
3. ДСТУ 3790–98. Металургія кольорових металів. Терміни та визначення основних понять. Київ: Держстандарт, 1998.
4. ДСТУ EN ISO 17659:2022. Зварювання. Багатомовні терміни для зварних з'єднань з ілюстраціями (EN ISO 17659:2004, IDT; ISO 17659:2002, IDT). Київ: Держспоживстандарт, 2022.
5. ДСТУ 2961–94. Організація промислового виробництва. Нормування матеріалів та виробничих процесів. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт, 1994.
6. Tylecote R. F. A History of Metallurgy. Institute of Materials, 1992. 205 p.
7. Агеев Є. А., Кучер І. І. Маркетинг металургійних підприємств. Львів: Новий світ–2000, 2020. 272 с.
8. Котлер Ф., Армстронг Г., Сондерс Д., Вот В. Основи маркетингу: Пер. з англ. 2-ге вид. Київ: ІД Вільямс, 1999. 308 с.
9. Чернега Д. Ф., Богушевський В. С., Готвянський Ю. Я. та ін. Основи металургійного виробництва металів і сплавів. Київ: Вища школа, 2006. 503 с.
10. Juran J. M. Quality Control Handbook. New York: McGraw-Hill, 1951. 1730 p.
11. Афанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: підручник. Київ: Вид-во Ліра-К, 2013. 610 с.
12. Таран Ю. М., Калінушкін Є. П., Куцова В. З. та ін. Металознавство і термічна обробка металів і сплавів із застосуванням комп'ютерних технологій навчання: підручник / за ред. Ю. М. Тарана. Дніпропетровськ: Дніпрокнига, 2002. 360 с.
13. Никифоров В. М. Технологія металів і конструкційні матеріали. Київ: Вища школа, 1984. 343 с.

14. Мазур В. Л., Тимошенко В. І. Теорія і технологія прокатки (гідродинамічні ефекти змазки і мікрорельєф поверхні). Київ: ІД АДЕФ Україна, 2018. 560 с.
15. Гуляєв Ю. Г., Друян В. М., Шифрін Е. І. Стальні труби. Виготовлення, застосування, сортамент: довідник. Дніпропетровськ: Днепр–ВАЛ, 2002. 350 с.
16. Друян В. М., Гуляєв Ю. Г., Чукмасов С. А. Теорія і технологія трубного виробництва: навч. посіб. Дніпропетровськ: Днепр–ВАЛ, 2001. 544 с.
17. Шаповал М. І. Менеджмент якості: підручник. 3-тє вид., випр. і доп. Київ: Т-во Знання, 2007. 471 с.
18. Шаповал М. І. Основи стандартизації, управління якістю і сертифікації: підручник. 3-є вид., перероб. і доп. Київ: Вид-во Європ. ун-ту, 2001. 174 с.
19. Бичківський Р. В., Столярчук П. Г., Гамула П. Р. Метрологія, стандартизація, управління якістю і сертифікація: підручник. 2-ге вид., випр. і доп. Львів: Вид-во Нац. ун-ту Львівська політехніка, 2004. 560 с.
20. Дяченко С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: навч. посіб. Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. 226 с.
21. ДСТУ 9051:2020. Виливки з чавуну та сталі. Дефекти. Терміни та визначення понять. Київ: Держспоживстандарт, 2020.
22. Губенко С. І., Парусов В. В., Деревянченко І. В. Неметалеві включення в сталі. Дніпропетровськ: АРТ-ПРЕСС, 2005. 536 с.
23. International Atlas of Casting Defects. ASM, NY, 2007. 181 p.
24. Atlas of Shell Defects. Investment Casting Institute, NY, 2004. 122 p.
25. Большаков В. І., Сухомлин Д. В., Лаухін Д. В. Атлас структур металів і сплавів: навч. посіб. для студентів техн. вишів. Дніпропетровськ: ПГАСА, 2010. 174 с.
26. ДСТУ EN 10021–2002. Вироби із сталі та чавуну. Загальні технічні вимоги постачання (EN 10021:1993, IDT). Київ: Держспоживстандарт, 2002.
27. ДСТУ ISO 1035.1–2001. Прокат сталевий гарячекатаний. Частина 1. Прокат круглий. Розміри (ISO 1035–1:1980, IDT). Київ: Держспоживстандарт, 2001.

28. ДСТУ ISO 1035.3–2001. Частина 3. Прокат штабовий. Розміри (ISO 1035–3:1980, IDT). Київ: Держспоживстандарт, 2001.
29. ДСТУ EN 10051–2008. Прокат листовий і штаба без покриву, отримані безперервним гарячим прокатуванням, з нелегованої та легованої сталі. Допуски на розміри й форму (EN 10051:2008, IDT). Київ: Держспоживстандарт, 2008.
30. ДСТУ EN 10222–1-5:2005-2018. Поковки сталеві для роботи під тиском. Частина 1–5. Київ: Держспоживстандарт, 2005–2018.
31. ДСТУ 8938:2019. Труби сталеві безшовні гарячедеформовані. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт, 2019.
32. ДСТУ 2680–94. Труби безшовні катані зі сталей і сплавів. Терміни і визначення дефектів поверхні. Київ: Держстандарт, 1994.
33. ДСТУ EN 10266:2022. Труби сталеві, фітинги та конструктивні порожнисті профілі. Символи та визначення термінів для використання в стандартах на продукцію (EN 10266:2003, IDT). Київ: Держспоживстандарт України, 2022.
34. ДСТУ 3491-96. Дефекти з'єднань при зварюванні металів плавленням. Класифікація, позначення та визначення. Київ : Держстандарт України, 1996.
35. ДСТУ EN ISO 6520-1:2015. Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 1. Зварювання плавленням (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2015.
36. Кузін О. А., Яцюк Р. А. Металознавство та термічна обробка металів : підручник. Львів : Афіша, 2002. 304 с.
37. Hradesky John L. Total Quality Management Handbook. USA : McGraw-Hill, Inc., 1995. 712 p.
38. Levitt T. Exploit the Product Life Cycle // Harvard Business Review. November - December 1965. Vol. 43. P. 81–94.
39. Derman Johns, Lieberman. Continuous Sampling Procedures Without Control // The Annals of Mathematical Statistics. 2007. Vol. 30. Issue 4. P. 1175–1191.

40. Poole M., Van de Ven A., Dooley K. *Organizational Change and Innovation Processes: Theory and Methods for Research*. Oxford : Oxford Press, 2001. 416 p.
41. ДСТУ EN ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. Київ : Держспоживстандарт, 2015.
42. ДСТУ EN ISO 9001:2018. Системи управління якістю. Вимоги (EN ISO 9001:2015, IDT; ISO 9001:2015, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2019.
43. ДСТУ ISO/TS 9002:2017. Системи управління якістю. Настанови щодо застосування ISO 9001:2015 (ISO/TS 9002:2016, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2017.
44. ДСТУ EN ISO 9004:2018. Управління якістю. Якість організації. Настанови щодо досягнення сталого успіху (ISO 9004:2018, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2018.
45. ДСТУ ISO 19011:2019. Настанови щодо проведення аудитів систем управління (ISO 19011:2018, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2019.
46. Juran J.M. *Quality Control Handbook*. New York : McGraw-Hill, 1951. 1730 p.
47. Joseph A. Defero. *Juran's Quality Handbook 7E: The Complete Guide to Performance Excellence*. New York : McGraw-Hill, 2023.
48. W. Edwards Deming. *The New Economics for Industry, Government, Education*. 3rd edition. US : University of Massachusetts Boston, 2018. 240 p.
49. Hideki Yoshihara. Belated Changes in International Management of Japanese Multinationals // *Rikkyo Business Review*. 2008. No. 1. P. 4–15.
50. Garvin D. A. *Managing Quality: The Strategic and Competitive Edge*. London : Collier Macmillan, 1988. 319 p.
51. Sorensen C. *My Forty Years With Ford*. New York : W.W. Norton, 2006. 368 p.
52. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика : материалы 17-й Международной научно-практической конференции, 04–08 сентября 2017 г., Одесса. Киев : АТМ України, 2017. 212 с.
53. W. Edwards Deming. *Out of the Crisis*. Cambridge : MIT Press, 2000. 524 p.

54. ISO 13053-1,2:2011. Quantitative Methods in Process Improvement – Six Sigma. Part 1: DMAIC Methodology; Part 2: Tools and Techniques. Geneva : ISO, 2012.

55. Ohno T., Mito S. Just-in-Time for Today and Tomorrow. Cambridge, MA : Productivity Press, 1988. 145 p.

56. Jeffrey K. Liker, Gary L. Convis. The Toyota Way to Lean Leadership: Achieving and Sustaining Excellence through Leadership Development. New York : McGraw Hill, 2011. 274 p.

57. Krafcik J. A Methodology for Assembly Plant Performance Determination // IMVP Working Paper. Cambridge, MA. October 1988. 402 p.

58. James P. Womack, Daniel T. Jones, Daniel Roos. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. Revised and Updated. Hardcover. New York : McGraw Hill, 2003. 396 p.

59. Wesley E. Donanahue. Lean Six Sigma: A Competency-Based Approach to Applying Continuous Process Improvement Principles and Best Practices. London : Kindle, 2021. 303 p.

60. ДСТУ 3021-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт, 1995.

61. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 655 с.

62. ДСТУ 2824-94. Розрахунки та випробування на міцність. Види і методи механічних випробувань. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт, 1994.

63. ДСТУ EN 10045-1:2006. Матеріали металеві. Випробування на ударний вигин за Шарпі. Частина 1. Метод випробування. Київ : Держспоживстандарт, 2006.

64. ДСТУ ISO 6507-1:2007. Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2007.

65. ДСТУ ISO 6506-1:2007. Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування (ISO 6506-1:2005, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2007.

66. ДСТУ ISO 6508-1-2:2013. Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування. Частина 2. Повірка

та калібрування приладів для вимірювання твердості (ISO 6508-1-2:2005, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2013.

67. ДСТУ ISO 6892-1-2:2020. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури. Частина 2. Метод випробування за підвищених температур (ISO 6892-1-2:2018, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2020.

68. ДСТУ ISO 3312:2014. Матеріали металеві спечені та сплави тверді. Визначення модуля Юнга (ISO 3312:1987, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2014.

69. ДСТУ 8974:2019. Сталь. Металографічний метод оцінювання мікроструктури листів та стрічки. Київ : Держспоживстандарт, 2019.

70. ДСТУ 9074:2021. Сталь. Еталони мікроструктури. Київ : Держспоживстандарт, 2021.

71. ДСТУ 8975:2019. Сталь. Методи випробування та оцінювання макроструктури. Київ : Держспоживстандарт, 2019.

72. ДСТУ EN ISO 8044:2018. Корозія металів та сплавів. Основні терміни та визначення понять (EN ISO 8044:2015, IDT; ISO 8044:2015, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2018.

73. ДСТУ ISO 9227:2015. Випробування на корозію в штучних атмосферах. Випробування соляним туманом (ISO 9227:2012, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2015.

74. ASTM A262-15 (2021). Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2021.

75. ДСТУ EN ISO 3651-1-2:2005 (ISO 3651-1:1998, IDT). Сталі корозійнотривкі. Визначення тривкості до міжкристалітної корозії. Частина 1. Аустенітні та феритно-аустенітні (двофазні) сталі. Випробування на корозію у середовищі азотної кислоти визначенням втрати маси (випробування за Хью). Частина 2. Аустенітні та феритно-аустенітні (двофазні) сталі. Випробування на корозію у середовищі сірчаної кислоти. Київ : Держспоживстандарт України, 2005.

76. ASTM G3-14(2024). Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2024.

77. ДСТУ EN ISO 7539-1-10:2015 – 2022. Корозія металів і сплавів. Випробування на корозію під напругою. (EN ISO 7539-1-10:2012, IDT; ISO 7539-1-10:2012, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2015–2022.

78. ASTM G-48-03. Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2003.

79. ASTM G-36: 2018. Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion-Cracking Resistance of Metals and Alloys in a Boiling Magnesium Chloride Solution. ASTM, 100 Barr Harbor Drive, Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2018.

80. NACE Standard TM 0177-2005. Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments. NACE International, Houston, Texas, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 2005.

81. NACE Standard TM 0284-2011. Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking. NACE International, Houston, Texas, 2011.

82. ASTM G31-21. Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. ASTM, 100 Barr Harbor Drive, Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2021.

83. ДСТУ ISO 8491:2005. Металеві матеріали. Випробування на згин зразків труб повного перерізу (ISO 8491:1998, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2005.

84. ДСТУ EN ISO 8492:2022. Матеріали металеві. Труби. Випробування на сплющування (EN ISO 8492:2013, IDT; ISO 8492:2013, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2022.

85. ДСТУ ISO 17653:2009. Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на кручення зварних точок (ISO 17653:2003, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2009.

86. ISO 7800:2012. Metallic materials. Wire. Simple torsion test: ISO Standards, 2012.
87. ДСТУ ISO 8494:2015. Металеві матеріали. Труби. Випробування на бортування (ISO 8494:2013, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2015.
88. ДСТУ 3845:2019. Труби металеві. Методи випробування гідростатичним тиском. Київ : Держспоживстандарт, 2019.
89. ДСТУ EN 13018:2017. Неруйнівний контроль. Візуальний контроль. Загальні принципи (EN 13018:2016, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2017.
90. ДСТУ EN ISO 3452-1-2:2014. Неруйнівний контроль. Капілярний контроль (EN ISO 3452-1-2:2013, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2014.
91. ДСТУ EN ISO 23277:2018. Неруйнівний контроль зварних швів. Капілярний контроль. Рівні приймання (EN ISO 23277:2015, IDT; ISO 23277:2015, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2018.
92. ISO 4986:2020. Steel and iron castings – Magnetic particle testing. ISO Standards, 2020.
93. ДСТУ EN ISO 10893-7:2015. Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 7. Цифровий радіографічний контроль шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів (EN ISO 10893-7:2011, IDT; ISO 10893-7:2011, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2015.
94. ДСТУ EN 14127:2014. Неруйнівний контроль. Ультразвукове вимірювання товщини (EN 14127:2011, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2014.
95. ДСТУ EN 13477-1-2:2016. Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Характеристика устаткування (EN 13477-1-2:2010, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2016.
96. ДСТУ ISO 18563-1-3:2017. Неруйнівний контроль. Визначення характеристик і верифікація ультразвукового обладнання з фазованими антенними решітками (ISO 18563-1-3:2015, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2017.
97. ДСТУ EN 12668-1-3:2015. Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю (EN 12668-1-3:2010, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2015.

98. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій : довід. посіб. у 8 т. / за заг. ред. акад. НАН України З. Т. Назарчука ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. Львів : Простір-М, 2016. Т. 4 : Електрофізичні методи неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій / Р. М. Джала [та ін.] ; за ред. д-ра техн. наук Р. М. Джали. 2018. 354 с.
99. Середюк О. Є., Барна О. Б., Криницький О. С. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. 348 с.
100. Weidner M. Qualitätsprüfung seriengefertigter Bauteile mit akustischer Resonanzanalyse. *Giesserei-Praxis*, 2017, 06. P. 240–243.
101. Lechner P., Fuchs G., Hartmann C., Steinlehner F., Ettemeyer F., Volk W. Acoustical and optical determination of mechanical properties of inorganically-bound foundry core materials. *MDPI Mater*, 2020, 13. P. 2531.
102. Sankaran V. Low cost inline NDT system for internal defect detection in automotive components using acoustic resonance testing. *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, 2011. P. 237–239.
103. Coffey E. Acoustic resonance testing. Future of Instrumentation International Workshop (FIIW). *Proceedings*, 2012. P. 1–2.
104. Heinrich M., Rabe U. Simulation-based generation of representative and valid training data for acoustic resonance testing. *MDPI Appl Sci*, 2020, 10. P. 6059.
105. Lai C., Xu W., Sun X. Predicting flaw-induced resonance spectrum shift with theoretical perturbation analysis. *J Vib Acoust.*, 2012, 134(5): 051017. <https://doi.org/10.1115/1.4006649>.
106. Xu W., Lai C., Sun X. Identify structural flaw location and type with an inverse algorithm of resonance inspection. *J Vib Control*, 2015, 21(13). P. 2685–2696. <https://doi.org/10.1177/1077546313516823>.
107. Heinrich M., Rabe U., Valeske B. Simulation-Based Generation of Representative and Valid Training Data for Acoustic Resonance Testing. *Applied Sciences*, 2020, 10(17). P. 6059. <https://doi.org/10.3390/app10176059>.
108. Lechner P., Reberger E., Gruber M. et al. Localization of cavities in cast components via impulse excitation and a finite element analysis. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2022, 16. P. 869–877. <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01134-x>.

109. Schmidt M., Merklein M., Bourell D., Dimitrov D., Hausotte T., Wegener K., Overmeyer L., Vollertsen F., Levy G. N. Laser-based additive manufacturing in industry and academia. *CIRP Annals*, 2017, 66(2). P. 561–583. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.011>.
110. Bourell D., Kruth J. P., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A. M., Clare A. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 2017, 66(2). P. 659–681. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>.
111. Hartmann C., Lechner P., Himmel B., Krieger Y., Lueth T. C., Volk W. Compensation for geometrical deviations in additive manufacturing. *Technologies*, 2019, 7(4). P. 83. <https://doi.org/10.3390/technologies7040083>.
112. Lechner P., Hartmann C., Wolf D. et al. Deviation compensation in LPBF series production via statistical predeformation and structural pattern analysis. *J Intell Manuf*, 2024, 35. P. 2645–2652. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02166-5>.
113. Shewhart W. A. Statistical method from the viewpoint of quality control. Washington : The Graduate School, the Department of Agriculture, 1939. 155 p.
114. David H. A. Karl Pearson – The Scientific Life in a Statistical Age by Theodore M. Porter : A Review. *International Statistical Review*, 2009, 77(1). P. 30–39.
115. Ishikawa K. What is Total Quality Control. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1985. 215 p.
116. ДСТУ ISO 10017:2023. Управління якістю. Настанови щодо застосування статистичних методів відповідно до ISO 9001:2015 (ISO 10017:2021, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2023.
117. ДСТУ 3514-97 Статистичні методи контролю та регулювання. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт, 1997.
118. ДСТУ ISO 8258:2001 Статистичний контроль. Контрольні карти Шухарта (ISO 8258:1991, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2001.
119. Домбровський В. А., Крижанівський І. М., Мацьків Р. С. [та ін.] Вища математика : підручник. Тернопіль : Видавництво Карп'юка, 2003. 480 с.
120. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посібник. Львів : ЛьвДУВС, 2017. 292 с.

121. Зедгинидзе И. Г. Организация и планирование инженерного эксперимента : учебник. Тбилиси : Изд-во Технический университет – «Центр информатизации», 2000. 206 с.
122. Основы планирования научно-исследовательского эксперимента / М. Аугамбаев, А. З. Иванов, Ю. И. Терехов ; под ред. Г. М. Рудакова. Ташкент : Уки-тувчи, 2004. 336 с.
123. Bruns K., Johnson B. Mastering Business Analysis Standard Practices: Seven Steps to the Next Level of Competency. Publ. J. Pocca, 2019. 518 p.
124. Ishikawa K. Introduction to Quality Control. JUSE Press Ltd., Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, 1989. 837 p.
125. Pareto V. On the Economic Phenomenon. International Economic Papers. 1953. № 3. P. 184.
126. ДСТУ 2960-94 Організація промислового виробництва. Основні поняття. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт, 1994.
127. ДСТУ 2925-94 Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт, 1994.
128. ДСТУ 3278-95 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення. Київ : Держстандарт, 1995.
129. ДСТУ ISO 9027:2020 Системи управління якістю. Настанови щодо входного контролю продукції (ISO 9027:2020, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2020.
130. ДСТУ 2391-94 Система технологічної документації. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт, 1994.
131. Begg D., Fischer S., Dornbusch R. Economics. London : McGraw-Hill Book Company, 1991. 667 p.
132. Brealey R. A., Myers S. C. Principles of Corporate Finance. New York : McGraw-Hill, Inc., 1991. 924 p.
133. Пархоменко В. М. Бухгалтерський облік, внутрішній контроль і економічний аналіз витрат на поліпшення якості продукції: проблеми теорії та методології : монографія. Житомир : ЖДТУ, 2010. 560 с.
134. Taylor F. W. The Principles of Scientific Management. New York, London : Harper & Brothers, 1911. 152 p.
135. Harrison G. C. Standard costs. Installation, operation and use. New York : Ronald Press Company, 1930. 308 p.

136. ДСТУ ІЕС 60812:2015 Методи аналізу надійності систем. Аналіз наслідків видів відмов (FMEA) (ІЕС 60812:2006, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2015.

137. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). Київ : Держспоживстандарт, 2013.

138. Головка Т. В., Сагова С. В. Стратегічний аналіз : навч.-метод. посіб. Київ : КНЕУ, 2002. 198 с.

139. Camp R. C. A Bible for Benchmarking, by Xerox. Financial Executive. 1993. 9(4). P. 23–27.

Навчальне видання

ШИФРІН Євген Ісайович
СОКОЛ Євген Іванович
ЧУХЛІБ Віталій Леонідович
ГУБСЬКИЙ Сергій Олександрович
LECHNER Philipp
VOLK Wolfram

ЯКІСТЬ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ

Навчальний посібник
для студентів технічних спеціальностей
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск доц. Губський С.О.

Роботу до видання рекомендувала проф. Пономаренко О.І.

В авторській редакції

План 2024 р., поз. 151

Підп. до друку 2025 р. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 17,3

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Електронне видання